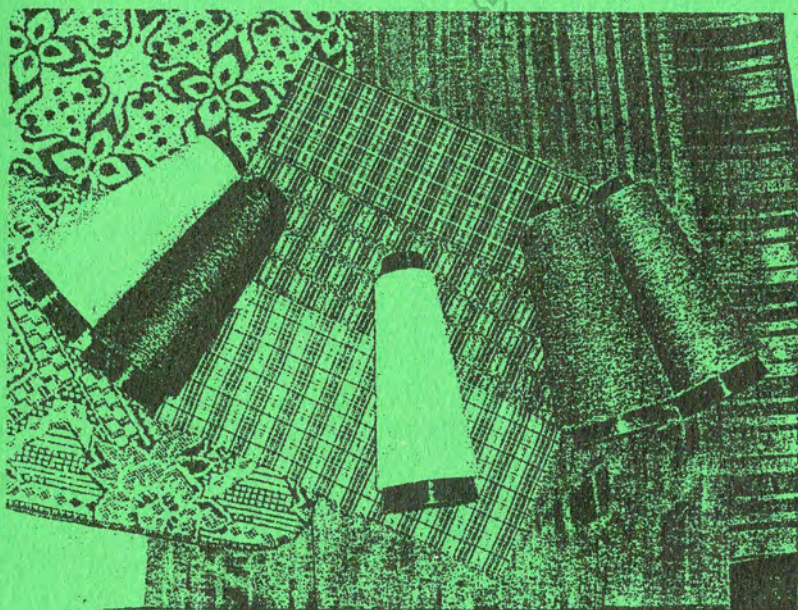


677.017

к 89

А.А. КУЗНЕЦОВ
В.И. ОЛЬШАНСКИЙ

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕКСТИЛЬНЫХ НИТЕЙ



А.А. Кузнецов
В.И. Ольшанский

**ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ТЕКСТИЛЬНЫХ НИТЕЙ.**

Витебск
2004

УДК 677.017

ББК 37.23

К 89

Авторы:

А.А. Кузнецов

– канд. техн. наук, доцент кафедры физики Учреждения образования “Витебский государственный технологический университет”

В.И. Ольшанский

– канд. техн. наук, профессор, зав. кафедрой “Технология и оборудование машиностроительного производства”, декан механико-технологического факультета Учреждения образования “Витебский государственный технологический университет”

Рецензенты:

Вилюмсоне А.

– Ассоч. Проф., Dr. sc. ing., директор Института текстильной технологии и дизайна Рижского технического университета

Клявиньш А.

– Проф., Dr. habil. sc. ing.

Вожгуров Г.С.

– директор Республиканского унитарного предприятия “Витебский центр стандартизации, метрологии и сертификации”

Рекомендована:

кафедрой «Физика» Учреждения образования “Витебский государственный технологический университет”;

Советом Учреждения образования “Витебский государственный технологический университет”

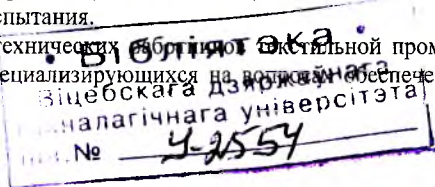
К 89

Кузнецов А.А.

Оценка и прогнозирование механических свойств текстильных нитей: Моногр./ А.А.Кузнецов, В.И.Ольшанский – Витебск: УО «ВГТУ», 2004. – 226 с.

Приводится обобщающий теоретический и практический материал по оценке и прогнозированию основных показателей, характеризующих механические свойства текстильных материалов (нитей, волокон) методами математического моделирования процесса испытания.

Для инженерно-технических работников текстильной промышленности, научных работников, специализирующихся на обеспечении качества текстильных материалов.



УДК 677.017

ББК 37.23

ISBN 985-481-00-1-6

© Авт. Кузнецов А.А., Ольшанский В.И., 2004

ПРЕДИСЛОВИЕ

Высокие требования, предъявляемые к потребительским свойствам и качеству современных изделий текстильной и легкой промышленности, определяют её конкурентоспособность на внутреннем рынке Республики Беларусь и за рубежом. Совершенно очевидно, что от качества исходных материалов, применяемых для изготовления тканей, трикотажа и одежды, зависит качество готового изделия. Управление качеством продукции требует знания свойств, умение правильно измерять и объективно оценивать важнейшие показатели качества, а также достоверно прогнозировать количественные характеристики свойств продукции.

Под **качеством** текстильного материала обычно понимают совокупность определенных свойств, которые обуславливают пригодность этого материала для переработки и использования по назначению. Из всего многообразия свойств текстильных материалов (особенностей строения, геометрических, механических, физических, химических, эстетических и т.д.) в работе анализируются лишь механические свойства. Это обусловлено несомненной их важностью и огромным влиянием на ход протекания технологических процессов переработки текстильного материала. Кроме того, механические свойства сырья во многом определяют эксплуатационные свойства готовых изделий.

Оценка качества текстильных материалов (волокон, нитей) предполагает решение следующих задач [1]:

- оценка качества текстильного материала в соответствии с требованиями нормативно-технической документации;
- прогнозирование изменения качества текстильного материала в процессе его дальнейшей переработки и эксплуатации.

Количественной характеристикой свойств текстильного материала, входящих в состав его качества, являются соответствующие показатели качества [1, 2]. Под **показателем качества** обычно понимают его свойство, к которому предъявляются обоснованные нормативные требования и используемое при оценке его качества.

Показатели качества должны рассматриваться применительно к определенным условиям получения и эксплуатации (использования) текстильного материала [2]. Стандартами [4–7] установлены показатели качества, характеризующие механические свойства текстильных материалов в условиях эксперимента.

Для нитей стандартами установлены следующие показатели качества [3, 8]: 1)линейная плотность T ; 2)коэффициент крутки α (иногда крутка K); 3)относительная разрывная нагрузка одиночной нити P_0 ; 4)относительное удлинение при разрыве одиночной нити ϵ_r ; 5)относительная разрывная нагрузка пасмы Q_p ; 6)коэффициент вариации по линейной плотности C_t ; 7)коэффициент вариации по относительному удлинению при разрыве C_ϵ ; 8)коэффициент вариации по коэффициенту крутки C_α или по крутке C_K . Несомненный практический интерес вызывают показатели механических свойств, не внесенные в стандарты [8, 9] (работа, затраченная на разрыв A_p ; относительное упругое удлинение нити ϵ_u ; относительное эластическое удлинение нити ϵ_e ; относительное пластическое удлинение нити ϵ_n ; выносливость при многократных деформациях растяжения p_n ; остаточная циклическая относительная деформация ϵ_{oc} ; выносливость при многократных деформациях изгиба p_n).

Несмотря на значительное количество ГОСТов и технических условий, регламентирующих методики проведения испытаний, существующие методы требуют значительных материальных и временных затрат и не позволяют осуществлять прогноз показателей качества текстильных материалов в условиях их дальнейшей переработки и эксплуатации в изделии.

Вследствие этого, разработка новых методов оценки и прогнозирования механических свойств текстильных нитей, направленных на снижение временных и материальных затрат при проведении сертификационных испытаний с одновременным повышением их информативности является актуальной научной и практической задачей.

Монография предназначена для инженерно-технических работников текстильной промышленности, научных работников, специализирующихся на вопросах обеспечения качества текстильных материалов.

Результаты исследований могут быть использованы:

- при сертификации изделий и материалов текстильной промышленности;
- при разработке новых технологий получения и переработки текстильных материалов для определения рациональных режимов по результатам кратковременных испытаний;
- при разработке новых Государственных стандартов и технических условий, устанавливающих научно-обоснованные нормы показателей качества для конкретного вида сырья с учётом его дальнейшего использования.

Работа выполнялась в рамках Межвузовской программы фундаментальных исследований «Метрологическое обеспечение качества»

Авторы выражают глубокую благодарность и признательность доценту кафедры “Ткачество” Калмыковой Е.А. и профессору кафедры “Технология и оборудование машиностроительного производства” Махариному Е.И. за ценные советы и высказанные рекомендации в процессе подготовки рукописи к изданию.

Авторы считают своим долгом выразить свою признательность

- коллективу Института текстильной технологии и дизайна Рижского технического университета (Латвия) и лично Ассоц. Проф., Dr. sc. ing. Вилломсоне А. и Проф., Dr. habil. sc. ing. Клявиньш А.
- директору РУП “Витебский центр стандартизации, метрологии и сертификации” Вожгурову Г.С.

за тщательный просмотр рукописи и сделанные ими ценные критические замечания, которые были учтены при окончательном оформлении монографии.

Главы 1, 2, 3, 4 написаны к.т.н., доцентом Кузнецовым А.А., предисловие, глава 5 – к.т.н., проф. Ольшанским В.И.

Замечания и предложения просьба присылать по адресу: 210035, Витебск, Московский пр–т, 72

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

P_p – разрывная нагрузка, Н

σ_p – разрывное напряжение (предел прочности), Па

σ_y – условный предел упругости, Па

σ_n – условный предел пластичности, Па

$\Delta\sigma_{упр}$ – условный предел упрочнения, Па

l_p – абсолютное разрывное удлинение, м

ε_p – относительное разрывное удлинение, %

T – линейная плотность нити, текс

γ – плотность вещества нити, кг/м³

L_0 – зажимная (начальная) длина образца нити, м

P_i – текущее значение растягивающей силы, Н

ε_i – текущее значение относительного удлинения, %

l_i – текущее значение абсолютного удлинения, м

P_0 – относительная разрывная нагрузка, Н/текс

E_y – условный модуль упругости, Па

Q_p – разрывная нагрузка пучка волокон, Н;

^(s) $\eta(x)$ – функция тренда показателя качества,

^(s) $\phi(x)$ – флюктуации показателя качества

ψ_d – относительный показатель неравномерности прочности, %

C_p – коэффициент вариации по разрывной нагрузке, %

C_T – коэффициент вариации по линейной плотности, %

C_{ε_p} – коэффициент вариации по разрывному удлинению, %

C_{σ_p} – коэффициент вариации по разрушающему напряжению, %

C_{σ_y} – коэффициент вариации по условному пределу упругости, %

C_{σ_n} – коэффициент вариации по условному пределу пластичности, %

$C_{\Delta\sigma_{упр}}$ – коэффициент вариации по условному пределу упрочнения, %

A_p – работа разрыва, Дж

A_y – условная работа разрыва, Дж

η – коэффициент полноты диаграммы растяжения

$\varepsilon_{пр}$ – предельное значение относительного удлинения, %;

$\sigma_{пр}$ – предельное значение напряжения, Па

$\phi_i(x_j)$ – полином i -той степени по x_j ;

ГЛАВА I

МАСШТАБНЫЙ ЭФФЕКТ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Общие сведения о масштабном эффекте прочностных характеристик текстильных материалов

В исследованиях проф. Перепелкина К. Е. [10] отмечается, что работоспособность нитей и стабильность протекания технологических процессов их получения и переработки определяются не только средними уровнями показаний механических свойств и внешних воздействий, но и, в первую очередь, неравномерностью свойств (или минимальными значениями этих показателей). Текстильные волокна и нити, обычно, имеют как разброс показателей механических свойств в группе испытываемых образцов, так и продольную неравномерность механических свойств в каждом из образцов. Следствием этого, как показали результаты экспериментальных исследований [8–12], является существенная зависимость средней разрывной нагрузки $\bar{P}_p$ от зажимной длины L . От L зависит также и допустимое в стандартах отклонение по разрывной нагрузке. С увеличением зажимной длины L значение P_p уменьшается. Данная зависимость получила название **масштабного эффекта прочностных характеристик** [10–13, 15–18].

В процессах получения и переработки, режимы которых существенно отличаются от условий лабораторных испытаний, механические показатели нитей изменяются. Для объективного прогнозирования поведения нитей в технологических процессах показатели свойств нитей должны задаваться не числами, а функциями условий нагружения. Например, показатель прочности нити следует представлять в виде некоторой функции [10]:

$$P = f(P_0, l, v), \quad (1.1)$$

где P_0 – относительная разрывная нагрузка, определяемая в стандартных условиях;

l – относительная длина зажима $l = L/L_0$ (L – длина образца нити, определяемая условиями переработки или эксплуатации, L_0 – зажимная длина образца нити, регламентируемая соответствующими стандартами);

v – относительная скорость деформирования $v = V/V_0$ (V – скорость растяжения образца нити, определяемая условиями переработки или эксплуатации, V_0 – скорость растяжения образца, регламентируемая соответствующими стандартами).

Нахождение функциональной зависимости между прочностными характеристиками, с одной стороны, и условиями проведения испытания, с другой стороны, подразумевает построение математической модели, способной прогнозировать значение показателей свойств не только в лабораторных условиях, но также и в условиях дальнейшей переработки и эксплуатации. Под моделью обычно понимают некий идеальный образ или материальный прообраз (образец) системы (оригинала данной модели), который используется при определенных условиях, в качестве “заместителя” или представителя, воспроизводя интересующие исследователя свойства и характеристики оригинала [14].

Общей чертой большинства исследований, посвященных способам оценки масштабного эффекта прочностных характеристик текстильных нитей, является использование метода математического моделирования. По способу получения математической модели, существующие методы (подходы) можно подразделить на теоретические и эмпирические.

1.1.1. Эмпирические методы оценки масштабного эффекта прочностных характеристик текстильных материалов

Сущность эмпирического подхода, практически в любом исследовании, заключается в математическом описании исследуемого процесса на основании изучения системы как “черного ящика”, то есть по ее отклику на изменение входных показателей [14]. В случае исследования масштабного эффекта входным показателем является геометрический размер (зажимная длина) исследуемого образца нити.

Для оценки разрывной нагрузки текстильных нитей в работе [10] предлагается использовать эмпирическую математическую модель следующего типа:

$$P(l, v) = P_0 \cdot l^{-\beta} \cdot K_v^{-lg v}, \quad (1.2)$$

где β , K_v – некоторые, экспериментально определяемые параметры модели, зависящие от вида строения волокон и нитей.

В работах [13, 15] исследуются возможность применения теории масштабного эффекта (зависимости исследуемого показателя качества от гео-

метрического размера испытуемого материала) на разрывную нагрузку, удлинение при разрыве и работу разрыва. В результате проведенных исследований авторами были получены следующие зависимости средних значений разрывной нагрузки и относительного удлинения при разрыве от длины исследуемого образца нити:

$$\bar{P}_p = a_p \cdot L^{-b_p} \quad (1.3)$$

$$\bar{\varepsilon}_p = a_\varepsilon \cdot L^{-b_\varepsilon}, \quad (1.4)$$

где $\bar{P}_p, \bar{\varepsilon}_p$ – средние значения показателей, соответственно, прочности и относительного удлинения при разрыве;

L – длина исследуемого образца нити;

$a_p, b_p, a_\varepsilon, b_\varepsilon$ – экспериментально определяемые параметры модели, зависящие от вида и строения волокон и нитей.

Масштабный коэффициент b_p взаимосвязан с величинами коэффициентов вариации и неравноотой, характеризующими разброс показателей прочности, и изменяется в интервале 0.01–0.02. Для нитей масштабный эффект прочности во многом определяется фрикционным взаимодействием элементарных волокон и нитей друг с другом, и соответственно, сильно зависит от степени крутки нити. С повышением крутки масштабный эффект резко уменьшается.

Для упрощенной оценки дефектности и масштабного эффекта прочности нитей в работах [12, 15, 17–18] используется величина коэффициента ψ , определяемая следующим соотношением:

$$\psi = \frac{\bar{P}(L_1)}{\bar{P}(L_2)}, \quad (1.5)$$

где $\bar{P}(L_1), \bar{P}(L_2)$ – средние значения разрывной нагрузки нити при двух значениях зажимной длины $L_1 > L_2$.

Чем менее дефектны и неравномерны по механическим свойствам волокна и нити, тем выше величина ψ .

На основе проведенных экспериментальных исследований установлено [15], что величина ψ колеблется от 0.90–0.95 для химических волокон, до 0.5–0.7 для пряжи (при зажимных длинах $L_1 = 500$ мм, $L_2 = 50$ мм).

Целью проведенных исследований [16] являлось изучение неравномерности физико-механических свойств элементарных нитей и оценка влияния масштабного фактора на их прочность. В качестве объектов ис-

следования выступали высокомолекулярные технические нити терлон и СМВ различной структуры. Экспериментально установлено, что распределение прочности с доверительной вероятностью 0.95 подчиняется нормальному закону распределения, а неравномерность нитей по структуре приводит к снижению средней прочности. Для изучения зависимости среднего значения напряжения при разрыве $\bar{\sigma}_p$ от длины исследуемого образца нити L предлагается эмпирическая модель в логарифмических координатах следующего вида:

$$\ln \bar{\sigma}_p = A \cdot L + B, \quad (1.6)$$

где A, B – экспериментально определяемые параметры модели, зависящие от вида образца.

В работах [12, 17–18] авторы считают наиболее объективной характеристикой дефектности и неравномерности механических свойств текстильных материалов модель, которая основывается на результатах исследования масштабного эффекта прочности. Так в работе [17] на основе проведения испытаний в диапазоне зажимных длин $L=5-100$ мм получена эмпирическая зависимость среднего значения разрывной нагрузки от зажимной длины образца следующего вида:

$$\begin{aligned} \bar{P} &= A \cdot L^{-b}, \text{ или} \\ \ln \bar{P} &= A - B \cdot \ln L, \end{aligned} \quad (1.7)$$

где $\bar{P}$ – среднее значение разрывной нагрузки;

L – зажимная длина;

A, B – постоянные коэффициенты.

При этом, коэффициент A является условной характеристикой средней прочности волокон с некоторой минимальной дефектностью, параметр модели B – коэффициент масштабного эффекта и характеризует дефектность текстильного материала.

Проведенные исследования [12] указывают на то, что для всех исследуемых нитей и пряжи характерен масштабный (размерный) эффект разрывных характеристик, причем, масштабный эффект удлинения выражен сильнее, чем масштабный эффект прочности. Получены нормированные значения масштабных коэффициентов, определяемые соотношением (1.5), которые, с точки зрения авторов, представляют критерии для косвенной оценки дефектности разнообразных текстильных нитей. Данные кри-

терии авторы рекомендуют для определения работоспособности текстильных нитей при проектировании свойств готовых изделий.

В работе [19] также отмечается, что длина образца при испытании волокнистых материалов на прочность существенно влияет на величину прочности волокна, пряжи и ткани. Поскольку, хлопковое волокно имеет слабые места, то распределение его прочности по длине волокна неравномерно. Проведено исследование влияния изменения длины образца на прочностные характеристики пяти образцов хлопчатобумажной пряжи кольцевого и пневмомеханического способов прядения, а также пряжи с сердечником. Показано, что прочность пряжи всех трех видов снижается при увеличении длины образца. При этом, в наибольшей степени она снижается для образцов пряжи большой линейной плотности кольцевого способа прядения, так как она более неравномерна по толщине вдоль длины, чем пряжа безверетенного способа.

В исследованиях, опубликованных в монографии проф. Белицына М.Н. [21], предлагается для оценки масштабного эффекта синтетических нитей использовать коэффициенты изменения разрывной нагрузки K_{pl} и разрывного удлинения $K_{\epsilon L}$ (при условии, что значения прочностных характеристик, определенных при стандартной длине нити, принимались равными единице). В результате для синтетических (полиамидных и полиэфирных) нитей были получены следующие математические модели [21]:

$$K_{pl} = 0,995 + \frac{2,5 \times 10^{-3}}{L}, \quad (1.8)$$

$$K_{\epsilon L} = 0,97 + \frac{0,015}{L}, \quad (1.9)$$

Однако, с точки зрения автора [21], математические модели (1.8), (1.9) адекватны при описании масштабного эффекта только синтетических нитей.

Таким образом, экспериментальные исследования [9, 10, 12–13, 15–19] подтверждают существование масштабного эффекта прочности текстильных материалов. Следует отметить, что для практического использования предложенных математических моделей (1.2) – (1.7) необходимы значительные временные и материальные затраты для проведения испытаний по определению параметров моделей.

На основе анализа предложенных эмпирических моделей (1.2) – (1.9) установлено, что данные модели достоверно характеризуют масштабный эффект прочности только в некотором диапазоне зажимных длин L исследуемых образцов. Анализ эмпирических моделей указывает на то, что при $L \rightarrow 0$ среднее значение прочности бесконечно велико. Исследования, опубликованные в монографии проф. Белицына М.Н. [21], подтверждают это.

ликованные в работах [9, 11, 20, 22], свидетельствуют о том, что это не является справедливым. К недостаткам вышеприведенных подходов следует отнести тот факт, что некоторые параметры математических моделей не имеют явно выраженного физического смысла, а являются абстрактными коэффициентами влияния.

В работе [23] отмечается, что наиболее важными факторами для прогнозирования прочности пряжи являются средняя прочность, неровнота её по прочности и натяжение пряжи в процессе прядения. На основе экспериментальных исследований в области прогнозирования разрывной нагрузки пряжи пневматического прядения с использованием нескольких моделей проведен сравнительный анализ различных математических моделей (эмпирических, компьютерных и моделей, основанных на взаимосвязи большого числа расчетных элементов). В результате анализа установлено, что использование эмпирических моделей предпочтительно только в случае отсутствия достаточного количества вычислительной техники.

Таким образом, перспективными, с точки зрения материальных и временных затрат на проведение испытаний, являются компьютерные модели, которые в наибольшей степени пригодны для определения взаимодействий между различными компонентами и характеристиками проектируемой пряжи.

1.1.2. Теоретические методы оценки масштабного эффекта прочностных характеристик текстильных материалов

В отличие от эмпирических методов исследований, построение теоретических математических моделей основано на анализе физических процессов, происходящих в системе [14]. При этом параметры теоретических моделей имеют явно выраженный физический смысл, а не являются абстрактными коэффициентами влияния.

Одним из первых отечественных учёных предпринявших попытку теоретически получить зависимость разрывной нагрузки от зажимной длины образца нити является проф. Н.В.Васильев [25]. Предположив, что вероятность распределения разрывной нагрузки по длине нити одинакова («вероятность появления различного сопротивления разрыву одинакова») проф. Васильев для определения зависимости разрывной нагрузки от зажимной длины нити предложил использовать следующую математическую модель [25]:

$$\bar{P}_p(k \cdot L_0) = P_p(1) + \frac{(P_p(n) - P_p(1))}{k} \cdot \left\{ \frac{n}{k} \cdot \left(1 - \frac{k}{n} \right) - \left(n - k + \frac{n}{k} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(1 - \frac{k}{n} \right)^{n-k-1} \right\}, \quad (1.10)$$

либо упрощенную модель

$$\bar{P}_p(k \cdot L_0) = P_p(1) + \frac{(P_p(n) - P_p(1))}{k}, \quad (1.11)$$

где $\bar{P}_p(k \cdot L_0)$ – среднее значение разрывной нагрузки при зажимной длине образца нити $k \cdot L_0$;

$P_p(1)$ – наименьшая разрывная нагрузка при зажимной длине L_0 ;

$P_p(n)$ – наибольшая разрывная нагрузка при зажимной длине L_0 ;

n – число испытаний при зажимной длине L_0 ;

k – отношение зажимных длин.

Несовершенство предложенных математических моделей (1.10), (1.11) состоит в том, что при $k=1$ левая часть равенства не равно правой. Также следует отметить значительное отклонение расчётных значений и экспериментальных данных при $k < 10$ [25]. Данный факт можно объяснить тем, что в действительности распределение разрывной нагрузки в большинстве подчиняется симметричному (нормальному, Вейбула) распределению.

Попытки теоретической интерпретации масштабного эффекта прочностных характеристик за рубежом впервые предприняты Пирсом (Peirce E.) и Спенсор-Смитом (Spenser-Smith I.) [2, 11, 20, 25] на основании гипотезы “слабого звена” (weak-link). Предполагалось, что j -ый образец нити можно представить как некоторую цепь, состоящую из последовательно соединённых участков разной длины L_{ij} и прочности P_{ij} , где i – изменяется от 1 до n (число элементов вдоль волокна), j изменяется от 1 до m (число образцов в испытываемой партии). Данная теория получила название статистической стохастической теории разрушения [20]. Пирсом были получены следующие математические модели:

$$\bar{P}_p(n) = \bar{P}_p(1) + 4,2 \cdot (1 - n^{0,2}) \cdot \sigma_p(1); \quad (1.12)$$

$$S_p(n) = S_p(1) \cdot n^{0,2}, \quad (1.13)$$

где $\bar{P}_p(n)$ – среднее значение разрывной нагрузки для образцов, состоящих из n участков;

$\bar{P}_p(1)$ – средняя разрывная нагрузка для образцов, состоящих из одного участка, прочность которого по длине постоянна;

$S_p(1)$ – стандартное отклонение прочности образцов, состоящих из одного участка;

$S_p(n)$ – стандартное отклонение прочности образцов, состоящих из n элементов.

Данные модели были получены при следующих допущениях:

- длина элементов L_{ij} постоянна и равна L_0/n ;
- распределение $\bar{P}_p(1)$ – нормальное;
- прочность соседних участков не коррелирована.

Экспериментальные исследования [11] показали существенное расхождение данных опытов с результатами расчета по модели Пирса.

Применительно к текстильным материалам развитие теории Пирса для оценки прочности нитей (пряжи) нашло отражение в работах Спенсер-Смита [2, 11] и позднее проф. Гнеденко Б.В. [11, 25]. В данных работах учитывалась корреляция прочностей зон, отстоящих друг от друга на расстоянии $L_i = i \cdot L_0/p$. Однако, использование моделей Спенсер-Смита и Гнеденко затруднено, так как многие ее параметры необходимо определять экспериментально.

Рассматривая масштабный эффект прочностных характеристик как процесс неограниченного суммирования вариантов, выражаемый нормальным асимптотическим законом распределения, проф. А.С. Турчаниновым получены математические модели для изменения среднего значения разрывной нагрузки и среднего стандартного отклонения по разрывной нагрузке в зависимости от зажимной длины исследуемого образца нити [25]:

$$\bar{P}_p(k \cdot L_0) = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{a+1}\right)}{(L_0)^{\frac{1}{a+1}}}, \quad (1.14)$$

$$\bar{S}_p(k \cdot L_0) = \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{a+1}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{a+1}\right)\right]^2}, \quad (1.15)$$

где $\bar{S}_p(k \cdot L_0)$ – стандартное отклонение по разрывной нагрузке для образца нити длиной $k \cdot L_0$;

Γ – гамма-функция, выражение Эйлера интеграла второго рода

$$\Gamma(Z) = \int_0^{\infty} e^{-t} \cdot t^{Z-1} dt;$$

а – постоянная, определяемая из ряда суммарного распределения разрывной нагрузки образцов нити с зажимной длиной, регламентируемой соответствующими стандартами

Однако, вычисления, произведенные по моделям проф. А.С. Турчинова, приемлемы только для оценки стандартного отклонения по разрывной нагрузке [25]. При вычислении разрывной нагрузки по модели (1.14) расчетные значения получаются завышенными по сравнению с опытными данными (удовлетворительные результаты получены при отношении зажимных длин не менее 100). Следует также обратить внимание на практическую трудность использования моделей (1.14), (1.15) из-за значительных временных затрат по определению параметра а.

Можно отметить, что работы по изучению и прогнозированию механических свойств текстильных материалов в основном проводились по двум направлениям. В первом случае особое внимание отводилось теоретическому анализу физической сущности процесса разрушения и вытекающей из этого статистической модели. Во втором случае, работы сводились к подбору наиболее соответствующих законов распределения для интерпретации получаемых экспериментальных данных [2].

Статистическая стохастическая теория разрушения получила широкое распространение при исследовании процесса разрушения полимерных материалов в [20]. Среднее значение разрушающего напряжения σ_p для некоторых типов полимерных материалов определяется следующим соотношением:

$$\sigma_p = \sigma_0 \cdot \frac{1 - \alpha \cdot [\lg(V \cdot n)]}{\lambda}, \quad (1.16)$$

где σ_0 – напряжение, возникающее при разрушении образца в отсутствии дефектов;

V – объем исследуемого образца;

λ – параметр экспоненциального распределения;

α – параметр модели.

Модель (1.16) была получена при следующих предположениях:

- распределение дефектов по размерам носит экспоненциальный характер;
- прочность и геометрические размеры дефекта взаимосвязаны математической моделью следующего вида:

$$\sigma_p = \sigma_0 \cdot (1 - \alpha \cdot x), \quad (1.17)$$

где x —размер дефекта.

Для описания масштабного эффекта прочности полимерных материалов довольно часто используется распределение Вейбулла [20, 26]. Для распределения Вейбулла, аналогично (1.16), зависимость среднего значения разрушающего напряжения σ_p от геометрических размеров образца описывается следующим выражением [20]:

$$\sigma_p \approx \alpha \cdot V^{-\frac{1}{b}}. \quad (1.18)$$

Математическая модель (1.18) отражает несколько иную форму масштабного эффекта прочности. Однако, модели (1.16), (1.18) получены при существенно упрощающих предположениях и допущениях, а в процессе переработки и эксплуатации текстильных материалов наибольший интерес вызывает не распределение дефектов по объему, а изменение прочности по длине исследуемого образца. Практическое применение вышеприведенных моделей затруднительно по причине необходимости экспериментального определения параметров.

В работе [22] приведены результаты исследования функции вероятности распределения разрушающего напряжения при растяжении углеродных нитей. Показано, что разрушающее напряжение при растяжении углеродных нитей подчиняется трехпараметрическому распределению Вейбулла. Параметры масштабного эффекта прочности могут использоваться при выборе рациональных параметров технологического процесса получения углеродных нитей, но практическое использование результатов исследований затруднено по причине трудоемкости математических расчетов.

Прогнозирование прочности аппаратной чистошерстяной пряжи линейной плотности $T=109$ текс в работе [23] производилось на основе применения стохастической теории разрушения. При предположении, что вероятность разрушения волокна длиной L при напряжении, меньшем σ_p , задается функцией распределения Вейбулла, получены следующие математические модели для средней прочности и для ее дисперсии:

$$\bar{\sigma}_p(L) = \sigma_0 \cdot \left(\frac{L_0}{L} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right); \quad (1.19)$$

$$S_{\sigma}^2(L) = \sigma_0^2 \cdot \left(\frac{L_0}{L} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \cdot \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{\alpha} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \right], \quad (1.20)$$

где Γ – гамма-функция;

α – параметр распределения, определяющий структурные особенности материала;

σ_0 – параметр распределения, характеризующий модальное значение прочности;

L – длина образца нити, определяемая условиями переработки или эксплуатации;

L_0 – зажимная длина образца нити, регламентируемая соответствующими стандартами.

Расчет прочности пряжи в работе [21] осуществлялся на основе расчета прочности нескрученных волокон (задача о прочности пучка волокон) и оценки коэффициента реализации средней прочности волокон в пряже. Параметры моделей определялись на основе анализа результатов проведенных испытаний. В данной работе отмечается, что нельзя рассчитывать на большую точность в расчетах, согласно моделям (1.17), (1.18) по причине принятых допущений при построении модели разрушения. Не совсем понятны структурные особенности материала, которые характеризует параметр распределения α .

В известной монографии И. Нарисавы [20] отмечается, что гипотеза слабого звена по своей сути применима только для хрупкого разрушения материалов. При пластическом разрушении после разрушения одного из структурных элементов нагрузка перераспределяется на остальные элементы, и разрушение материала происходит в результате разрушения всех оставшихся структурных элементов. Поэтому для пластического разрушения рассматривают модель параллельного соединения структурных элементов (модель пучка волокон). Кулеман [20], предполагая распределение прочности по Вейбуллу для каждого структурного элемента, оценил распределение прочности в пучке, состоящем из бесконечного числа волокон. Он показал, что с ростом дисперсии прочности структурных элементов отношение прочности пучка волокон к средней прочности структурных элементов монотонно снижается, причем прочность пучка волокон меньше средней прочности структурных элементов. И. Нарисава отмечает [20], что для описания процесса разрушения реальных материалов необходимо использовать промежуточную модель, то есть модель последовательного-параллельного соединения структурных элементов. Однако с математической точки зрения такой подход является весьма сложным [20].

Таким образом, аналитический обзор исследований, посвященных вопросам масштабного эффекта прочностных характеристик текстильных материалов, позволяет отметить следующее:

- 1) полученные в стандартных условиях испытаний показатели качества, характеризующие прочностные свойства текстильного материала, обладают недостаточной информативностью, так как могут, при сравнении с базовыми значениями, характеризовать только качество изготовления с точки зрения соответствия стандарту. Зачастую они не могут служить основанием для сравнения поведения текстильных нитей в различных условиях получения и переработки;
- 2) рассмотренные методы требуют значительных временных затрат на проведение испытаний по определению используемых постоянных коэффициентов и не обладают возможностью прогнозировать значения показателей, характеризующих масштабный эффект прочностных характеристик текстильных материалов в различных условиях эксплуатации.

Следовательно, несмотря на большое количество работ, посвященных вопросам оценки масштабного эффекта прочностных характеристик текстильных материалов, проблема снижения временных затрат на проведение испытаний и обеспечения достоверности оценки и прогнозирования показателей, характеризующих масштабный эффект, до настоящего времени остается не разрешенной.

1.2 Имитационное моделирование масштабного эффекта прочностных характеристик текстильных нитей

В работе [1] проф. Кирюхин С.М. отмечает значимость и сложность проблемы прогнозирования поведения нитей при переработке по результатам физико-механических испытаний. Одним из перспективных подходов ее решения является математическое моделирование процесса испытания и выявление факторов, влияющих на прочностные и деформационные характеристики.

Многие экспериментальные и теоретические исследования подтверждают существование масштабного эффекта прочностных характеристик текстильных материалов, но практическое использование предложенных математических моделей затруднено по причинам указанным выше.

С целью исключения вышеизложенных недостатков в данной работе предлагается научно-обоснованная методика оценки и прогнозирования зависимости разрывной нагрузки текстильных нитей (волокон) от зажимной длины образца по результатам кратковременных испытаний.

Для решения данной задачи используется метод имитационного моделирования испытаний, применение которого дает возможность представить изучаемый процесс (явление) в целом, найти общие закономерности, сделать определенные выводы относительно его физической сущности, а также значительно снизить уровень временных и материальных затрат.

Построение имитационной модели осуществлялось на основе гипотезы "слабого звена" (weak-link). Предполагалось, что каждый j -тый образец нити можно представить как некоторую цепь, состоящую из последовательно соединенных участков разной длины L_{ij} и прочности P_{ij} , где j – изменяется от 1 до m (m – число образцов в испытываемой партии), i – от 1 до n (n – число структурных элементов вдоль нити) (рис. 1.1).

С помощью программы, реализованной в математической системе "Maple V", сначала осуществлялось моделирование эксперимента по испытанию на разрыв партии из m образцов, состоящих из некоторого числа n структурных элементов и заданными значениями $\bar{P}_p(1)$ и $C_p(1)$ (где $\bar{P}_p(1)$, $C_p(1)$ – среднее значение разрывной нагрузки и коэффициент вариации по разрывной нагрузке для образцов, состоящих из одного участка, прочность которого по длине постоянна). Закон распределения значений разрывной нагрузки был принят нормальным.

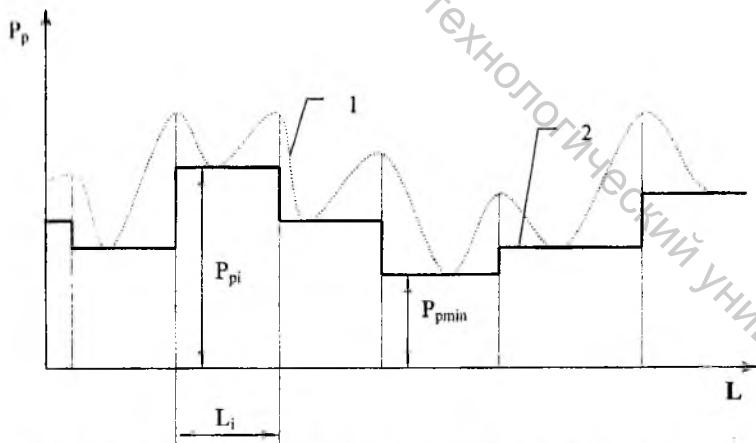


Рис. 1.1. Изменение прочности текстильной нити по сечениям (кривая 1)

В результате имитационного моделирования установлено, что распределение разрывной нагрузки $P_p(n)$ не совпадает с задаваемым законом распределения $\bar{P}_p(1)$ (где $\bar{P}_p(n)$, $C_p(n)$ – среднее значение разрывной нагрузки и коэффициент вариации для образцов, состоящих из n участков). Отмечается появление правой асимметрии (рис. 1.2) и сдвига средней разрыв-

ной нагрузки в сторону меньших значений, что соответствует результатам работ [10, 12].

Для выявления влияния зажимной длины L_0 нити на среднее значение разрывной нагрузки $\bar{P}_p$ проводилось моделирование таких же экспе-

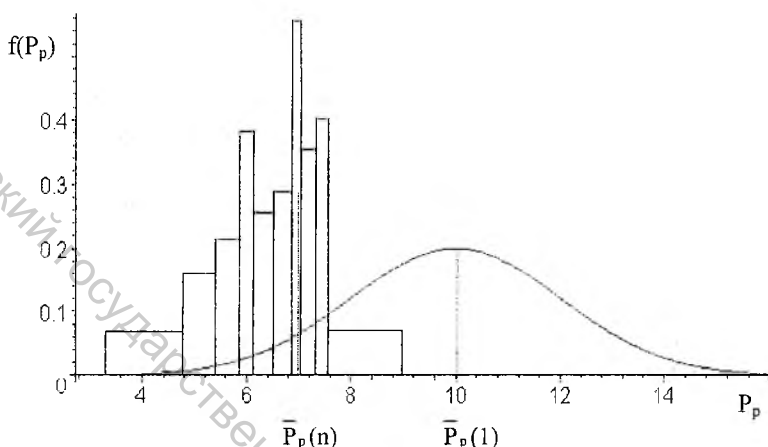


Рис. 1.2. Гистограмма распределения значений $P_p(n)$ и плотность вероятности значений $P_p(1)$ для образцов с $n = 15$, $m = 100$

риментов для нитей (волокон) с переменной зажимной длиной L_0 , которая считалась пропорциональной числу n участков цепи [26–30]. Исходными данными при моделировании являлись: вид закона распределения разрывной нагрузки (нормальный, Вейбулла, произвольный, который численно задаётся гистограммой распределения), параметры закона распределения $\bar{P}_p(1)$ и $C_p(1)$, вид и параметры закона распределения числа участков цепи $\bar{n}$ и C_n , число испытываемых образцов m .

Испытание на разрыв нити (волокна) осуществлялось на основе имитационной модели в соответствии со следующим алгоритмом. Для каждого j -того образца генератор случайных чисел, по задаваемому закону распределения, генерирует значение n_j , которое округляется до ближайшего целого числа. Затем, в соответствии с принятыми параметрами законов распределения, генерируются n_j значений P_{pj} , из которых выбирается наименьшее $P_{p\min}$. Данное значение считается разрывной нагрузкой для j -того образца.

Указанные действия повторяются для всех m образцов, и их результаты записываются в массив, который позволяет определить: среднее значение разрывной нагрузки $\bar{P}_p$, стандартное отклонение значений разрыв-

ной нагрузки S_0^2 , коэффициенты вариации и разброса по разрывной нагрузке C_p, dR_p .

При моделировании испытания происходит закономерное увеличение среднего числа участков $\bar{n}$ в исследуемом образце нити. Тогда для k -того этапа моделирования $n_k = 1 + k \cdot \delta$, где δ - шаг изменения n_k . Схема алгоритма имитационной модели представлена на рис. 1.3.

Некоторые результаты имитационного моделирования представлены на рис.1.4 – 1.7. Анализ зависимостей, приведенных на этих рисунках, позволяет сделать следующие предварительные выводы.

1. При увеличении числа участков n среднее значение разрывной нагрузки $\bar{P}_p$ и ее стандартное отклонение S_0^2 закономерно уменьшаются (рис.1.4, 1.5). Это объясняется тем, что при увеличении числа участков n увеличивается вероятность появления элемента нити с наименьшей по абсолютной величине разрывной нагрузкой. Разброс реализации относительно усредненной кривой можно объяснить ограниченностью выборки ($m=50$). Результаты моделирования влияния n на $\bar{P}_p(n)$ можно аппроксимировать следующей моделью:

$$\bar{P}_p(n) = (\bar{P}_p(1) - \bar{P}_{p,сл}) \cdot \exp\left(-\frac{n-1}{K_n}\right) + \bar{P}_{p,сл}, \quad (1.21)$$

где $\bar{P}_{p,сл}$ – среднее значение разрывной нагрузки наиболее слабых звеньев на разных нитях партии образцов;

K_n – параметр модели, характеризующий темп уменьшения среднего значения разрывной нагрузки $\bar{P}_p(n)$ при увеличении n . Когда $n = K_n + 1$, то

$$\frac{\bar{P}_p(n) - \bar{P}_{p,сл}}{\bar{P}_p(1) - \bar{P}_{p,сл}} = 0,3678.$$

2. Темп уменьшения среднего значения разрывной нагрузки $\bar{P}_p$ и ее стандартного отклонения S_0^2 увеличивается при увеличении исходного коэффициента вариации прочности образцов нити $C_p(1)$, состоящих из одного участка. Коэффициент вариации по разрывной нагрузке C_p при увеличении числа участков n остается практически постоянным. Разброс реализации относительно усредненной кривой можно объяснить ограниченностью выборки ($m=50$). Тогда

$$C_p(n) = C_p(1) = \left[\frac{S_0^2(1)}{\bar{P}_p(1)} \right] \times 100 = \left[\frac{S_0^2(n)}{\bar{P}_p(n)} \right] \times 100. \quad (1.22)$$

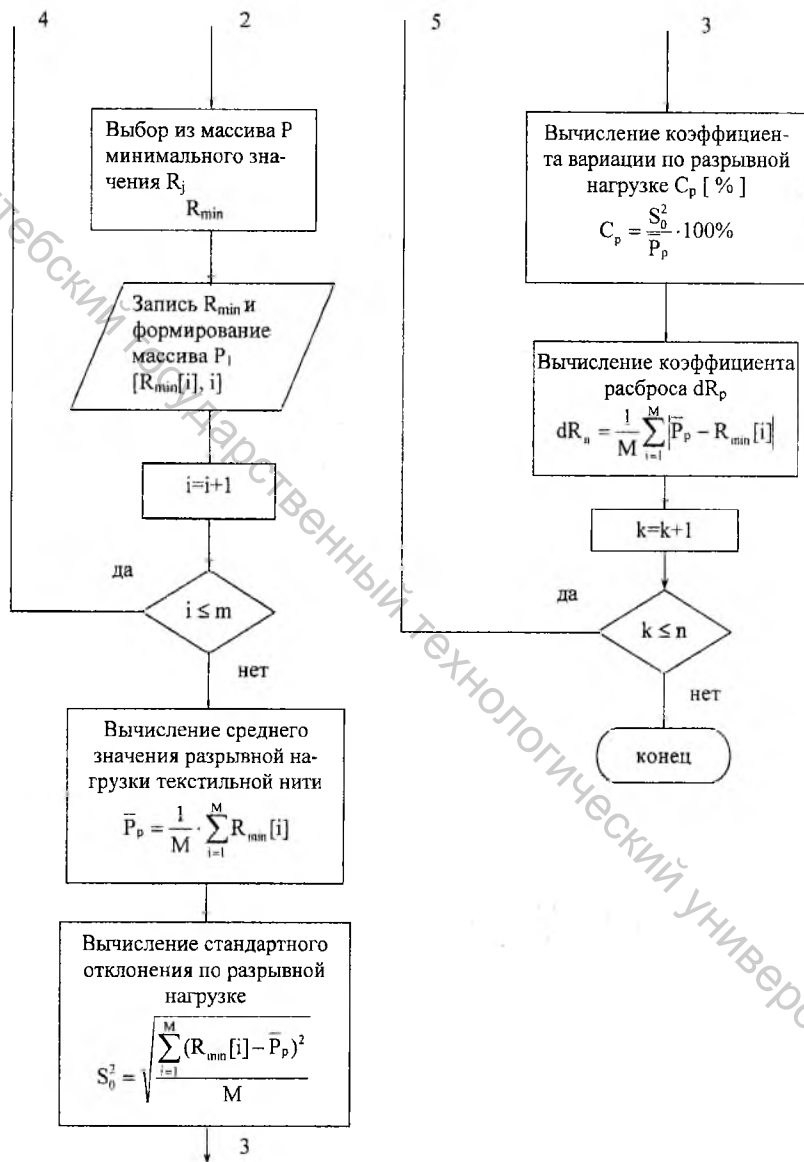
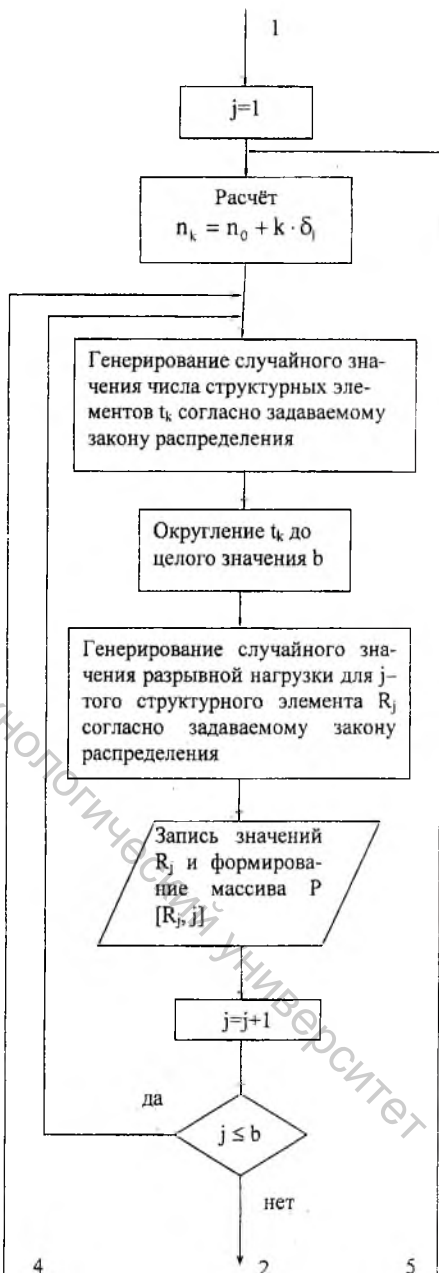
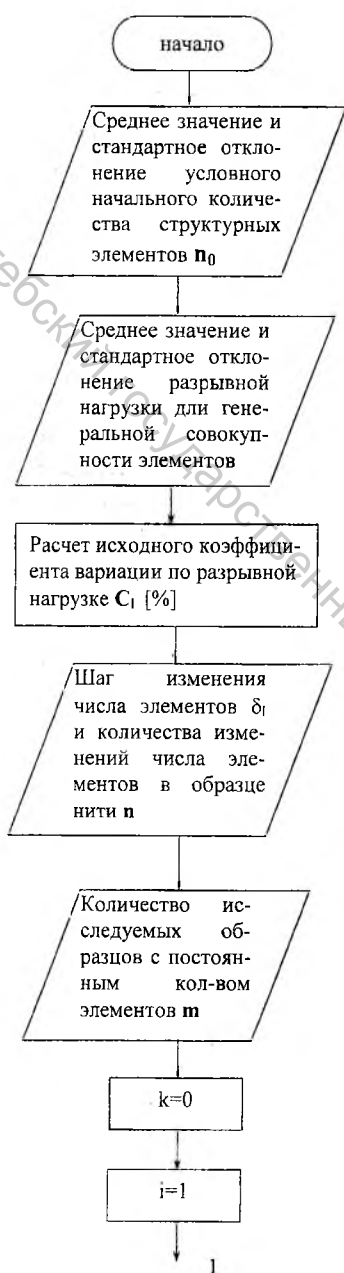


Рис. 1.3. Схема алгоритма имитационной модели, реализующей масштабный эффект прочности текстильных нитей (волокон)



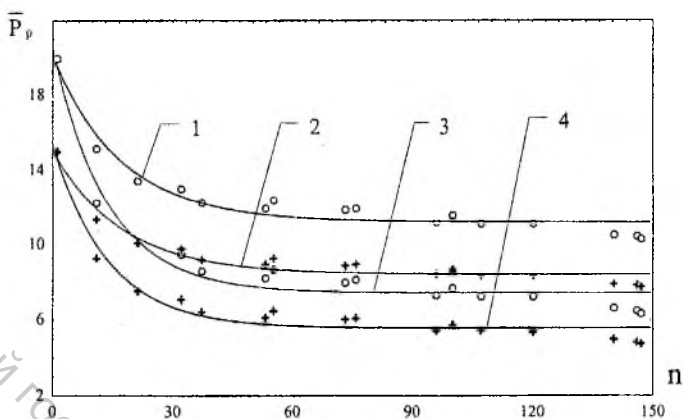


Рис.1.4. Зависимость среднего значения разрывной нагрузки $\bar{P}_p$ от числа элементов n в испытываемом образце нити (при законе распределения Вейбулла). (1 – $\bar{P}_p(1) = 20$, $C_p = 15\%$; 2 – $\bar{P}_p(1) = 20$, $C_p = 25\%$; 3 – $\bar{P}_p(1) = 15$, $C_p = 15\%$; 4 – $\bar{P}_p(1) = 15$, $C_p = 25\%$)

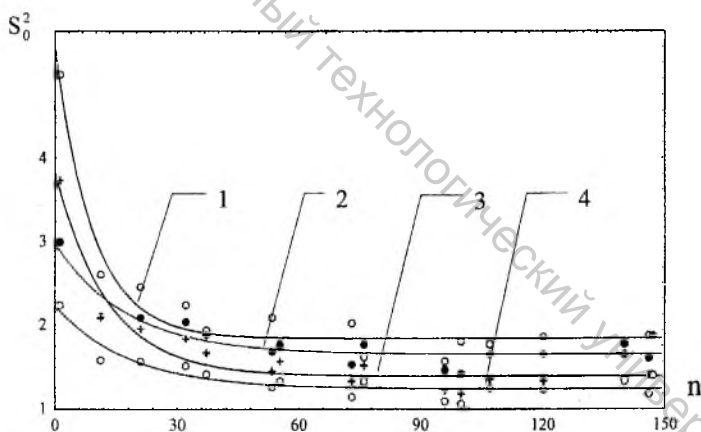


Рис.1.5. Зависимость среднего значения стандартного отклонения по разрывной нагрузке S_0^2 от числа элементов n в испытываемом образце нити (при законе распределения Вейбулла). (1 – $\bar{P}_p(1) = 20$, $C_p = 15\%$; 2 – $\bar{P}_p(1) = 20$, $C_p = 25\%$; 3 – $\bar{P}_p(1) = 15$, $C_p = 15\%$; 4 – $\bar{P}_p(1) = 15$, $C_p = 25\%$)

Следовательно, отсутствует необходимость в определении математической модели, описывающей изменение стандартного отклонения от количества структурных элементов в образце $S_0^2(n)$:

$$\sigma_p(n) = \frac{\sigma_p(1)}{P_p(1)} \cdot \bar{P}_p(n). \quad (1.23)$$

Подставив в соотношение (1.23) выражение (1.21), получим:

$$S_0^2(n) = \frac{S_0^2(1)}{P_p(1)} \cdot \bar{P}_p(n) = \frac{S_0^2(1)}{P_p(1)} \cdot \left[(\bar{P}_p(1) - \bar{P}_{p,сл}) \cdot \exp\left(-\frac{n-1}{K_n}\right) + \bar{P}_{p,сл} \right];$$

$$S_0^2(n) = [S_0^2(1) - S_{0,сл}^2] \cdot \exp\left(-\frac{n-1}{K_n}\right) + S_{0,сл}^2, \quad (1.24)$$

где $S_{0,сл}^2$ - стандартное отклонение разрывной нагрузки наиболее слабых звеньев испытываемых образцов нитей;

K_n - параметр модели, характеризующий темп уменьшения стандартного отклонения $S_0^2(n)$ при увеличении n .

3. Асимметрия закона распределения, отражающая смещение моды относительно среднего значения, существенно влияет на закономерность уменьшения среднего значения разрывной нагрузки $\bar{P}_p$ и ее стандартного отклонения S_0^2 , которая наблюдается при увеличении числа элементов n (зажимной длины образцов). Смещение моды закона распределения в сторону больших значений разрывной нагрузки (закон распределения Вейбулла) приводит к ослаблению темпа уменьшения среднего значения разрывной нагрузки (рис.1.6) и стандартного отклонения (рис.1.7) по сравнению с симметричным (нормальным) распределением.

Так как зажимная длина L_0 пропорциональна n , то по аналогии с (1.21) можно записать:

$$\bar{P}_p(L_0) = (\bar{P}_p(0) - \bar{P}_{p,сл}) \cdot \exp\left(-\frac{L_0}{K_L}\right) + \bar{P}_{p,сл}, \quad (1.25)$$

где $\bar{P}_{p,сл}$ - средняя разрывная нагрузка наиболее слабых звеньев, испытываемого образца нити;

$\bar{P}_p(L_0)$ - среднее значение разрывной нагрузки, как функции зажимной длины L_0 ;

$\bar{P}_p(0)$ - среднее значение разрывной нагрузки в партии образцов, зажимная длина которой стремится к 0;

K_L -имеет тот же смысл, что и K_n , то есть параметр модели определяющий темп уменьшения разрывной нагрузки $P_p(L_0)$ при увеличении зажимной длины. Данный показатель имеет размерность длины и характеризует длину образца нити, при которой отношение максимального изменения прочности, вызванное масштабным эффектом, больше текущего изменения прочности в ϵ раз:

$$\frac{\bar{P}_p(0) - \bar{P}_{p,сл}}{\bar{P}_p(L) - \bar{P}_{p,сл}} = \frac{\Delta \bar{P}_{p,макс}}{\Delta \bar{P}_{p,тек}} = \epsilon,$$

где $\bar{P}_p(L_0)$ – среднее значение разрывной нагрузки, определяемое при стандартных условиях проведения испытания.

Дальнейшие аналитические и экспериментальные исследования [26–30] неравномерности прочностных характеристик текстильных материалов по длине позволили предложить в качестве критерия косвенной оценки дефектности, вызванной неравномерностью прочности по длине образца текстильной нити, **относительный показатель неравномерности прочности ψ_d (%)**:

$$\psi_d = \frac{\bar{P}_p(0) - \bar{P}_{p,сл}}{\bar{P}_{p,сл}} \cdot 100 = \frac{\Delta \bar{P}_p}{\bar{P}_{p,ст}} \cdot 100, \quad (1.26)$$

где $\Delta \bar{P}_p$ – максимально возможное изменение среднего значения разрывной нагрузки нити вызванное масштабным фактором;

$\bar{P}_{p,ст.}$ – среднее значение разрывной нагрузки нити, определенное в стандартных условиях.

Таким образом, в результате проведенных исследований, установлено, что для характеристики неравномерности прочности нити по длине могут использоваться такие показатели, как $\bar{P}_{p,сл}$ – средняя разрывная нагрузка наиболее слабых звеньев, испытываемого образца нити, $\bar{P}_p(0)$ – среднее значение разрывной нагрузки в партии образцов, зажимная длина которой стремится к 0, ψ_d – относительный показатель неравномерности прочности

1.3. Оценка показателей неравномерности прочности по длине текстильной нити

Для практического использования модели (1.25) ее параметры следует определять экспериментально, испытав три партии нитей разной зажимной длины при условии, что разница ΔL между длинами будет постоянной (например, $\Delta L=0,1$ м).

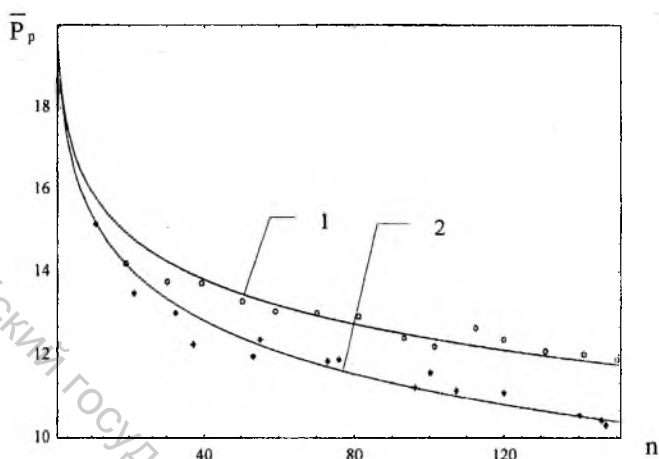


Рис. 1.6. Зависимость среднего значения разрывной нагрузки $\bar{P}_p$ от числа элементов n в исследуемом образце нити для различных законов распределения значений разрывной нагрузки. $\bar{P}_p(1) = 20, C_p = 15\%, m = 100$.

1 – нормальное распределение, 2 – распределение Вейбулла.

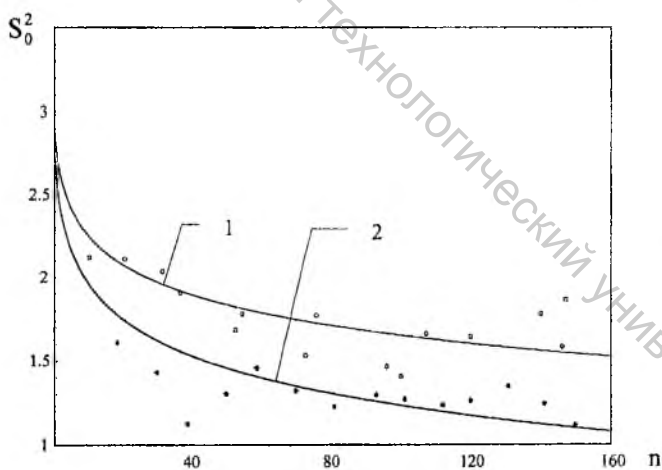


Рис. 1.7. Зависимость среднего значения стандартного отклонения S_0^2 по разрывной нагрузке от числа элементов в исследуемом образце нити для различных законов распределения значений разрывной нагрузки. $\bar{P}_p(1) = 20, C_p = 15\%, m = 100$

1 – нормальное распределение, 2 – распределение Вейбулла.

Предположим, что при трех зажимных длинах L_1 , L_2 и L_3 ($L_3 - L_2 = L_2 - L_1 = \Delta L = \text{const}$) средние значения разрывной нагрузки будут соответственно $\bar{P}_{p1}$, $\bar{P}_{p2}$ и $\bar{P}_{p3}$.

Тогда на основании модели (1.25) можно записать:

$$\left. \begin{aligned} \bar{P}_p(L_1) &= (\bar{P}_p(0) - \bar{P}_{p, \text{сн}}) \cdot \exp(-L_1/K_L) + \bar{P}_{p, \text{сн}}; \\ \bar{P}_p(L_2) &= (\bar{P}_p(0) - \bar{P}_{p, \text{сн}}) \cdot \exp(-L_2/K_L) + \bar{P}_{p, \text{сн}}; \\ \bar{P}_p(L_3) &= (\bar{P}_p(0) - \bar{P}_{p, \text{сн}}) \cdot \exp(-L_3/K_L) + \bar{P}_{p, \text{сн}}. \end{aligned} \right\} \quad (1.27)$$

После преобразований получим:

$$\delta = \frac{\bar{P}_p(L_1) - \bar{P}_p(L_3)}{\bar{P}_p(L_2) - \bar{P}_p(L_3)} = \frac{\exp(2 \cdot \Delta L/K_L) - 1}{\exp(\Delta L/K_L) - 1} = \exp(\Delta L/K_L) + 1.$$

Из данного выражения следует:

$$K_L = \frac{\Delta L}{\ln(\delta - 1)} \quad (1.28)$$

где $\delta = \frac{\bar{P}_p(L_1) - \bar{P}_p(L_3)}{\bar{P}_p(L_2) - \bar{P}_p(L_3)}.$

Обозначив

$$\exp\left(-\frac{L_1}{K_L}\right) = e_1; \quad \exp\left(-\frac{L_2}{K_L}\right) = e_2; \quad \exp\left(-\frac{L_3}{K_L}\right) = e_3;$$

$$\bar{P}_p(L_1) - \bar{P}_p(L_3) = \Delta P_1; \quad \bar{P}_p(L_2) - \bar{P}_p(L_3) = \Delta P_2;$$

можно записать:

$$\bar{P}_p(0) - \bar{P}_{p, \text{сн}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta P_1}{e_1 - e_3} + \frac{\Delta P_2}{e_2 - e_3} \right) \quad (1.29)$$

$$\bar{P}_{p, \text{сн}} = \frac{1}{3} \left[\bar{P}_p(L_1) + \bar{P}_p(L_2) + \bar{P}_p(L_3) - (\bar{P}_p(0) - \bar{P}_{p, \text{сн}})(e_1 + e_2 + e_3) \right] \quad (1.30)$$

Из этой системы можно определить выражения, определяющие параметры модели (1.25):

$$\bar{P}_{p, \text{сн}} = \frac{1}{3} \left[\sum \bar{P}_p - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta P_1}{e_1 - e_3} + \frac{\Delta P_2}{e_2 - e_3} \right) (e_1 + e_2 + e_3) \right] \quad (1.31)$$

$$\bar{P}_p(0) = \frac{1}{3} \sum \bar{P}_p + \frac{1}{6} \left(\frac{\Delta P_1}{e_1 - e_3} + \frac{\Delta P_2}{e_2 - e_3} \right) (3 - e_1 - e_2 - e_3), \quad (1.32)$$

где $\sum \bar{P}_p = \bar{P}_p(L_1) + \bar{P}_p(L_2) + \bar{P}_p(L_3)$.

Таким образом, в результате относительно кратковременного эксперимента появляется возможность определения параметров модели (1.25), которая позволяет прогнозировать значение средней разрывной нагрузки для нити любой длины.

1.4. Методика оценки показателей неравномерности прочности текстильных нитей по длине

1. Отбор образцов от партии производить с соответствии с ГОСТ 6611.0–73.
2. Исследуемые образцы нитей выдерживать в нормальных условиях в соответствии с ГОСТ 10681–75.
3. Определить средние значения разрывных нагрузок (сН) для данной нити при трех различных зажимных расстояниях, отличающихся на постоянную величину, например 0,1; 0,3; 0,5 м. (Количество испытаний в каждом случае $n=50$).
4. Рассчитать темп снижения разрывной нагрузки по формуле:

$$K_L = \frac{\Delta L}{\ln(\delta - 1)},$$

где ΔL – разница между зажимными длинами, установленными при испытании, т.е. $\Delta L=0,3-0,1=0,5-0,3=0,2$ м.

$$\delta = \frac{\bar{P}_p(L_1) - \bar{P}_p(L_3)}{\bar{P}_p(L_2) - \bar{P}_p(L_3)},$$

где $\bar{P}_p(L_1)$ – среднее значение разрывной нагрузки при зажимной длине 0,1 м;

$\bar{P}_p(L_2)$ – среднее значение разрывной нагрузки при зажимной длине 0,3 м;

$\bar{P}_p(L_3)$ – среднее значение разрывной нагрузки при зажимной длине 0,5 м;

5. Рассчитать среднюю разрывную нагрузку наиболее слабых участков нити по длине по формуле:

$$\bar{P}_{p, \text{сн}} = \frac{1}{3} \left[\sum \bar{P}_p - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta P_1}{e_1 - e_3} + \frac{\Delta P_2}{e_2 - e_3} \right) (e_1 + e_2 + e_3) \right]$$

где $\sum \bar{P}_p = \bar{P}_p(L_1) + \bar{P}_p(L_2) + \bar{P}_p(L_3)$;

$$\exp\left(-\frac{L_1}{K_L}\right) = e_1;$$

$$\exp\left(-\frac{L_2}{K_L}\right) = e_2;$$

$$\exp\left(-\frac{L_3}{K_L}\right) = e_3;$$

$$\bar{P}_p(L_1) - \bar{P}_p(L_3) = \Delta P_1;$$

$$\bar{P}_p(L_2) - \bar{P}_p(L_3) = \Delta P_2;$$

6. Рассчитать среднюю разрывную нагрузку нити при зажимной длине, стремящейся к нулю, по формуле:

$$\bar{P}_p(0) = \frac{1}{3} \sum \bar{P}_p + \frac{1}{6} \left(\frac{\Delta P_1}{e_1 - e_3} + \frac{\Delta P_2}{e_2 - e_3} \right) (3 - e_1 - e_2 - e_3)$$

7. Рассчитать относительный показатель неравномерности прочности по длине нити ψ_d (%) по формуле:

$$\psi_d = \frac{\bar{P}_p(0) - \bar{P}_{p, \text{сн}}}{\bar{P}_{p, \text{сн}}} \cdot 100 = \frac{\Delta P_p}{\bar{P}_{p, \text{сн}}} \cdot 100$$

где $\bar{P}_{p, \text{сн}}$ – среднее значение разрывной нагрузки нити, определенное в соответствии с ГОСТ 6611.2–73.

8. Представить уравнение зависимости среднего значения разрывной нагрузки нити от её зажимной длины в следующем виде:

$$\bar{P}_p(L_0) = (\bar{P}_p(0) - \bar{P}_{p, \text{сн}}) \cdot \exp\left(-\frac{L_0}{K_L}\right) + \bar{P}_{p, \text{сн}}$$

Таким образом, в результате проведенных исследований, основанных на имитационном моделировании масштабного эффекта прочностных характеристик:

- произведено обоснование ряда дополнительных показателей характеризующих неравномерность прочности по длине текстильных нитей

- разработана методика их оценки по результатам кратковременных испытаний, позволяющая повысить информативность полувспышного испытания на растяжение.

1.5. Типовой расчёт показателей неравномерности прочности текстильных нитей.

1. При полувспышном испытании на растяжение полиэфирно-полиамидной пневмотекстурированной нити 30 текс. были получены следующие результаты:

$$\bar{P}_{p1}(L_1 = 0,1 \text{ м}) = 815,11 \text{ сН};$$

$$\bar{P}_{p2}(L_2 = 0,3 \text{ м}) = 750,19 \text{ сН};$$

$$\bar{P}_{p3}(L_3 = 0,5 \text{ м}) = 707,79 \text{ сН}.$$

2. Расчет темпа снижения разрывной нагрузки (соотношение (1.28)):

$$K_L = \frac{\Delta L}{\ln(\delta - 1)} = \frac{0,2}{\ln\left[\frac{815,11 - 707,19}{750,19 - 707,79} - 1\right]} = 0,47 \left[\frac{1}{\text{м}}\right]$$

3. Расчет средней разрывной нагрузки наиболее слабых звеньев на разных нитях партии образцов $\bar{P}_{pн}$ (соотношение (1.30)):

$$e_1 = \exp\left(-\frac{0,1}{0,47}\right) = 0,81; \quad e_2 = \exp\left(-\frac{0,3}{0,47}\right) = 0,53;$$

$$e_3 = \exp\left(-\frac{0,5}{0,47}\right) = 0,35;$$

$$\Delta P_1 = 815,11 - 707,79 = 107,32 \text{ [сН]};$$

$$\Delta P_2 = 750,19 - 707,79 = 42,4 \text{ [сН]};$$

$$\bar{P}_{p,сн} = \frac{1}{3} \left[(815,11 + 750,19 + 707,79) - \frac{1}{2} \left(\frac{107,32}{0,81 - 0,35} + \frac{42,4}{0,53 - 0,35} \right) \cdot (0,81 + 0,53 + 0,35) \right] = 627,96 \text{ [сН]}$$

4. Расчет средней разрывной нагрузки в партии образцов, зажимная длина которой стремится к 0 $\bar{P}_p(0)$ (соотношение (1.32));

$$\bar{P}_p(0) = \frac{1}{3} [815,11 + 750,19 + 707,79] + \frac{1}{6} \left(\frac{107,32}{0,81 - 0,35} + \frac{42,4}{0,53 - 0,35} \right) \cdot (3 - 0,81 - 0,53 - 0,35) = 859,54 \text{ [сН]}$$

5. Уравнение, зависимости среднего значения разрывной нагрузки от длины испытуемого образца нити (соотношение (1.25)) имеет вид:

$$\bar{P}_p(L_0) = (859,54 - 627,96) \cdot \exp\left(-\frac{L_0}{0,47}\right) + 627,96$$

6. Расчет относительного показателя неравномерности прочности ψ_d (%) (соотношение (1.26)):

$$\psi_d = \frac{859,54 - 627,96}{707,79} \times 100 = 32,72 \%$$

1.6. Экспериментальная оценка неравномерности прочностных характеристик текстильных нитей различного сырьевого состава

Целью проводимых исследований являлась проверка возможности применения разработанной методики для оценки показателей, характеризующих неравномерность прочности по длине текстильных нитей.

Разрывная нагрузка текстильных нитей определялась в соответствии с ГОСТ 6611.2–73 [4]. Диапазон изменения зажимной длины образца нити L составлял (0,1 – 0,5) м. Изменение зажимной длины производилось с шагом $\Delta L = 0,2$ м. Исследования проводились на разрывной машине РМ–3 в условиях центра сертификации и метрологии ВГТУ. При проведении исследований условия проведения испытаний оставались неизменными. Выделение промахов производилось на основе критериальной оценки [31, с.84].

Анализ масштабного эффекта прочности текстильных нитей различного сырьевого состава производился на основе предложенной методики, определяемой математическими моделями (1.27) – (1.32). Оценка относительного показателя неравномерности прочности нитей ψ_d производилась на основе применения модели (1.26).

Результаты экспериментальной оценки неравномерности прочности по длине текстильных нитей различного сырьевого состава сведены в табл.1.1. и представлены на рис.1.8–1.9.

Анализ результатов экспериментальной оценки показателей, характеризующих неравномерность прочности по длине текстильных нитей, позволяет сделать следующие выводы:

- относительный показатель неравномерности прочности ψ_d имеет минимальное значение для пряжи, полученной из химических волокон, обладающих высокими прочностными свойствами (пряжа из полиэфирных волокон), смешанной пряжи, в

состав которой входят такие волокна или хлопчатобумажная пряжа из тонковолокнистого хлопка;

- несколько более высокий относительный показатель неравномерности крученой хлопчатобумажной пряжи может быть объяснен неравномерностью крутки, которая более сильно проявляется на длинных отрезках;
- на величину показателя ψ_d , по всей вероятности, оказывает влияние система прядения, количество переходов при формировании ленты и ровницы (см. хлопчатобумажная пряжа T=50 текс, нитроновая пряжа T=100 текс);
- особенно выделяется абсолютная величина показателя ψ_d , полученная для шерстяной пряжи. Шерстяные волокна очень неравномерны по толщине. Кроме того, аппаратная пряжа, имеет значительную неровноту по толщине вдоль длины. Все это приводит к резкому и закономерному увеличению относительного показателя неравномерности прочности.

Таким образом, показатель ψ_d является характеристикой, чувствительной к изменениям волокнистого состава, способа переработки и структуры нитей.

Следует отметить, что методика оценки показателей неравномерности прочности по длине текстильных нитей по результатам полуциклового испытания на растяжения издана в виде отдельной брошюры [28] и получила положительное заключение Витебского центра стандартизации, метрологии и сертификации.

Авторы считают, что дальнейшие исследования масштабного эффекта прочности текстильных материалов будут направлены

- на установление взаимосвязи (с разработкой математических моделей) между показателями неравномерности прочности и вариативными характеристиками прочности текстильных нитей;
- на исследование влияния волокнистого состава, способа переработки и структуры текстильных нитей на относительный показатель неравномерности прочности;
- на исследование возможности использования относительного показателя неравномерности прочности ψ_d текстильных нитей по длине для оценки равномерности пряжи по прочности.

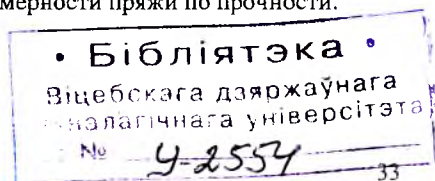


Таблица 1.1

Результаты экспериментальной оценки неравномерности прочности по длине текстильных нитей различного сырьевого состава

Вид нити	Темповой параметр модели K_L , м	Среднее значение разрывной нагрузки в партии образцов, зажимная длина которой стремится к 0, $\bar{P}_L(0)$, сН	Средняя разрывная нагрузка наиболее слабых звеньев на разных нитях партии образцов $\bar{P}_L$, сН	Относительный показатель неравномерности прочности ψ_L , %
Смешанная пряжа (лён 35% – полиэфир 65%) 100 текс	0,26	1565,60	1332,32	17,86
Нитроновая пряжа 100 текс	0,44	1637,03	1038,61	57,43
Хлопчатобумажная пряжа 29 текс	0,46	381,45	326,78	17,62
Хлопчатобумажная пряжа 50 текс	0,46	731,62	472,16	54,39
Смешанная пряжа (лён 50% – полиэфир 50%) 100 текс	0,60	1024,42	845,32	21,10
Хлопчатобумажная пряжа 25×2 текс	0,93	708,92	426,36	55,24
Смешанная пряжа (шерсть – полиэфир) 100 текс	0,14	773,03	598,81	29,99
Полиэфирная пряжа 100 текс	0,27	1686,31	1544,36	9,28
Шерстяная пряжа 240 текс	0,37	1629,98	784,36	113,66
Шерстяная пряжа 220 текс	1,91	1162,41	456,30	81,44

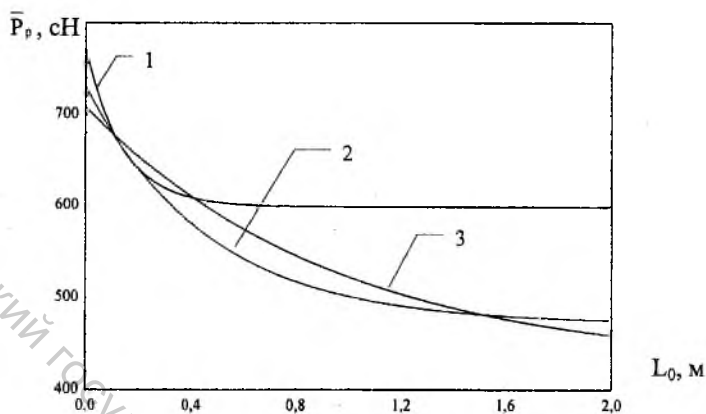


Рис. 1.8. Зависимость среднего значения разрывной нагрузки $\bar{P}_p$ от зажимной длины исследуемого образца нити

1– хлопчатобумажная пряжа 50 текс;

2– хлопчатобумажная пряжа 25х2 текс;

3– смешанная пряжа (шерсть – полиэфир) 100 текс

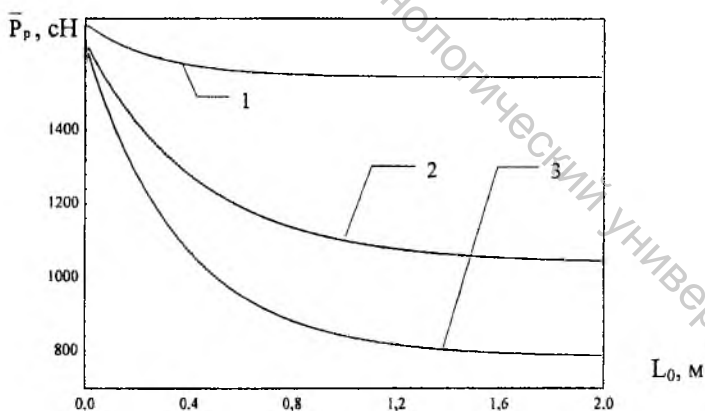


Рис. 1.9. Зависимость среднего значения разрывной нагрузки $\bar{P}_p$ от зажимной длины исследуемого образца нити

1– полиэфирная пряжа 100 текс;

2– нитроновая пряжа 100 текс;

3– шерстяная пряжа 240 текс

РЕЗЮМЕ

В результате проведенных исследований масштабного эффекта прочностных характеристик текстильных нитей методами имитационного моделирования:

1. разработана математическая модель влияния зажимной длины на разрывную нагрузку текстильных нитей различного сырьевого состава, отличительной особенностью которой является тот факт, что её параметры имеют строго определенный физический смысл;
2. обоснован ряд дополнительных показателей характеризующих неравномерность прочности по длине текстильных нитей и разработана методика их оценки по результатам кратковременных испытаний, позволяющая повысить информативность полуциклового испытания на растяжение;
3. произведена экспериментальная оценки показателей, характеризующих неравномерность прочности по длине текстильных нитей различного сырьевого состава. Установлено, что относительный показатель неравномерности прочности ψ_d является характеристикой, которая чувствительной к изменениям волокнистого состава, способа переработки и структуры нитей;

ГЛАВА II

ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТЕКСТИЛЬНЫХ НИТЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОЛУЦИКЛОВОГО ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Важнейшей характеристикой качества текстильных нитей и волокон при полуцикловых испытаниях на растяжение является кривая “удлинение – нагрузка” (в дальнейшем кривая растяжения). Кривая растяжения позволяет проводить анализ поведения текстильных волокон и нитей под действием непрерывно увеличивающегося с постоянной скоростью удлинения или силы [8–9, 32]. В зависимости от физико-механических свойств материала, при постоянных условиях проведения испытания, кривые “нагрузка – удлинение” могут иметь самую разнообразную форму [8–9, 11, 34–35].

Многие экспериментальные исследования механических показателей качества текстильных волокон и нитей основаны на математическом моделировании процесса растяжения. Так, например, для описания процесса растяжения нескрученных комплексных нитей или нитей с небольшой круткой Корицким К.И. была предложена математическая модель следующего вида [32]:

$$P_0 = A_0 + B_0 \cdot \epsilon, \quad (2.1)$$

где P_0 – относительная разрывная нагрузка нити;

ϵ – относительное удлинение;

A_0, B_0 – некоторые постоянные коэффициенты, характеризующие форму кривой растяжения волокон данного вида.

Проф. Кукиным Г.Н. и проф. Соловьевым А.Н. на основе анализа процесса растяжения различных наиболее распространенных видов волокон и нитей выделены 3 класса кривых растяжения, графически представленных на рис.2.1 [9].

Проф. А.Н. Соловьевым при выражении указанной зависимости для волокон и нитей использованы следующие математические модели [9]:

$$P = A \cdot l^k, \quad P = B \cdot \epsilon^k, \quad \sigma = C \cdot \epsilon^k, \quad (2.2)$$

где A, B, C, k – постоянные коэффициенты, зависящие от вида волокон и нитей и принятых характеристик.

При $k \gg 1$ модель (2.2) отвечает кривым 1-го типа, при $k < 1$ соотношение (2.2) соответствует кривым 2-го типа. Кривые 3-го типа разбиваются на

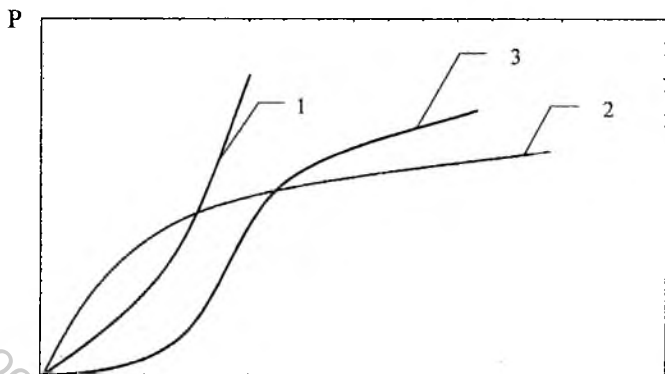


Рис.2.1. Типовые кривые растяжения волокон и нитей [9]

зоны (от 0 до 1 точки перегиба, от 1 до 2, и т.д.). Однако, проф. Соловьевым А.Н. отмечается сложность и затруднительность описания процесса растяжения, а также отсутствие физического обоснования постоянных коэффициентов.

В работе [33] исследование механических свойств высокообъемных эластичных нитей проводилось на основе применения математической модели кривой растяжения вида:

$$P = C \cdot l^{C_1}, \quad (2.3)$$

где C — постоянная модели, характеризующая упругие свойства нити;

l — абсолютное удлинение;

C_1 — постоянная, которая обычно колеблется в пределах 1,92-2,02.

В работе [34], учитывая формальное сходство форм кривых растяжения полимерных материалов и изотерм системы «реальный газ — жидкость», по аналогии с уравнением Ван-дер-Ваальса для идеальных газов, авторами было получено уравнение кривой растяжения следующего вида:

$$\sigma = c \cdot \epsilon \cdot \frac{1}{1 - b \cdot \epsilon} - a \cdot \epsilon^2, \quad (2.4)$$

где σ — напряжение, возникающее в полимерном материале при растяжении;

a, b, c — некоторые постоянные коэффициенты.

Наибольшее распространение математическое моделирование процесса растяжения, как метода исследования, получило при изучении деформационных свойств полимерных материалов [34]. Существующие математические модели кривой растяжения полимерных материалов подразделяются на одно-, двух- и трехпараметрические. Однако, применение математических моделей с большим количеством параметров нецелесообразно по причине трудоемкости математических расчетов при их определении.

Наиболее известной однопараметрической моделью является модель, основанная на классической статистической теории высокоэластичности при условии постоянства объема исследуемого образца [34], имеющая следующий вид:

$$\sigma = G \cdot \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right), \quad (2.5)$$

где G – модуль сдвига ($E=3 \cdot G$);

λ – кратность растяжения, определяемая следующим соотношением:

$$\lambda = \frac{L}{L_0} = \varepsilon + 1,$$

где L_0 – зажимная длина образца нити, регламентируемая соответствующими стандартами;

ε – относительное удлинение образца.

Однако, экспериментальные исследования, проведенные под руководством проф. Бартенева Г.М., указывают на ограниченность практического применения однопараметрических моделей по причине низкой сходимости результатов моделирования и экспериментальных данных [36–37] в области больших деформаций (свыше 15%).

Среди двухпараметрических математических моделей наибольшее распространение при анализе процесса растяжения полимерных материалов получили [34]:

– модель Гатчика и Ариано:

$$\sigma = \frac{\varepsilon \cdot b}{a - \varepsilon}, \quad (2.6)$$

где a , b – параметры модели, определяемые структурными особенностями материала;

– уравнение Муни – Ривлина:

$$\sigma = C_1 \cdot \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right) + C_2 \cdot \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right); \quad (2.7)$$

– уравнение Мартина - Рота – Стилера:

$$\sigma = D_1 \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda} \right) \cdot \exp \left[D \cdot \left(\lambda - \frac{1}{\lambda} \right) \right]; \quad (2.8)$$

где C_1 , C_2 , D_1 и D_2 – параметры модели.

Среди трехпараметрических моделей следует отметить уравнение Загорского:

$$\sigma = A \cdot (\lambda^4 - 1) + B \cdot (\lambda^2 - 1) + C \cdot (\lambda - 1) \quad (2.9)$$

и математическую модель следующего вида:

$$\sigma = (A + B \cdot \lambda^{-1} + C \cdot \lambda^2) \cdot (\lambda - \lambda^{-2}), \quad (2.10)$$

где A , B , C – экспериментально определяемые параметры материала.

К общим недостаткам рассматриваемых математических моделей следует отнести тот факт, что предлагаемые математические модели для описания кривых растяжения достоверно описывают экспериментальные данные только в конкретных случаях (постоянных видах волокон и нитей, условий проведения испытаний и т. д.). Таким образом, в качестве недостатка математического моделирования следует отнести отсутствие универсальной математической модели, способной описать процесс растяжения практически любых видов волокон и нитей. Анализ вышеперечисленных математических моделей процесса растяжения (2.1) – (2.10) позволяет отметить, что отдельные параметры моделей, происхождение которых неизвестно, являются некоторыми абстрактными коэффициентами влияния и не имеют явно выраженного физического смысла. Кроме того, при математическом моделировании совершенно не учитывается явление упрочнения текстильных волокон и нитей при растяжении.

Другим экспериментальным подходом к построению математических моделей оценки и прогнозирования механических свойств текстильных материалов является многофакторный регрессионный анализ. Например, в работе [38] прогнозирование относительной разрывной нагрузки хлопчатобумажной пряжи осуществлялось на основе проведения эксперимента с построением многофакторной регрессионной модели первого по-

рядка. В качестве параметров, характеризующих свойства волокна, были выбраны следующие средневзвешенные показатели: линейная плотность, зрелость, штапельная массодлина, содержание в волокне пороков и сорных примесей и относительная разрывная нагрузка одиночного волокна. Проведен анализ фактической разрывной нагрузки пряжи по результатам, полученным по формуле Соловьева А.Н., и разработанной регрессионной модели. Отмечена высокая сходимость фактических значений относительной разрывной нагрузки хлопчатобумажной пряжи, полученной различными способами прядения и значений, полученных в результате проведенного моделирования.

В работе [39] произведены экспериментальные исследования влияния первичной и вторичной крутки шерстяной пряжи, а также процентного содержания шерсти на полуцикловые характеристики при растяжении: разрывную нагрузку, относительную разрывную нагрузку и относительное разрывное удлинение. Исследования проводились на основе проведения эксперимента с построением регрессионной модели второго порядка. Установлено, что с повышением процентного содержания лавсанового волокна и вторичной крутки возрастает прочность пряжи во всем диапазоне исследования. Влияние первичной крутки ощутимо при низких значениях вторичной крутки.

В работе [40] проведены исследования зависимости разрывной нагрузки хлопкоэластиковой пряжи от линейной плотности, относительной разрывной нагрузки волокон покрытия и скорости выпуска. Результатом экспериментальных исследований явилось построение регрессионной модели второго порядка с парными взаимодействиями. Полученные уравнения могут служить для прогнозирования значения разрывной нагрузки хлопкоэластиковых комбинированных нитей. Отмечается, что такое прогнозирование позволяет без предварительного эксперимента выбрать оптимальный тип перерабатывающего оборудования.

В работе [41] прогнозирование прочности при испытании пряжи пасмой осуществлялось на основе оценки свойств исходных хлопковых волокон. На основании полученных значений штапельной массодлины, индекса равномерности, линейной плотности, прочности и содержания сорных примесей получены регрессионные уравнения для определения прочности при испытании пряжи пасмой. Полученные с использованием этих уравнений значения прочности пряж оказались очень близки к действительным значениям прочности пряжи в диапазоне линейной плотности 7,4-29,5 текс.

В работе [42] приведены результаты измерения разрывной нагрузки образцов одиночных полиэфирных, вискозных, ацетатных, акриловых и

полипропиленовых нитей с использованием разрывной машины фирмы Zwick (Германия) и разрывной нагрузки пучков этих же нитей с использованием прибора Stelometer (Германия). Регрессионный анализ результатов измерения разрывных нагрузки и удлинения показал наличие взаимосвязи между характеристиками, определенными при испытаниях одиночной нити и пучков нитей. Разрывная нагрузка, полученная при испытании пучков нитей, тесно коррелирована с аналогичным показателем, полученным при разрыве одиночных нитей. Корреляция между удлинением, полученным при испытаниях одиночных нитей и пучков нитей, была слабой.

Исследования, посвященные оценке и прогнозированию свойств нитей новых способов формирования [43–44], также основываются на построении математических регрессионных моделей. Однако, несмотря на высокую сходимость результатов проведения испытаний нитей, и данных, рассчитанных на основе применения регрессионных моделей, следует отметить ряд существенных недостатков данного подхода в построении моделей. Уравнения регрессии в большинстве случаев имеют вид полинома, физический смысл параметров которого неизвестен. Ограничения, накладываемые на факторы при построении моделей данного вида [14, 45–46], значительные временные и материальные затраты при построении, а также низкая универсальность и гибкость (при изменении вида перерабатываемого сырья, условий протекания технологического процесса применение математических моделей регрессионного вида приводит к ошибочным результатам) объясняют низкую эффективность данного подхода при прогнозировании механических свойств текстильных нитей и волокон.

Согласно стандарту [9], разрывную нагрузку и удлинение при разрыве химических волокон определяют испытанием одиночных волокон на разрывных машинах, а разрывная нагрузка хлопкового волокна определяется испытанием на разрыв специально подготовленных пучков волокон. При этом разрывная нагрузка в пересчете на одно волокно определяется следующим соотношением [9]:

$$\bar{P}_p = K \cdot \frac{Q_p}{N_b}, \quad (2.11)$$

где $\bar{P}_p$ – средняя разрывная нагрузка одного волокна;

Q_p – разрывная нагрузка пучка волокон;

N_b – количество волокон в пучке;

K – коэффициент, учитывающий снижение суммарной нагрузки Q_p , вследствие неодновременного разрушения волокон.

В некоторых случаях рекомендуется определять разрывную нагрузку нитей путём одновременного растяжения пучка нитей [3, 8–9]. В таких случаях:

$$\bar{P}_p = K_1 \cdot \frac{Q_p}{N_n}, \quad (2.12)$$

где $\bar{P}_p$ – средняя разрывная нагрузка, приходящаяся на одну нить;

Q_p – разрывная нагрузка пучка нитей;

N_n – количество нитей в групповом образце;

K_1 – коэффициент, учитывающий снижение суммарной нагрузки Q'_p , вследствие неодновременного разрушения нитей;

Однако, анализ данных работ не позволяет объяснить причину неодновременности разрушения волокон и нитей при испытании пучком. В моделях (2.11), (2.12) не учитывается влияние продольной и поперечной гетерогенности механических свойств и строения текстильных нитей и волокон.

На основе экспериментальных исследований прочности пучка параллельно расположенных полиэфирных и вискозных нитей в работе [47] получена механическая модель пучка параллельно расположенных нитей и уравнение кривой “нагрузка-удлинение” для пучка нитей. Установлено, что кривая “нагрузка-удлинение” для пучка разнородных параллельных нитей представляет собой совмещение соответствующих кривых для отдельных компонентов пучка.

В работе [48] предлагается математическая эмпирическая модель, с помощью которой можно прогнозировать разрывную нагрузку и момент раскручивания пряжи при определенном натяжении. При этом отмечается, что многие параметры волокон и пряжи, используемые при моделировании, должны определяться с высокой точностью. В результате проведенных исследований установлено, что, кроме модуля продольной упругости, остальные характеристики материала не оказывают существенного влияния на получаемые результаты. Однако, анализ работ [10–11, 24, 49] указывает, что данное утверждение не всегда справедливо по причине того, что необходимо учитывать особенности строения и неравномерность механических свойств волокон и нитей.

Следовательно, несмотря на большое количество работ, посвященных вопросам оценки и прогнозирования показателей качества, характеризующих механические свойства текстильных материалов, проблема снижения временных затрат на проведение испытаний и обеспечения досто-

верности оценки и прогнозирования механических свойств текстильных материалов до настоящего времени остается не разрешенной.

2.1. Математическая модель процесса растяжения текстильных материалов

Как уже отмечалось выше, одной из важнейших характеристик качества текстильных нитей и волокон при полуцикловых испытаниях на растяжение является кривая «удлинение-нагрузка» или кривая растяжения. Как было сказано выше, кривая растяжения позволяет проводить анализ поведения волокон и нитей под действием непрерывно увеличивающегося с постоянной скоростью удлинения или нагрузки. [8–9, 35, 51]. На рис.2.2.–2.4. [8, 35] представлены экспериментальные кривые растяжения для различных типов текстильных волокон и нитей.

Как следует из рисунков, в зависимости от физико-механических свойств материала, при постоянных условиях проведения испытания, они могут иметь самую разнообразную форму.

P_0 , сН/текс

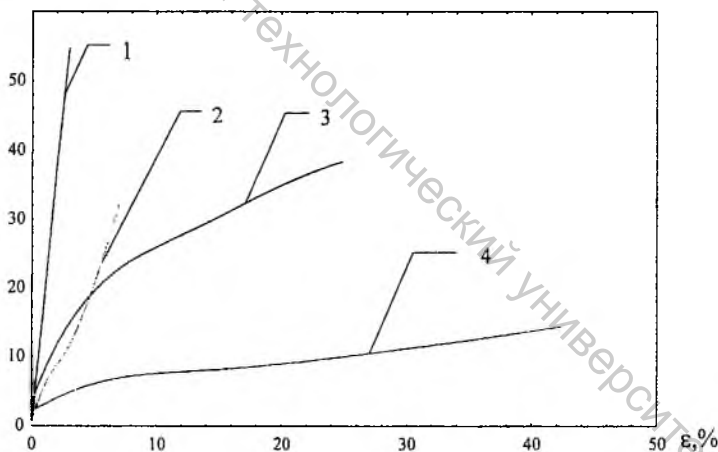


Рис. 2.2. Кривые растяжения для различных волокон [35], испытанных при относительной влажности воздуха 65%, температуре 20 °С и скорости нарастания нагрузки 1.5 сН/(текс·сек). (1-лен, 2-хлопок, 3-шелк, 4-шерсть)

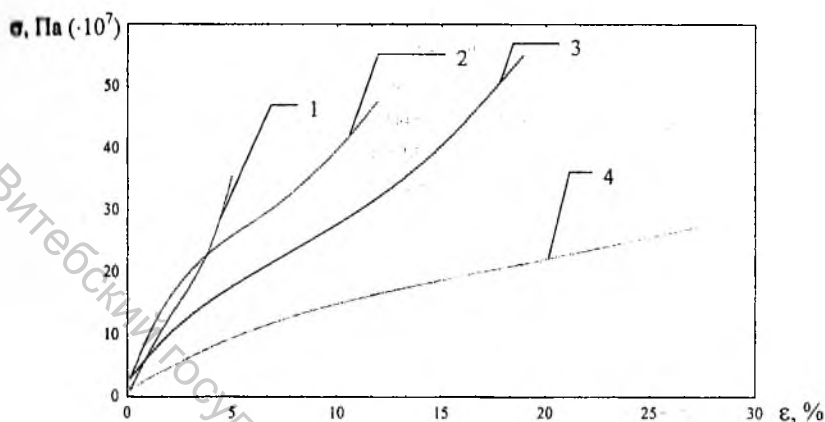


Рис.2.3. Экспериментальные кривые растяжения для различных волокон [8]: 1 – хлопковое; 2 – вискозное упрочненное (э.н.); 3 – нитроновое; 4 – ацетатное (э.н.);

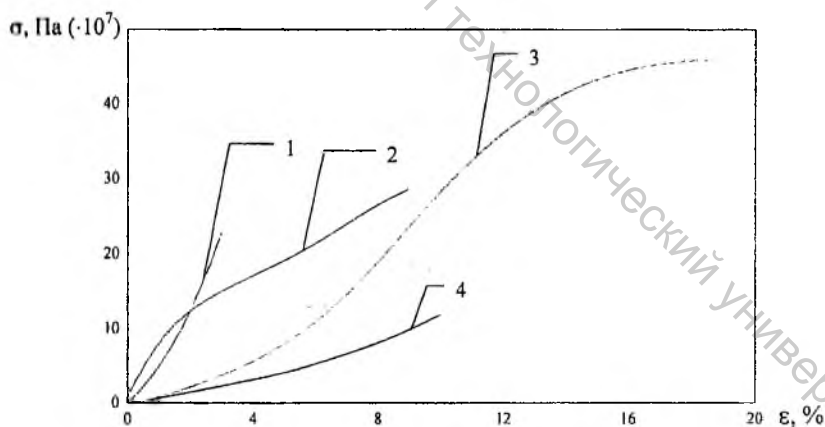


Рис.2.4. Экспериментальные кривые растяжения текстильных нитей [8]: 1-льняная пряжа сухого прядения $T=70$ текс; 2-вискозная упрочненная нить $T=9$ текс; 3-капроновая комплексная нить $T=5$ текс; 4-вискозная пряжа $T=25$ текс

Многие исследования свойств текстильных нитей (волокон) основаны на математическом моделировании процесса растяжения. Однако, данные исследования имеют существенные недостатки, которые отмечены выше. С целью исключения вышеизложенных недостатков, повышения информативности разрушающих полуцикловых испытаний на растяжение и на основе анализа многообразия форм кривых, приведенных на рис.2.2.-2.4., для описания кривых растяжения в координатах «напряжение σ - относительное удлинение ε » предлагается универсальная математическая модель, следующего вида:

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{b_0 + b_1 \cdot \varepsilon} + b_2 \cdot \varepsilon^2, \quad (2.13)$$

где σ – напряжение, возникающее при растяжении волокна (нити), Па;

ε – относительное удлинение, %,

b_0, b_1, b_2 – некоторые параметры модели.

Физический смысл параметров b_0, b_1 , и b_2 определяется из следующих соображений. Тангенс угла α касательной к кривой растяжения (рис.2.5) в начале координат характеризует упругие свойства нити.

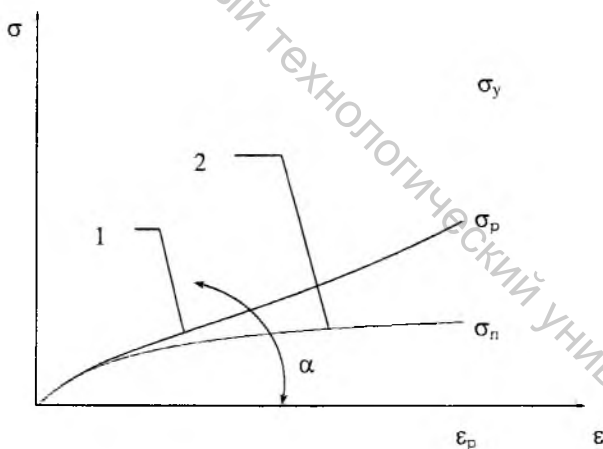


Рис.2.5. Схематическое представление кривой растяжения: 1-реальная кривая «напряжение – относительное удлинение»; 2-условная кривая для абсолютно неупругой нити

С одной стороны, для нахождения тангенса угла α касательной к кривой растяжения продифференцируем выражение (2.13) по ε и устремим ε к нулю:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{1}{b_0 + b_1 \cdot \varepsilon} - \frac{b_1 \cdot \varepsilon}{(b_0 + b_1 \cdot \varepsilon)^2} + 2 \cdot b_2 \cdot \varepsilon,$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{b_0}. \quad (2.14)$$

С другой стороны, из геометрических соображений (рис.2.5) можно записать:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_p},$$

где σ_y - условный предел упругости или напряжение, при котором произошло бы разрушение абсолютно упругой нити, Па;

ε_p - относительное разрывное удлинение, %.

Следовательно:

$$b_0 = \frac{\varepsilon_p}{\sigma_y} = \frac{1}{E_y}, \quad (2.15)$$

где E_y - условный модуль упругости, Па.

Таким образом, параметр b_0 модели (2.13) имеет размерность $[(\text{Па})^{-1}]$ и характеризует упругие свойства волокна (нити) при растяжении.

В модели (2.13) параметр b_2 характеризует упрочняющие свойства нити при растяжении. Если бы нить растягивалась без упрочнения, то параметр b_2 следовало бы принять равным 0 (рис.2.5, кривая 2), а разрушение нити происходило бы при напряжении σ_n , которое можно назвать условным пределом пластичности.

Тогда

$$\sigma_n = \frac{\varepsilon_p}{b_0 + b_1 \cdot \varepsilon_p}. \quad (2.16)$$

При подстановке выражения (2.15) в (2.16) появляется возможность определения параметра b_1 :

$$\sigma_n = \frac{\varepsilon_p}{\frac{\varepsilon_p}{\sigma_y} + b_1 \cdot \varepsilon_p},$$

$$b_1 = \frac{1}{\sigma_n} - \frac{1}{\sigma_y}. \quad (2.17)$$

Следовательно, параметр b_1 модели (2.13) имеет размерность, аналогичную параметру b_0 и характеризует пластические свойства волокна (нити) при растяжении.

Если подставить в модель (2.13) значение ε_p , значения параметров b_0 и b_1 , согласно выражениям (2.15) и (2.17), то параметр b_2 определяется следующим соотношением:

$$b_2 = \frac{\sigma_p - \sigma_n}{\varepsilon_p^2} = \frac{\Delta\sigma_{упр}}{\varepsilon_p^2}, \quad (2.18)$$

где $\Delta\sigma_{упр}$ - условный предел упрочнения волокна (нити), Па.

Довольно часто результаты растяжения волокон и нитей отражают в координатах «относительная нагрузка P_0 – относительное удлинение ε ». В данном случае P_0 определяется следующим выражением:

$$P_0 = \frac{P}{T},$$

где P – значение растягивающей силы, Н;

T – линейная плотность, текс.

Тогда математическая модель (2.13) примет следующий вид:

$$P_0 = \frac{\varepsilon}{a_0 + a_1 \cdot \varepsilon} + a_2 \cdot \varepsilon^2. \quad (2.19)$$

Учитывая, что $P_0 = \sigma/\gamma$, где γ – плотность материала волокна или нити (кг/м^3), получим

$$a_0 = b_0 \gamma; \quad a_1 = b_1 \gamma; \quad a_2 = b_2 / \gamma. \quad (2.20)$$

Так как элементарная работа растяжения $dA_p = Pdl$, а вся работа, совершенная внешней силой по деформированию и разрушению нити A_p :

$$A_p = \int_0^{l_p} P dl = \int_0^{l_p} f(l) dl,$$

Эта модель (2.19) позволяет также определить условную работу разрушения волокна (нити) A :

$$A = \int_0^{l_p} P dl = \frac{1}{C_1^2} \cdot \left[C_1 \cdot l_p - C_0 \cdot \ln \left(1 + \frac{C_1}{C_0} \cdot l_p \right) \right] + \frac{C_2}{3} \cdot l_p^3, \quad (2.21)$$

где l_p – абсолютное разрывное удлинение, м;

C_0 , C_1 , C_2 – параметры модели, которые зависят от физико-механических свойств материала и условий проведения испытания, и определяются следующим образом:

$$C_0 = \frac{a_0 \cdot L_0}{100 \cdot T}; \quad C_1 = \frac{a_1}{T}; \quad C_2 = \frac{10^4 \cdot T \cdot a_2}{L_0^2}, \quad (2.22)$$

где L_0 – изжимная длина образца, м.

Можно отметить, что координатами точки разрыва на диаграмме являются разрывная нагрузка нити P_p и абсолютное разрывное удлинение l_p . Произведение этих величин представляет некоторую условную работу A_y [9], которая была бы совершена, если бы в течении всего процесса деформирования нити действовала сила, равная разрывной нагрузке: $A_y = P_p \cdot l_p$. Следовательно, предлагаемая математическая модель позволяет произвести оценку коэффициента полноты диаграммы растяжения η [9]:

$$\eta = \frac{A_p}{A_y} = \frac{1}{C_1^2} \cdot \left[\frac{C_1}{P_p} - \frac{C_0}{P_p \cdot l_p} \cdot \ln \left(1 + \frac{C_1}{C_0} \cdot l_p \right) \right] + \frac{C_2}{3 \cdot P_p} \cdot l_p^2. \quad (2.23)$$

На рис.2.6. представлены зависимости, построенные на основе математической модели (2.13). Как следует из рис.2.6, в зависимости от параметров b_0 , b_1 , b_2 , которые характеризуют упругие, пластические и упрочняющие свойства нитей (волокон), кривые растяжения могут принимать самые разнообразные формы, и, как следствие, модель (2.13) способна описать процесс растяжения практически любых видов текстильных нитей и волокон.

Таким образом, предложенные математические модели (2.13), (2.19), (2.21) и (2.23) являются универсальными и повышают информативность полуциклового испытания на растяжение. Но для практического использо-

вания выше предложенных моделей возникает необходимость в определении параметров модели.

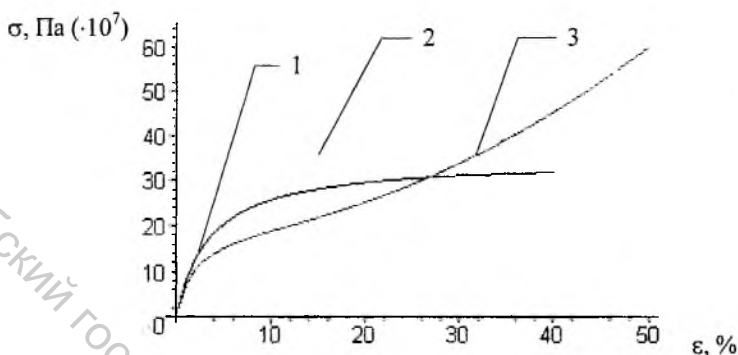


Рис.2.6. Кривые растяжения, построенные по модели (2.13) при следующих параметрах: 1— $b_0=0,1 \text{ Па}^{-1}$, $b_1=0,03 \text{ Па}^{-1}$, $b_2=0 \text{ Па}$; 2— $b_0=0 \text{ Па}^{-1}$, $b_1=0 \text{ Па}^{-1}$, $b_2=0,16 \text{ Па}$; 3— $b_0=0,1 \text{ Па}^{-1}$, $b_1=0,05 \text{ Па}^{-1}$, $b_2=0,016 \text{ Па}$.

Вследствие того, что известные методы определения параметров модели типа (2.13) непригодны (численные значения параметров лежат вне области действительных чисел), возникает необходимость в разработке комплексной методики оценки параметров математической модели растяжения волокон (нитей) экспрессным методом.

2.2. Методика оценки параметров математической модели процесса растяжения по результатам полуволнового испытания на растяжение

Параметры математических моделей (2.13), (2.19), (2.21) и (2.23), необходимые для практического использования этих зависимостей, предлагается определять по результатам кратковременных испытаний. При использовании разрывной машины РМ-3, совмещенной с ПЭВМ (РМ-АВТО), появляется возможность получения массива координат кривой растяжения $[P_i, \epsilon_i]$ $i=1...n$, где n — размер полученного массива кривой растяжения.

На основе постоянства объема испытываемого образца волокна или нити значение напряжения σ_i , возникающее при растяжении, определяется следующим соотношением:

$$\sigma_i = \frac{P_i \cdot (1 + \varepsilon_i)}{\pi \cdot R_0^2}, \quad (2.24)$$

где P_i – текущее значение растягивающей силы, Н;

R_0 – начальное значение среднего радиуса испытываемого волокна или нити, м.

Как отмечалось в п.2.1., известные методы определения параметров не пригодны для модели типа (2.13). Вследствие этого, предлагается комбинированная методика оценки параметров математических моделей (2.13), (2.19), (2.21) и (2.23) получившая название метода движения к оптимуму с постепенно уменьшающимся шагом. Схема алгоритма методики оценки параметров математической модели представлена на рис.2.7. Методика состоит из целого ряда формализованных шагов.

Модель (2.1) преобразуется к линейному виду:

$$Z_i = b_0 + b_1 \cdot \varepsilon_i, \quad (2.25)$$

где

$$Z_i = \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i - b_2 \cdot \varepsilon_i^2}. \quad (2.26)$$

На начальном этапе ($j=0$) предполагается, что параметр $b_{2(0)}=0$. Следовательно, на основе соотношения (2.26), появляется возможность определения величины Z_i на начальном этапе $Z_{i(j)}$.

Далее, на основе метода наименьших квадратов определяются значения параметров $b_{0(j)}$ и $b_{1(j)}$:

$$b_{0j} = \frac{C_j \cdot B - A \cdot D_j}{n \cdot B - A^2}, \quad (2.27)$$

$$b_{1j} = \frac{n \cdot D_j - A \cdot C_j}{n \cdot B - A^2}, \quad (2.28)$$

где величины A , B , C_j , D_j определяются на основе следующих соотношений:

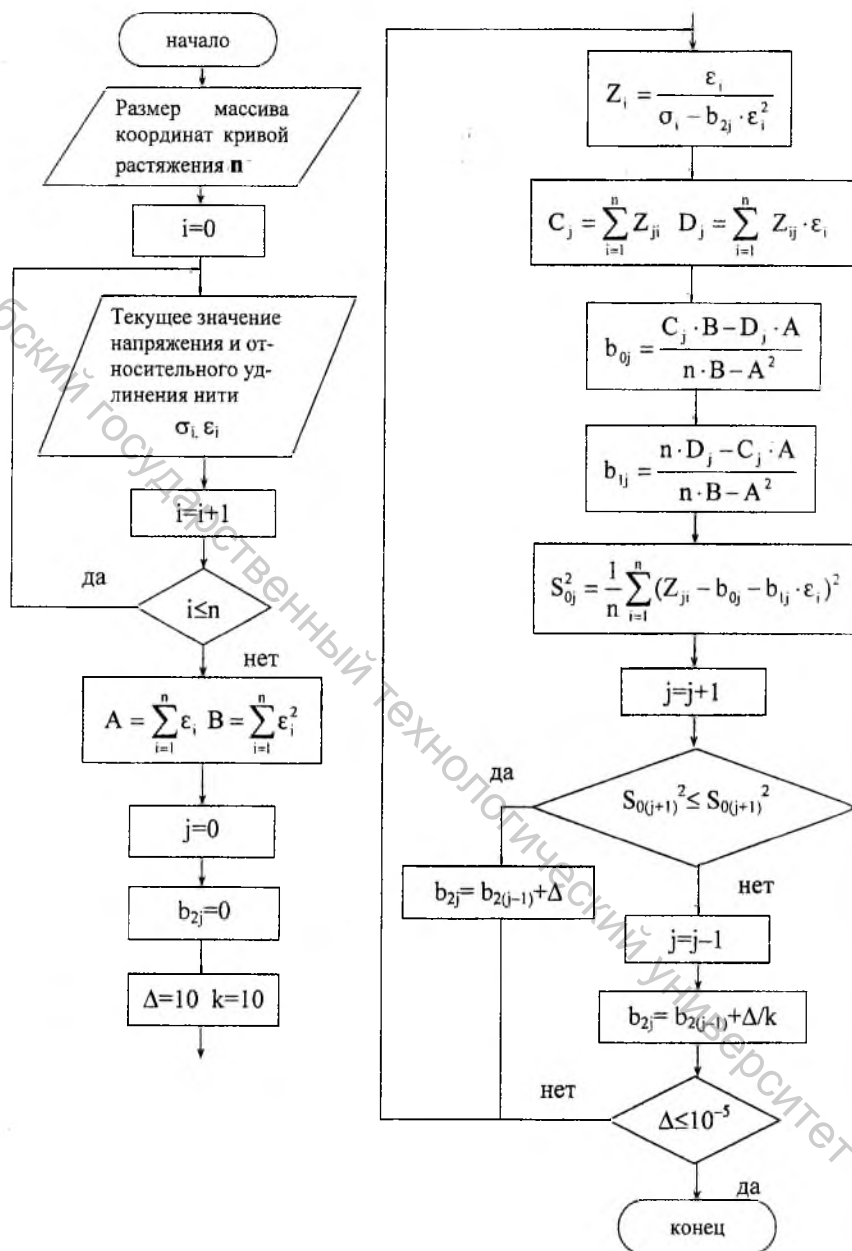


Рис.2.7. Схема алгоритма методики оценки параметров математической модели (2.13) по результатам полуциклового испытания на растяжение

$$A = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i; \quad B = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2; \quad C_i = \sum_{i=1}^n Z_{ij}; \quad D_j = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \cdot Z_{ij}. \quad (2.29)$$

На каждом шаге оценки параметров определяется величина остаточной дисперсии $S_{0(j)}^2$:

$$S_{0(j)}^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (Z_{ij} - b_{0(j)} - b_{1(j)} \cdot \varepsilon_i)^2. \quad (2.30)$$

Далее, создавая приращение значению $b_{2(j+1)}$ по закону:

$$b_{2(j+1)} = b_{2(j)} + \Delta$$

где Δ -задаваемый шаг приращения, происходит повторение операций (2.25)–(2.30). Цикл увеличения значений b_2 продолжается до тех пор, пока остаточная дисперсия будет уменьшаться ($S_{0(j+1)}^2 < S_{0(j)}^2$). По достижении минимума остаточной дисперсии ($S_{0(j+1)}^2 > S_{0(j)}^2$) выполняется шаг назад, и поиск продолжается с шагом в k раз меньшим ($\Delta = \Delta/k$). Критерием окончания поиска является уменьшение шага до заранее достаточно малого заданного значения (например, $\Delta < 10^{-5}$).

2.3. Оценка показателей деформационных свойств текстильных материалов по результатам полуциклового испытания на растяжение

Известно, что механические свойства текстильных волокон и нитей должны обеспечить возможность их переработки и дальнейшего использования в определенных условиях. Оценка комплекса показателей механических свойств текстильных материалов решается на основе проведения испытаний по растяжению текстильных материалов. Известно, что на результат испытаний по оценке механических свойств текстильных материалов наряду с молекулярной структурой, условиями получения исследуемого волокна или нити, существенное влияние оказывают условия проведения испытаний. При испытании на растяжение текстильных волокон и нитей к ним обычно относят: температуру окружающей среды, относительную влажность воздуха, зажимную длину, скорость растяжения образца и способ нагрузки на образец. Вследствие этого, для проведения экспериментальных исследований по комплексному анализу механических свойств нитей (волокон), условия проведения испытаний должны быть неизменными.

Комплексный анализ механических свойств текстильных волокон и нитей основан на математическом описании процесса растяжения. При этом были поставлены следующие задачи:

- на основе проведения экспериментальных исследований оценить возможности использования и достоверность математической модели (2.13) для математического описания процесса растяжения текстильных волокон и нитей;
- на основании применения универсальной математической модели провести комплексный анализ механических свойств текстильных волокон и нитей.

Комплексный анализ механических свойств подразумевает определение показателей, характеризующих не только стандартные свойства (напряжение при разрыве σ_p , относительное разрывное удлинение ε_p) текстильных нитей и волокон, но также и деформационные. При этом деформационные свойства предлагается оценивать по ряду условных косвенных показателей. В качестве данных параметров выступают условные пределы упругости σ_y , пластичности σ_n и упрочнения $\Delta\sigma_{упр}$.

Проведенный анализ экспериментальных кривых растяжения текстильных волокон и нитей [8, 35], представленных на рис.2.2–2.4, позволяет сформировать двумерный массив координат кривой растяжения для каждого вида волокна $[\sigma_i, \varepsilon_i]$ $i=1...n$, где n – размер полученного массива кривой растяжения. При этом, шаг изменения относительного удлинения $\Delta\varepsilon=\varepsilon_{i+1}-\varepsilon_i$ составлял 1%. Массивы координат кривых растяжения в осях «напряжение – относительное удлинение» для различных типов текстильных волокон и нитей представлен в табл.П.1.1–П.1.4 приложения.

Параметры b_0 , b_1 , b_2 математической модели (2.13) вычислялись на основе применения соответствующей методики, разработанной в п.2.2 и определяемой выражениями (2.24 – 2.30). Критерием окончания поиска параметров служило уменьшение шага приращения Δ до значения 10^{-3} МПа. Результаты математической обработки экспериментальных данных кривых растяжения для различных типов текстильных волокон и нитей представлены в табл. 2.1.–2.2. Среднее значение остаточной дисперсии S_0^2 незначительно, следовательно, можно утверждать о достоверности математической модели (2.13) при описании процесса растяжения текстильных волокон.

На рис. 2.8–2.19 сопоставлены наиболее характерные экспериментальные и теоретические кривые растяжения в координатах «напряжение σ – относительное удлинение ε » для различных видов текстильных волокон и нитей, построенные на основе применения универсальной математической модели (2.13).

Таблица 2.1

Результаты математического моделирования процесса растяжения текстильных волокон

Вид волокна	Параметры математической модели (2.13)			Среднее значение остаточной дисперсии S_0^2
	$b_0, \text{Па}^{-1}, (\cdot 10^{-7})$	$b_1, \text{Па}^{-1}, (\cdot 10^{-7})$	$b_2, \text{Па}, (\cdot 10^7)$	
1. Хлопковое волокно	0.171	-0.004	0	$8.7 \cdot 10^{-5}$
2. Льняное волокно	0.086	-0.016	0.1	$0.21 \cdot 10^{-5}$
3. Тонкая шерсть	0.177	0.079	0.004	$2.6 \cdot 10^{-4}$
4. Шелк (коконная нить)	0.115	0.024	0.021	$1.7 \cdot 10^{-4}$
5. Вискозное обыкновенное волокно	0.356	0.013	0.001	$2.1 \cdot 10^{-4}$
6. Вискозное упрочненное волокно	0.045	0.038	0.165	$0.9 \cdot 10^{-5}$
7. Ацетатное волокно	0.246	0.034	0.001	$2.1 \cdot 10^{-5}$
8. Лавсановое волокно	0.122	0.014	0.013	$2.4 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2.2

Результаты математического моделирования процесса растяжения текстильных нитей

Вид нити	Параметры математической модели (2.13)			Среднее значение остаточной дисперсии S_0^2
	$b_0, \text{Па}^{-1}, (\cdot 10^{-7})$	$b_1, \text{Па}^{-1}, (\cdot 10^{-7})$	$b_2, \text{Па}, (\cdot 10^7)$	
1. Хлопчатобумажная кардная пряжа T=25 текс.	0.9	-0.079	0.0014	$3.25 \cdot 10^{-4}$
2. Льняная пряжа сухого прядения T=70 текс.	0.157	-0.0086	0.0014	$2.96 \cdot 10^{-4}$
3. Шерстяная гребенная пряжа T=40 текс.	0.277	0.108	0.001	$1.99 \cdot 10^{-4}$
4. Шелк сырец T=2.5 текс.	0.046	0.024	0.013	$1.37 \cdot 10^{-5}$
5. Вискозная обыкновенная комплексная нить T=25 текс.	0.106	0.05	0.001	$4.2 \cdot 10^{-5}$
6. Вискозная упрочненная комплексная нить T=9 текс.	0.048	0.062	0.189	$2.01 \cdot 10^{-4}$
7. Ацетатная комплексная нить T=11 текс	0.2	0.102	0.001	$3.17 \cdot 10^{-4}$
8. Полиэфирная комплексная нить T=22 текс.	0.034	0.158	0.013	$2.28 \cdot 10^{-5}$

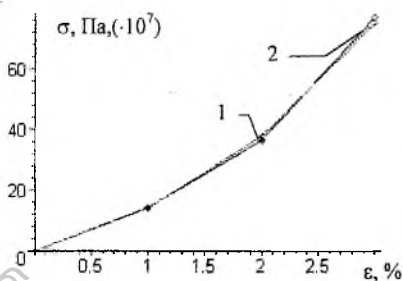


Рис.2.8. Кривые растяжения для льняных волокон. (1-экспериментальная, 2-построенная на основе модели (2.13))

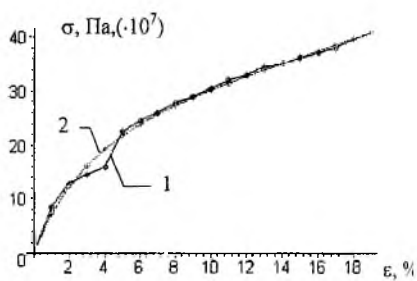


Рис.2.9. Кривые растяжения для шёлка. (1-экспериментальная, 2-построенная на основе модели (2.13))

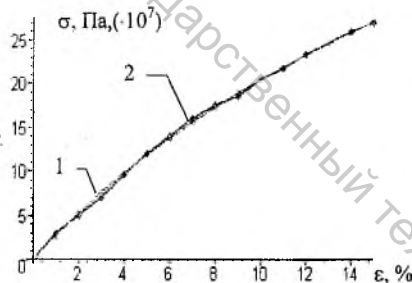


Рис.2.10. Кривые растяжения для вязкозных волокон. (1-экспериментальная, 2-построенная на основе модели (2.13))

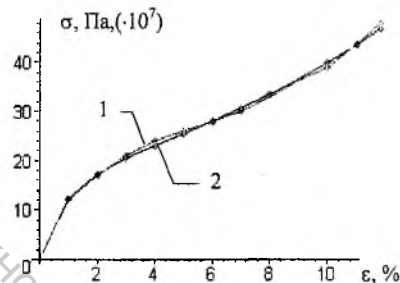


Рис.2.11. Кривые растяжения для вязкозных упрочненных волокон. (1-экспериментальная, 2-построенная на основе модели (2.13))

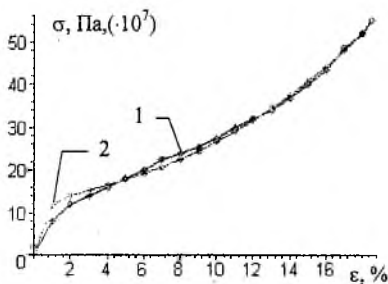


Рис.2.12. Кривые растяжения для нитроновых волокон. (1-экспериментальная, 2-построенная на основе модели (2.13))

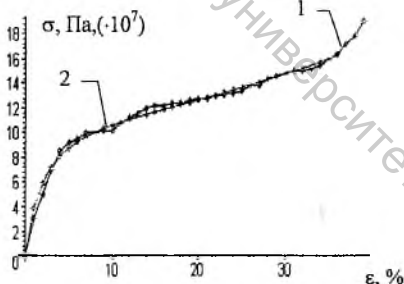


Рис.2.13. Кривые растяжения для тонкой шерсти. (1-экспериментальная, 2-построенная на основе модели (2.13))

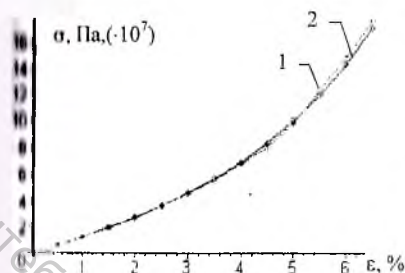


Рис. 2.14. Кривые растяжения для хлопчатобумажной кардной пряжи $T=25$ текс (1-экспериментальная, 2-построенная на основе модели (2.13))

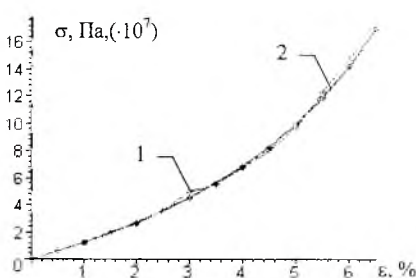


Рис. 2.15. Кривые растяжения для льняной пряжи сухого прядения $T=70$ текс (1-экспериментальная, 2-построенная на основе модели (2.13))

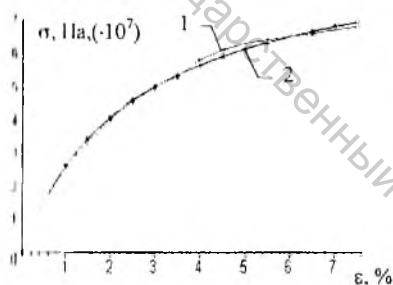


Рис. 2.16. Кривые растяжения для шерстяной гребенной пряжи $T=40$ текс (1-экспериментальная, 2-построенная на основе модели (2.13))

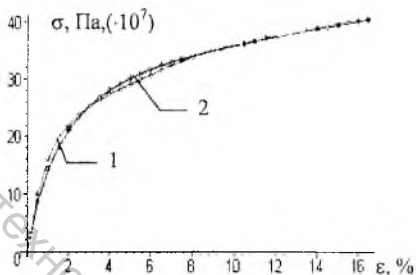


Рис. 2.17. Кривые растяжения для шёлка сырца $T=2,5$ текс (1-экспериментальная, 2-построенная на основе модели (2.13))

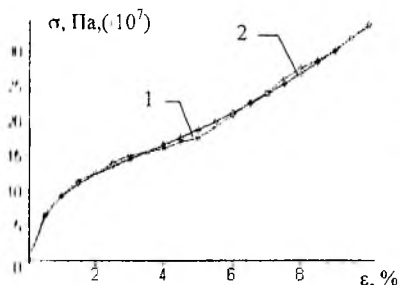


Рис. 2.18. Кривые растяжения для вискозной упрочненной комплексной нити $T=9$ текс (1-экспериментальная, 2-построенная на основе модели (2.13))

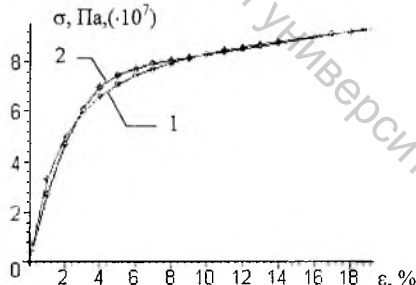


Рис. 2.19. Кривые растяжения для ацетатной комплексной нити $T=11$ текс (1-экспериментальная, 2-построенная на основе модели (2.13))

Графическая интерпретация полученных результатов наглядно свидетельствует об универсальности предложенной математической модели для описания процесса растяжения практически любых типов текстильных материалов.

Стандартные показатели, характеризующие прочностные свойства текстильных волокон и нитей (напряжение при разрыве σ_p , относительное разрывное удлинение ε_p), оценивались на основе анализа кривой растяжения и определения точки разрыва на данной кривой.

Условные косвенные показатели, несущие информацию о деформационных свойствах текстильных нитей и волокон, определялись на основе следующих соотношений:

$$\sigma_y = \frac{1}{b_0} \cdot \varepsilon_p; \sigma_n = \frac{\varepsilon_p}{b_0 + b_1 \cdot \varepsilon_p}; \Delta\sigma_{упр} = b_2 \cdot \varepsilon_p^2, \quad (2.31)$$

где b_0, b_1, b_2 – параметры универсальной математической модели, определяемые на основе анализа кривой растяжения и предложенного алгоритма;

σ_y – условный предел упругости, Па;

σ_n – условный предел пластичности, Па;

$\Delta\sigma_{упр}$ – условный предел упрочнения, Па;

σ_p – разрывное напряжение, Па;

ε_p – относительное разрывное удлинение, %.

В результате проведенных экспериментальных исследований [51–54] установлено, что в некоторых случаях, особенно при оценке механических свойств химических нитей и волокон, кривая растяжения, построенная на основе применения модели (2.13), не обладает высокой сходимостью с результатами экспериментальных исследований при обработке всего массива координат кривой растяжения. Максимальное отклонение составляет порядка 30%. Это объясняется тем, что при деформировании полимерных материалов существует некоторое значение напряжения, при котором происходит переход общей деформации в местную (эффект образования “шейки”) [20, 34, 36]. Следовательно, в качестве дополнительных параметров, характеризующих механические свойства химических нитей, могут выступать напряжение и относительное разрывное удлинение, при котором происходит данный переход. Применительно к пряжеподобным химическим нитям (например, пневмотекстирированным, пневмотермотекстирированным и т.д.), это напряжение, при котором начинается разрушение первых элементарных нитей, вызванное различной степенью их извитости. Как следствие это приводит к неравномерности нагрузки,

примененной к отдельным элементарным нитям. Данное напряжение (удлинение) в дальнейшем получило название предельного $\sigma_{пр}$. Значение данных введенных параметров могут определяться либо графически (на основе поиска второй точки перегиба на кривой растяжения), либо на основе применения предложенной математической модели (2.13).

Условные косвенные показатели, несущие информацию о деформационных свойствах нити, в данном случае определяются на основе следующих соотношений:

$$\sigma_y = \frac{1}{b_0} \cdot \epsilon_{пр}; \quad \sigma_n = \frac{\epsilon_{пр}}{b_0 + b_1 \cdot \epsilon_{пр}}; \quad \Delta\sigma_{упр} = b_2 \cdot \epsilon_{пр}^2; \quad (2.32)$$

где b_0, b_1, b_2 – параметры математической модели, определяемые на основе анализа кривой растяжения и предложенного алгоритма;

$\epsilon_{пр}$ – предельное значение относительного удлинения, %;

Численные значения показателей, характеризующих механические свойства текстильных волокон и нитей при растяжении, представлены в табл. 2.3.

Как следует из численной оценки косвенных параметров, наибольшим значением условного предела упрочнения обладают вискозные упрочненные ($\Delta\sigma_{упр}=22.97 \cdot 10^7$ Па), шелковые ($\Delta\sigma_{упр}=7.62 \cdot 10^7$ Па) и лавсановые ($\Delta\sigma_{упр}=6.02 \cdot 10^7$ Па) волокна, вискозная упрочненная комплексная нить 9 текс ($\Delta\sigma_{упр}=18.89 \cdot 10^7$ Па).

В меньшей степени упрочнению при растяжении подвержены: тонкая шерсть ($\Delta\sigma_{упр}=4.44 \cdot 10^7$ Па), вискозная обыкновенная Т=25 текс ($\Delta\sigma_{упр}=3.69 \cdot 10^7$ Па), полиэфирная Т=22 текс ($\Delta\sigma_{упр}=2.7 \cdot 10^7$ Па) комплексные нити и шелк сырец Т=2,5 текс ($\Delta\sigma_{упр}=3.98 \cdot 10^7$ Па). Этот факт можно объяснить проявлением при растяжении эффекта деформационного упрочнения.

Общие закономерности деформационного упрочнения текстильных волокон сформулировать затруднительно, поэтому это явление необходимо исследовать в каждом конкретном случае.

Так, например, при растяжении химических волокон явление деформационного упрочнения происходит вследствие ориентации молекулярных (в частности полимерных) цепей вдоль направления действия нагрузки за счет пластического деформирования. Для химических волокон степень деформационного упрочнения (условный предел упрочнения $\Delta\sigma_{упр}$), в значительной степени, определяется молекулярным весом полимера, условиями его формирования и вытягивания. Увеличение ориентации молекулярных цепей приводит к увеличению пределов прочности σ_n , упругости σ_y и упрочнения $\Delta\sigma_{упр}$.

Таблица 2.3

Показатели, характеризующие механические свойства текстильных волокон и нитей

Вид волокна	Механические свойства волокна и нити				
	Относительное разрывное удлинение ϵ_r , %	Разрывное напряжение σ_r , Па, ($\cdot 10^7$)	Условный предел упругости σ_y , Па, ($\cdot 10^7$)	Условный предел пластичности σ_n , Па, ($\cdot 10^7$)	Условный предел упрочнения $\Delta\sigma_{упр}$, Па, ($\cdot 10^7$)
1. Хлопковое волокно	5	36	29,16	34,08	0
2. Льняное волокно	3	78	34,82	76,88	0,90
3. Тонкая шерсть	41($\epsilon_{пр} = 36$)	23($\sigma_{пр} = 16,4$)	203,39	11,82	4,44
4. Шёлк (коконная нить)	19	40,7	165,22	33,09	7,62
5. Вискозное обыкновенное волокно	15	27,8	42,05	26,82	0,25
6. Вискозное упрочненное волокно	11,8	48	263,26	23,98	22,97
7. Ацетатное волокно	24($\epsilon_{пр} = 16$)	20,2($\sigma_{пр} = 20$)	65,09	20,12	0,28
8. Лавсановое волокно	21	55	172,15	50,58	6,02
9. Хлопчатобумажная кардная пряжа T=25 текс.	6,5	14,8	7,22	16,94	0,06
10. Льняная пряжа сухого прядения T=70 текс.	2,5	13,2	15,90	18,46	0,01
11. Шерстяная гребенная пряжа T=40 текс.	7,5	6,7	27,08	6,87	0,06
12. Шелк сырец T=2,5 текс.	17,5	40,4	378,01	37,18	3,98
13. Вискозная обыкновенная комплексная нить T=25 текс.	16	17,8	151,03	17,53	3,69
14. Вискозная упрочненная комплексная нить T=9 текс.	10	33,5	207,43	14,95	18,89
15. Ацетатная комплексная нить T=11,1 текс	19	9,36	94,93	8,91	0,4
16. Полиэфирная комплексная нить T=22 текс.	14,4	56,03	420,71	54,86	2,7

Практически не упрочняются хлопковые, льняные, вязкозные обыкновенные и ацетатные волокна, а также шерстяная гребенная пряжа 40 текс, льняная пряжа сухого прядения 70 текс и хлопчатобумажная кардная пряжа 25 текс.

Наиболее сильно упругие свойства проявляются у вязкозных упрочненных ($\sigma_y = 263,26 \cdot 10^7 \text{ Па}$), лавсановых ($\sigma_y = 172,15 \cdot 10^7 \text{ Па}$), шелковых волокон ($\sigma_y = 165,22 \cdot 10^7 \text{ Па}$) и тонкой шерсти ($\sigma_y = 203,39,15 \cdot 10^7 \text{ Па}$). Среди текстильных нитей сильно выраженными упругими свойствами обладают химические комплексные нити (полиэфирная – $\sigma_y = 420,71 \cdot 10^7 \text{ Па}$, вязкозная упрочненная – $\sigma_y = 207,43 \cdot 10^7 \text{ Па}$) и шелк сырец ($\sigma_y = 378,01 \cdot 10^7 \text{ Па}$). В меньшей степени – у шелковых ($\sigma_y = 165,22 \cdot 10^7 \text{ Па}$), лавсановых ($\sigma_y = 126,61 \cdot 10^7 \text{ Па}$), капроновых ($\sigma_y = 159,94 \cdot 10^7 \text{ Па}$) и шерстяных ($\sigma_y = 194,85 \cdot 10^7 \text{ Па}$) волокон. По сравнению с другими волокнами слабо восстанавливаются хлопковые ($\sigma_y = 29,16 \cdot 10^7 \text{ Па}$) и льняные ($\sigma_y = 34,82 \cdot 10^7 \text{ Па}$) волокна, а также смешанная пряжа, компонентами которой выступают волокна натурального происхождения.

С другой стороны, пластические свойства в меньшей степени проявляются у обыкновенных ($\sigma_n = 26,82 \cdot 10^7 \text{ Па}$) и упрочненных ($\sigma_n = 23,98 \cdot 10^7 \text{ Па}$) вязкозных, шерстяных ($\sigma_n = 11,82 \cdot 10^7 \text{ Па}$) и ацетатных ($\sigma_n = 20,12 \cdot 10^7 \text{ Па}$) волокон. Лавсановые ($\sigma_n = 50,58 \cdot 10^7 \text{ Па}$), капроновые ($\sigma_n = 58,66 \cdot 10^7 \text{ Па}$) волокна, а также текстильные нити, изготовленные на основе данных полимеров (полиэфирная – $\sigma_n = 54,86 \cdot 10^7 \text{ Па}$, полиамидная – $\sigma_n = 66,99 \cdot 10^7 \text{ Па}$) обладают, по сравнению с другими видами текстильных волокон и нитей, сильно выраженными пластическими свойствами. Также по результатам моделирования установлено, что льняные волокна обладают наибольшим значением условного предела пластичности ($\sigma_n = 76,88 \cdot 10^7 \text{ Па}$).

Данные факты вполне согласуются с экспериментальными и теоретическими исследованиями упругих, пластических и упрочняющих свойств текстильных волокон и нитей, проведенными в С-Петербургском университете технологии и дизайна (проф. Перепелкин К.Е.) и Московском государственном текстильном университете (проф. Соловьев А.Н., проф. Кукин Г.К., проф. Кирюхин С.М., проф. Щербаков В.П.), а также данными, приведенными в работах И. Нарисавы (Япония).

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования процесса растяжения текстильных волокон подтверждают достоверность математической модели (2.13) не только с математической точки зрения, но и с точки зрения физики процессов, протекающих при деформировании и разрушении текстильных волокон.

Следовательно, математическая модель (2.13) может быть рекомендована для описания и комплексного анализа процесса растяжения текстильных материалов.

2.4. Методика оценки показателей деформационных свойств текстильных нитей по результатам полуциклового испытания на растяжение

1. Отбор образцов от партии производить с соответствии с ГОСТ 6611.0–73.
2. Исследуемые образцы нитей выдерживать в нормальных условиях в соответствии с ГОСТ 10681–75.
3. По результатам полуциклового испытания на растяжение сформировать массив кривой растяжения в координатах $[P_i, \varepsilon_i]$ $i=1...n$, где n – размер полученного массива кривой растяжения.
4. Произвести оценку среднего радиуса нити и рассчитать напряжение σ_i , возникающего при растяжении образца по формуле:

$$\sigma_i = \frac{P_i \cdot (1 + \varepsilon_i)}{\pi \cdot R_0^2},$$

где P_i – текущее значение растягивающей силы, Н;

R_0 – начальное значение среднего радиуса испытуемой нити, м.

5. Определить предел прочности σ_p и относительное разрывного удлинение ε_p
6. Графически представить кривую растяжения в координатах “напряжение – относительное удлинение” и определить (если это возможно), поиском второй точки перегиба на кривой растяжения, предельное напряжение $\sigma_{пр}$ и предельное относительное удлинение $\varepsilon_{пр}$. При условии отсутствия второй точки перегиба на кривой растяжения принять $\sigma_p = \sigma_{пр}$ и $\varepsilon_p = \varepsilon_{пр}$.
7. Принять $\Delta < 10^{-6}$ МПа, произвести оценку (на основе применения метода движения к оптимуму с постепенно уменьшающимся шагом (соотношения 2.19–2.29)) параметров модели (2.13) b_0, b_1, b_2 .
8. Рассчитать условный предел упругости σ_y нити по формуле:

$$\sigma_y = \frac{\varepsilon_p}{b_0} \quad (2.33)$$

9. Рассчитать условный предел упрочнения нити $\Delta\sigma_{упр}$ по формуле:

$$\Delta\sigma_{\text{упр}} = b_2 \cdot \varepsilon_p^2 \quad (2.34)$$

10. Рассчитать условный предел пластичности нити σ_n по формуле::

$$\sigma_n = \frac{\varepsilon_p}{b_0 + b_1 \cdot \varepsilon_p} \quad (2.35)$$

Следует отметить, что методика оценки показателей деформационных свойств текстильных нитей по результатам полуциклового испытания на растяжение издана в виде научной брошюры [55] и получила положительное заключение Витебского центра стандартизации, метрологии и сертификации.

2.5. Типовой расчёт показателей деформационных свойств текстильных нитей

1. При проведении полуциклового испытания на растяжение (разрывная машина РМ-АВТО) пневмотермотекстурированной полиэфирно-полиамидной нити 30 текс. сформирован массив кривой растяжения в координатах $[P_i, \varepsilon_i]$ $i=1...N$, где N – размер полученного массива кривой растяжения.

Таблица 2.4

$\varepsilon_i, \%$	0	1	2	4	6	8	10	12	14	16
$P_i, \text{сН}$	0	50,8	74,4	112,2	148,2	196,8	249,7	313,2	378,8	444,5

$\varepsilon_i, \%$	18	20	22	24	26	27,4
$P_i, \text{сН}$	505,8	567,2	624,3	670,9	753,4	788,6

2. Оценка среднего радиуса нити и напряжения σ_i , возникающего при растяжении образца (соотношение 2.24).

Таблица 2.5

$\varepsilon_i, \%$	0	1	2	4	6	8	10	12	14	16
$\sigma_i, \text{сН}$	0	0,77	1,14	1,75	2,36	3,19	4,13	5,28	6,49	7,76

$\varepsilon_i, \%$	18	20	22	24	26	27,4
$\sigma_i, \text{МПа}$	8,98	10,24	11,458	12,51	14,28	15,11

3. Оценка разрывного напряжения σ_p и относительного разрывного удлинения ε_p :

$$\sigma_p = 15,11 \text{ МПа}; \quad \varepsilon_p = 27,4\%$$

4. Оценка предельного напряжения $\sigma_{пр}$ и относительного предельного удлинения $\varepsilon_{пр}$:

$$\sigma_{пр} = 8,97 \text{ МПа}; \quad \varepsilon_{пр} = 18\%$$

5. Расчет параметров b_0 , b_1 и b_2 модели (2.13) на основе применения соотношений (2.25)–(2.29):

$$b_0 = 1,41 \text{ (МПа)}^{-1}$$

$$b_1 = 0,31 \text{ (МПа)}^{-1}$$

$$b_2 = 0,019 \text{ МПа}.$$

6. Расчет условного предела упругости нити σ_y (соотношение 2.33):

$$\sigma_y = \frac{\varepsilon_p}{b_0} = \frac{18}{1,41} = 12,76 \text{ МПа}$$

7. Расчет условного предела упрочнения нити $\Delta\sigma_{упр}$ (соотношение 2.34):

$$\Delta\sigma_{упр} = b_2 \cdot \varepsilon_p^2 = 0,019 \cdot 18^2 = 6,16 \text{ МПа}$$

8. Расчет условного предела пластичности нити σ_n (соотношение 2.35):

$$\sigma_n = \frac{\varepsilon_p}{b_0 + b_1 \cdot \varepsilon_p} = \frac{18}{1,41 + 0,31 \cdot 18} = 2,67 \text{ МПа}$$

Авторы отмечают, что дальнейшие исследования деформационных свойств текстильных материалов, будут направлены на установку корреляционной взаимосвязи с разработкой соответствующих моделей между введенными показателями деформационных свойств текстильных нитей и показателями, определяемыми в результате проведения одноцикловых испытаний на растяжение.

РЕЗЮМЕ

В результате проведенного комплекса аналитических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. обоснован и введен ряд дополнительных показателей, характеризующих деформационные свойства текстильных нитей при растяжении: условный предел упругости σ_y , условный предел пластичности σ_n и условный предел упрочнения $\Delta\sigma_{упр}$;
2. разработана методика оценки показателей деформационных свойств текстильных нитей по результатам кратковременных испытаний. Проведенные экспериментальные исследования процесса растяжения текстильных волокон и нитей различного сырьевого состава подтвердили достоверность предложенной методики не только с математической точки зрения, но и с точки зрения физики процессов, протекающих при деформировании и разрушении текстильных материалов;

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕТЕРОГЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

3.1. Обоснование методики исследования показателей, характеризующих механические свойства текстильных материалов

Одиночное волокно (нить), как, практически, любую продукцию текстильной промышленности, необходимо рассматривать как сложную техническую систему вследствие многообразия и многосвязности отношений между их компонентами, сложности поведения под действием разнообразных воздействий внешних факторов и условий окружающей среды. Известно, что исследования практически любых технических систем осуществляется на основе применения двух типов математических моделей: аналитических и имитационных [56].

В аналитических моделях поведение системы обычно представляются в виде некоторых функциональных отношений (явных зависимостей, систем алгебраических, дифференциальных или интегральных уравнений). Однако, для упрощения гносеологической сложности объектов исследования в этих случаях приходится применять разнообразные абстракции и идеализации, когда в тело конструируемых аналитических моделей для упрощения познавательной ситуации нередко вводятся достаточно произвольные, и искусственные допущения. Это обстоятельство часто приводит к существенным ошибкам предсказания поведения исследуемых систем. Следует отметить, что аналитическое моделирование в некоторых случаях является слишком грубым приближением к действительности вследствие сложности и многообразия явлений, которые протекают в исследуемом образце или технологической системе.

В данной работе в качестве метода исследования использовано имитационное моделирование процессов испытания.

Имитационное моделирование в общем случае представляет собой численный метод проведения на ЭВМ экспериментов с математическими моделями, которые описывают поведение компонентов изделия (системы) в течение заданного или формируемого периода времени. Поведение компонентов системы и их взаимодействие в имитационной модели чаще всего описывается определенным набором алгоритмов, реализуемых на выбранном языке моделирования.

В алгоритмах могут использоваться частные аналитические модели, которые либо описывают поведение переменных в пределах компонента системы, либо же выражают отношения между компонентами системы. Виды отношений и поведения могут быть по своей природе либо детерминистическими, либо стохастическими.

Имитационное моделирование является чрезвычайно мощным и гибким инструментом исследования, позволяющим воспроизводить практически любые ситуации в процессе проведения испытания. Применение метода имитационного моделирования испытаний можно рекомендовать в следующих ситуациях:

- в случае невозможности проведения исследования в реальных условиях;
- при наличии аналитических моделей, математические процедуры которых настолько сложны и трудоемки, что имитационное моделирование является наиболее простым и объективным способом решения той или иной задачи исследования;
- при необходимости осуществления наблюдения за поведением компонентов системы в течение определенного периода;
- в случаях изучения новых ситуаций в поведении сложной системы, информация о которых неизвестна;
- когда особое значение имеет последовательность событий в исследуемой сложной системе, и имитационная модель дает возможность прогнозировать наличие узких мест в функционировании системы и других особенностей, появляющихся при введении в нее новых компонентов;
- при необходимости проведения анализа случайных процессов в системе и решения задачи управления сложной системой.

Имитационное моделирование можно также рекомендовать при разработке, исследовании и оптимизации новых технологических процессов, организационных форм в текстильной и легкой промышленности.

Адекватная имитационная модель аналитически и численно с определенной степенью приближения отражает функционирование моделируемой системы, определяя контролируемый параметр или показатель. Вероятностные характеристики имитационной модели должны отражать характер случайных событий реального физического процесса.

Независимо от назначения применяемой имитационной модели, существует возможность выделения следующих основных этапов ее разработки:

- составление содержательного описания объекта моделирования;
- составление концептуальной модели;
- составление формального описания объекта моделирования;

- составление описания имитационной модели;
- программирование модели;
- испытание и исследование модели;
- организация модельного эксперимента;
- анализ результатов имитационного моделирования.

Одним из важнейших этапов проектирования имитационной модели является составление концептуальной модели. При этом выдвигаются гипотезы и фиксируются допущения, определяются параметры (показатели) модели и устанавливаются приоритеты решения подзадач моделирования. Далее составляется список используемых методов обработки результатов имитации и, самое главное, определяются способы формализации объекта моделирования.

В настоящей работе предполагается использовать имитационное моделирование для исследования процессов испытания по деформированию и разрушению при полущикловом испытании на растяжение одиночных волокон (нитей) и их пучков. Имитационное моделирование позволит выявить влияние гетерогенности структуры и механических свойств текстильных волокон и нитей на результаты испытания и правильно интерпретировать это влияние.

3.2. Исследование влияния продольной гетерогенности структуры и механических свойств на прочностные характеристики текстильных материалов

3.2.1. Имитационная модель процесса деформирования и разрушения одиночной нити (волокна) при полущикловом испытании на растяжение

При разработке имитационной модели полущиклового испытания на растяжение одиночной нити (волокна) была выдвинута гипотеза предполагающая, что объект исследования можно представить структурно в виде m последовательно соединенных участков (элементов) длиной ΔL_i . При этом каждый i -тый участок нити имеет не только различную линейную плотность T_i , но и различные параметры модели b_{0i}, b_{1i}, b_{2i} (2.13), которые характеризуют упругие, пластические и упрочняющие свойства одиночной нити (волокна).

Схематическое представление одиночной нити (волокна) с учетом предложенных допущений представлено на рис.3.1. Предложенная модель растяжения (2.13) текстильных волокон и нитей, а также предложенные

допущения позволяют определить значение напряжения σ_i для каждого i -того сечения одиночной нити (волокна) при известном значении относительной деформации ε_i . Умножив правую и левую часть модели (2.1) на

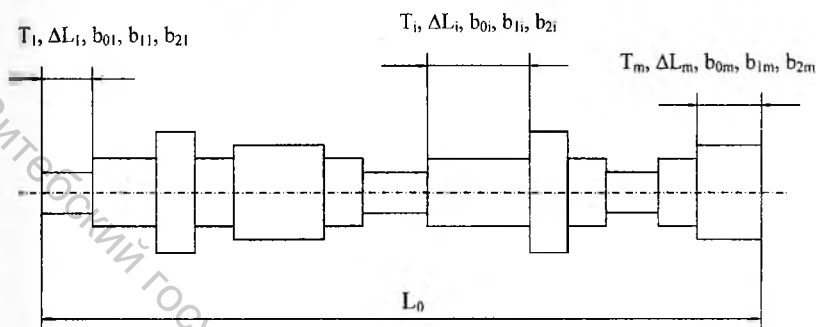


Рис.3.1. Схематическое представление одиночной нити (волокна) с продольной гетерогенностью механических свойств и строения при имитационном моделировании процессов деформирования и разрушения

площадь i -го сечения нити $F_i = T_i / \gamma$, где γ - плотность вещества волокна (нити), уравнение (2.13) преобразуется к следующему виду:

$$\varepsilon_i = \frac{\gamma P}{T_i \left(\frac{1}{b_{0i} + b_{1i} \varepsilon_i} + b_{2i} \varepsilon_i \right)}, \quad (3.1)$$

где P - текущее значение силы растяжения, Н.

Данное уравнение легко решается методом итераций.

Параметры уравнения (3.1) для i -того участка волокна (нити) определяются, согласно их физическому смыслу, исходя из следующих соотношений:

$$b_{0i} = \frac{\varepsilon_{pi}}{\sigma_{yi}}, \quad b_{1i} = \left(\frac{1}{\sigma_{ni}} - \frac{1}{\sigma_{yi}} \right), \quad b_{2i} = \frac{\sigma_{pi} - \sigma_{ni}}{\varepsilon_{pi}^2}, \quad (3.2)$$

где σ_{yi} - условный предел упругости i -того элемента нити, Па;

ε_{pi} - относительное разрывное удлинение i -того элемента нити, %;

σ_{pi} - предел прочности i -того элемента нити, Па;

σ_{ni} - условный предел пластичности i -того элемента нити, Па.

Таким образом, случайными характеристиками i -го элемента нити (волокна) будут являться значения σ_{yi} , ε_{pi} , σ_{pi} , T_i , σ_{ni} , ΔL_i , которые распределены согласно выбранному закону распределения. Для учета влияния нестабильности явления упрочнения генератор случайных чисел генериру-

ет значение $\Delta\sigma_{упри}=(\sigma_{pi}-\sigma_{ni})$, а значение σ_{pi} , определяется из следующего выражения: $\sigma_{pi}=\Delta\sigma_{упри}-\sigma_{ni}$. Для каждого участка данные характеристики определяются на основе соответствующего генератора случайных чисел и далее остаются постоянными в течение всего цикла моделирования.

Имитационное моделирование полуциклового испытания на растяжение текстильной нити, обладающей продольной вариацией показателей структуры и механических свойств может осуществляться при следующих условиях:

- при постоянной скорости нарастания нагрузки $\Delta P=\text{const}$;
- при постоянной скорости нарастания удлинения $\Delta l=\text{const}$;

Имитационное моделирование эксперимента при постоянной скорости нарастания нагрузки состоит из q этапов, на каждом из которых последовательно повышается на величину ΔP значение растягивающей силы. Тогда на j -ом этапе моделирования значение растягивающей силы:

$$P_j = j \cdot \Delta P.$$

Затем, согласно модели (3.1) на j -том этапе для каждого i -того участка определяются значения относительного удлинения ϵ_{ij} и напряжения σ_{ij} :

$$\sigma_{ij} = P_j \cdot \frac{Y}{T}. \quad (3.3)$$

Абсолютные удлинения каждого элемента l_{ij} , и всей нити l_j на j -м этапе моделирования будут определяться следующими соотношениями:

$$l_{ij} = \epsilon_{ij} \cdot \Delta L_i; \quad l_j = \sum_{i=1}^m l_{ij}. \quad (3.4)$$

Тогда среднее значение относительного удлинения нити ϵ_j на j -м шаге моделирования будет определяться следующим соотношением:

$$\epsilon_j = \frac{l_j}{\sum_{i=1}^m \Delta L_i}. \quad (3.5)$$

При выполнении условий:

- $\epsilon_{ij} \geq \epsilon_{pi}$ либо
- $\sigma_{ij} \geq \sigma_{pi}$

текстильная нить (волокно) считается разрушенным и далее значение P_j принимается равным нулю.

Схема алгоритма имитационной модели деформирования и разрушения одиночной нити с продольной гетерогенностью показателей механических свойств и структуры при постоянной скорости нарастания нагрузки ($\Delta P = \text{const}$) представлена на рис.3.2.

При проведении имитационного моделирования при постоянстве скорости нарастания удлинения ($\Delta l = \text{const}$) нижнему зажиму разрывной машины последовательно сообщается постоянное на каждом этапе моделирования удлинение Δl . Следовательно, удлинение нити на j -том этапе моделирования l_j определяется как

$$l_j = j \cdot \Delta l, \quad (3.6)$$

что позволяет определить нагрузку P_j , приложенную к нити на j -том этапе:

$$P_j = \frac{l_j}{a_0 + a_1 \cdot l_j} + a_2 \cdot l_j^2, \quad (3.7)$$

$$a_0 = \frac{\bar{l}_p \cdot \gamma}{\bar{\sigma}_y \cdot \bar{T}}, \quad a_1 = \left(\frac{1}{\bar{\sigma}_n} - \frac{1}{\bar{\sigma}_y} \right) \cdot \frac{\gamma}{\bar{T}}, \quad a_2 = \frac{\bar{\Delta \sigma}_{\text{упр}}}{\bar{l}_p^2} \cdot \frac{\bar{T}}{\gamma}, \quad (3.8)$$

где $\bar{l}_p$ – среднее значение абсолютного разрывного удлинения нити, м;
 $\bar{\sigma}_y$ – среднее значение условного предела упругости нити, Па;
 $\bar{\sigma}_n$ – среднее значение условного предела пластичности нити, Па;
 $\bar{\Delta \sigma}_{\text{упр}}$ – среднее значение условного предела упрочнения нити, Па;
 $\bar{T}$ – среднее значение линейной плотности нити, кг/м;
 γ – плотность вещества нити, кг/м³.

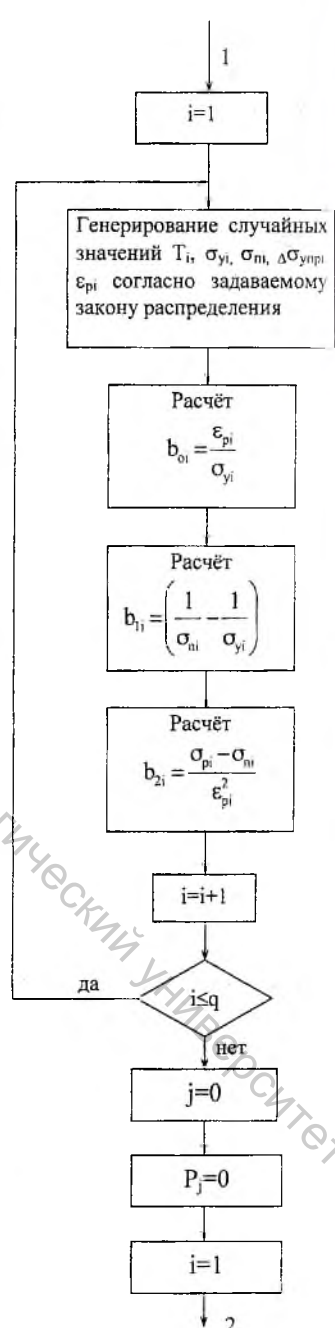
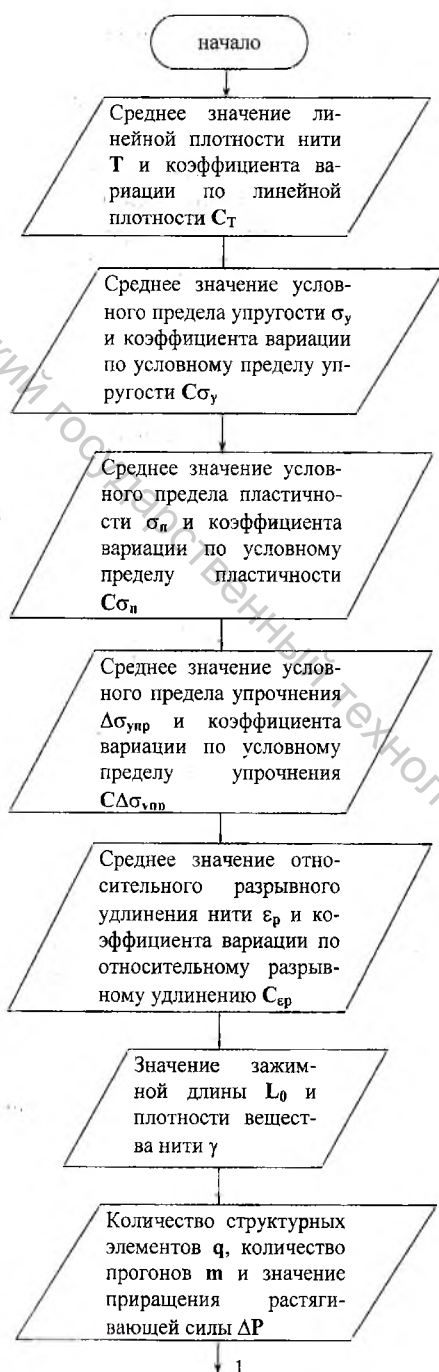
Далее, для каждого i -того структурного элемента нити на j -том этапе моделирования определяются значения относительного удлинения ε_{ij} и напряжения σ_{ij} (соотношения (3.1) и (3.3)).

При выполнении условий:

- $\varepsilon_{ij} \geq \varepsilon_{pi}$ либо $\sigma_{ij} \geq \sigma_{pi}$

текстильная нить (волокно) считается разрушенным и далее значение P_i принимается равным нулю.

Схема алгоритма имитационной модели полуволнового испытания на растяжение текстильной нити с продольной вариацией показателей структуры и механических свойств при постоянной скорости нарастания удлинения представлена на рис.3.3



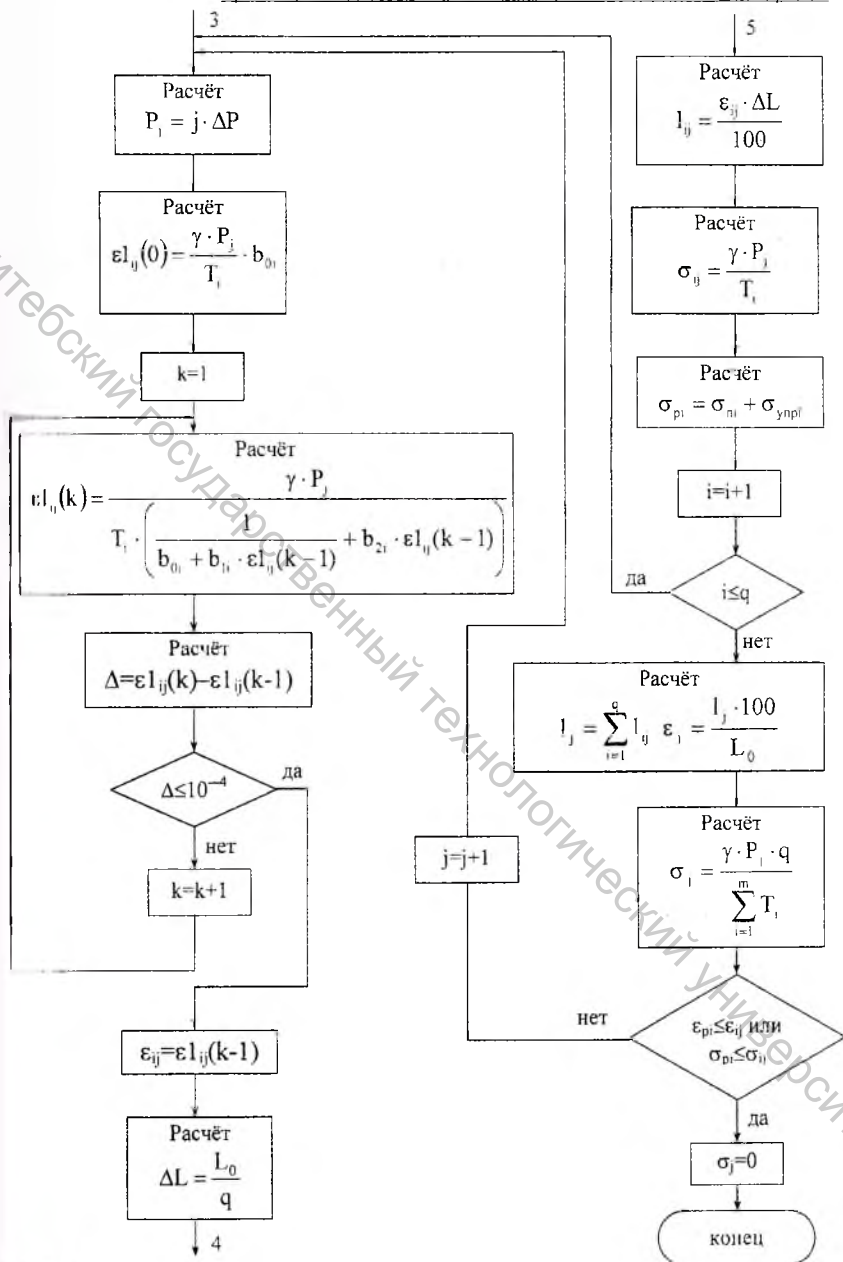
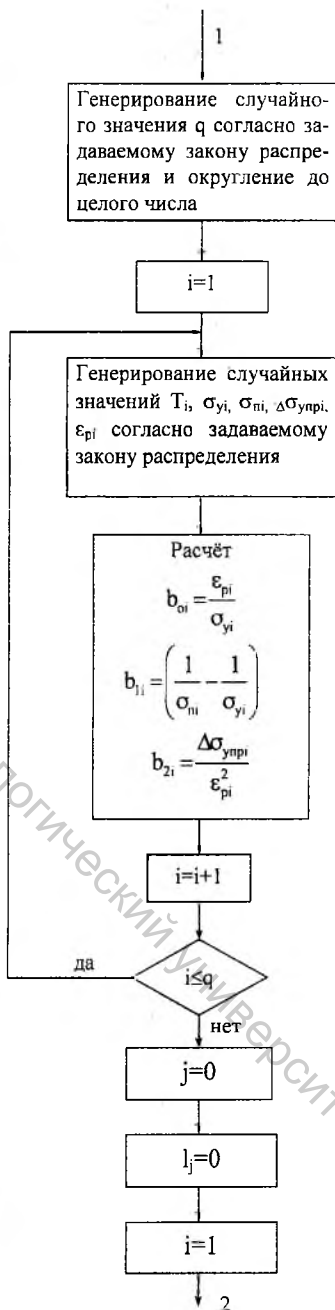
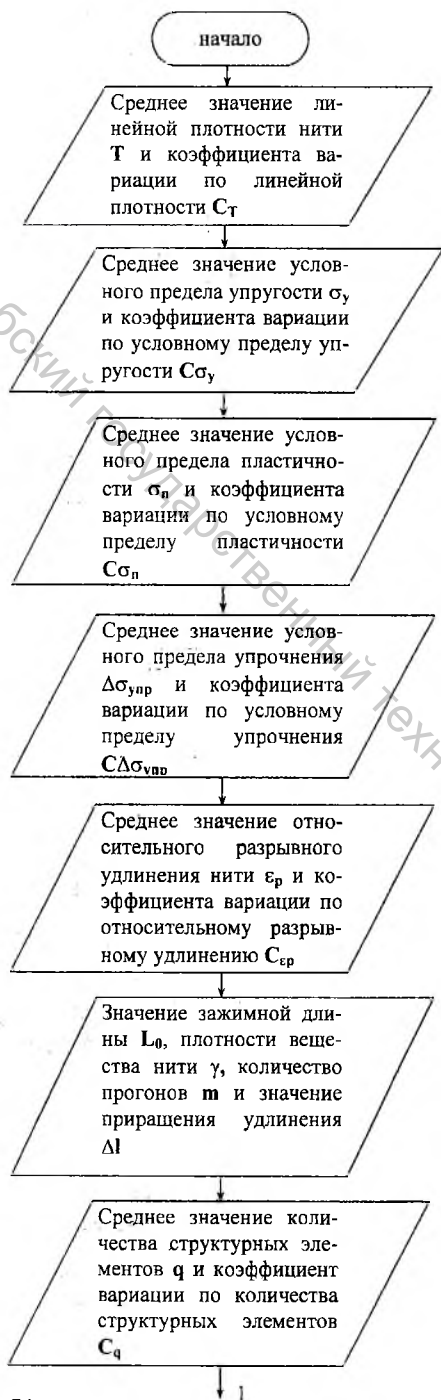


Рис.3.2. Схема алгоритма имитационной модели деформирования и разрушения текстильной нити (волокна) с продольной гетерогенностью показателей строения и механических свойств при постоянной скорости нарастания нагрузки ($\Delta P = \text{const}$)



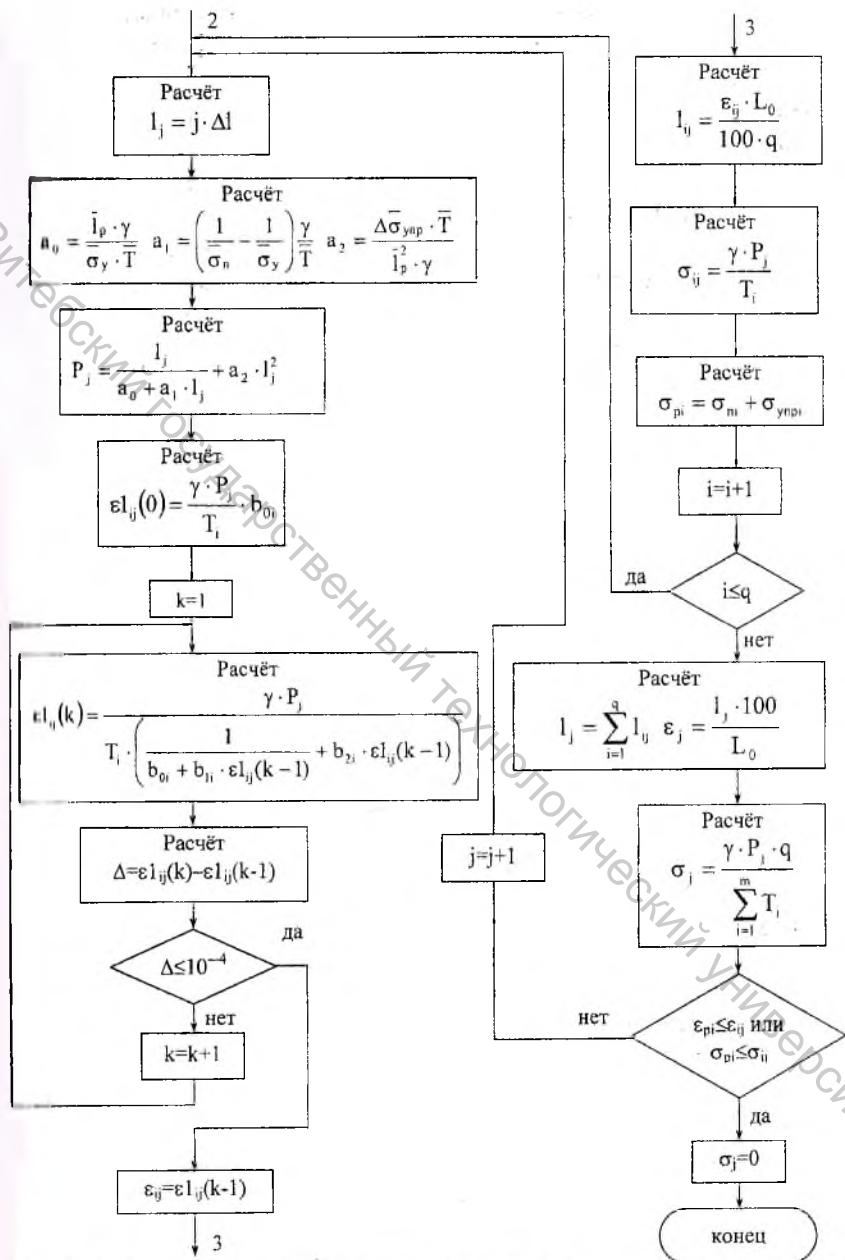


Рис.3.3. Схема алгоритма имитационной модели деформирования и разрушения текстильной нити (волокна) с продольной гетерогенностью строения и механических свойств при постоянной скорости нарастания удлинения ($\Delta l = \text{const}$)

Имитационное моделирование позволяет построить кривые растяжения волокна (нити) в координатах «нагрузка P_l – абсолютное удлинение l_j » или «напряжение σ_j – относительное удлинение ϵ_j » с учётом продольной гетерогенности механических свойств и структуры, а также определить влияние продольной гетерогенности на параметры данной кривой.

В качестве объекта исследования было введено понятие «синтезированной» нить. Под понятием «синтезированной» в дальнейшем будет пониматься реальная одиночная нить, при полуцикловом испытании на растяжение которой проявляются наиболее общие свойства, определяемые параметрами математической модели (2.13). Кривая растяжения «синтезированной» нити в координатах «напряжение σ – относительное удлинение ϵ » при отсутствии гетерогенности структуры и механических свойств представлена на рис.3.4.

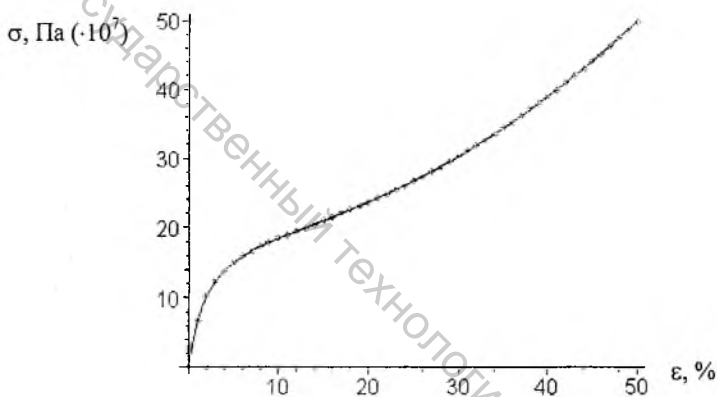


Рис.3.4. Кривая растяжения «напряжение σ – относительное удлинение ϵ » для «синтезированной» одиночной нити при отсутствии вариаций (неровноты) по физико-механическим свойствам

В результате проведенного обобщения и математического описания процесса растяжения одиночной нити [52, 57–59] в качестве исходных были выбраны следующие средние значения параметров «синтезированной» нити:

- условный предел упругости $\bar{\sigma}_y = 500 \cdot 10^7$ Па;
- условный предел пластичности $\bar{\sigma}_n = 20 \cdot 10^7$ Па;
- условный предел упрочнения $\bar{\Delta\sigma} = 30 \cdot 10^7$ Па;
- относительное разрывное удлинение $\bar{\epsilon}_p = 50\%$;
- линейная плотность $\bar{T} = 100$ текс;

При проведении имитационного моделирования принималось, что

- плотность вещества нити $\gamma=1000 \text{ кг/м}^3$;
- зажимная длина $L_0=0,5 \text{ м}$;
- среднее значение количества условных структурных элементов (участков) нити, по длине которых значение показателей структуры и механических свойств постоянно, $m=50$;
- величина приращения растягивающей силы $\Delta P=1 \text{ Н}$ (при проведении имитационного моделирования с постоянной скоростью нарастания нагрузки);
- величина приращения удлинения нити $\Delta l=2,5 \text{ мм}$ (при проведении имитационного моделирования с постоянной скоростью нарастания удлинения);

При проведении имитационного моделирования было принято допущение, что параметры “синтезированной” одиночной нити, характеризующие деформационные и прочностные свойства являются независимыми случайными величинами, которые подчиняются задаваемому закону распределения (нормальному, Вейбулла и т.д.).

В результате анализа предварительных результатов имитационного моделирования установлено, что различие в условиях проведения моделирования (постоянство скорости нарастания нагрузки $\Delta P=\text{const}$ либо удлинения $\Delta l=\text{const}$) не оказывают существенного влияния на общие закономерности изменения прочностных свойств текстильной нити.

Некоторые результаты имитационного моделирования испытания при постоянстве скорости нарастания нагрузки ($\Delta P=\text{const}$) на растяжение одиночной нити с продольной гетерогенностью представлены на рис. 3.5 – 3.10.

На данных рисунках отражено влияние нестабильности характеристик участков нити на форму и параметры кривой «напряжение σ – относительное удлинение ϵ ». На рис. 3.5–3.8 отображено влияние нестабильности отдельных параметров, соответственно: характеристики упрочнения $\Delta\sigma_{\text{упр}}$, относительного разрывного удлинения ϵ_r , условного предела пластичности σ_n и линейной плотности нити T . Коэффициенты вариации данных параметров принимали следующие значения: 1 – 0%, 2 – 5%, 3 – 15%, 4 – 30%.

Анализ графиков на этих рисунках указывает на то, что увеличение коэффициента вариации параметра нити приводит к уменьшению напряжения при разрыве σ_r и относительного разрывного удлинения ϵ_r .

Исключение составляет влияние коэффициента вариации относительного удлинения при разрыве ϵ_r на участках нити.

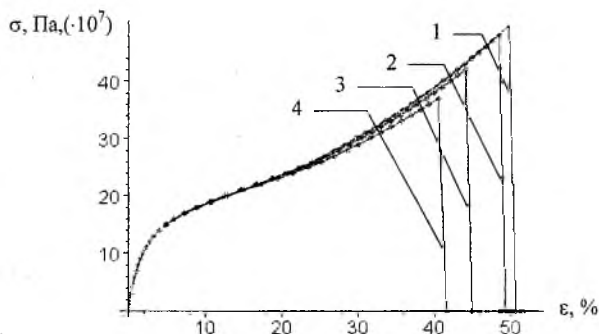


Рис.3.5. Влияние неравномерности предела прочности σ_p по длине нити на характеристики кривой «напряжение–относительное удлинение»

1- $C\sigma_p=0\%$; 2- $C\sigma_p=5\%$; 3- $C\sigma_p=15\%$; 4- $C\sigma_p=30\%$

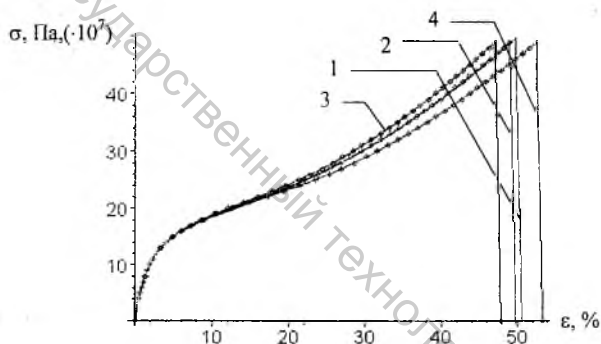


Рис.3.6. Влияние неравномерности разрывного удлинения ϵ_p по длине нити на характеристики кривой «напряжение - относительное удлинение»

1- $C\epsilon_p=0\%$; 2- $C\epsilon_p=5\%$; 3- $C\epsilon_p=15\%$; 4- $C\epsilon_p=30\%$

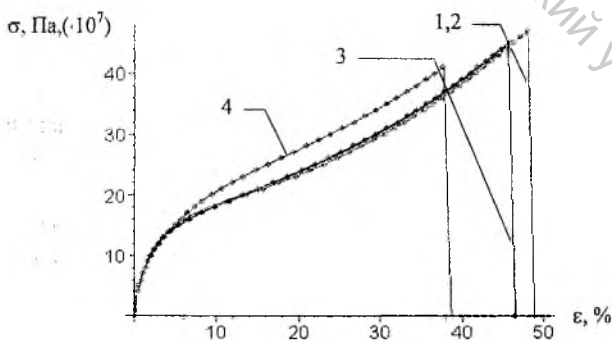


Рис.3.7. Влияние неравномерности условного предела пластичности σ_n по длине нити на характеристики кривой «напряжение - относительное удлинение»

1- $C\sigma_n=0\%$; 2- $C\sigma_n=5\%$; 3- $C\sigma_n=15\%$; 4- $C\sigma_n=30\%$

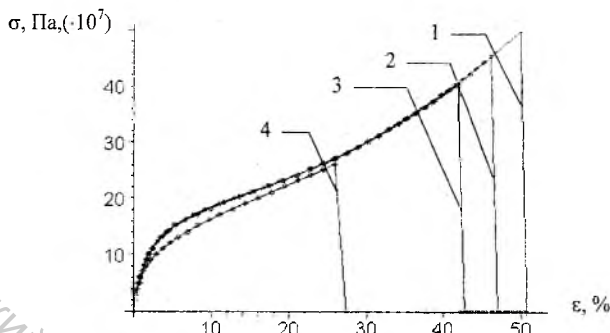


Рис.3.8. Влияние неравномерности линейной плотности T по длине нити на характеристики кривой «напряжение - относительное удлинение»
1- $C_T=0\%$; 2- $C_T=5\%$; 3- $C_T=15\%$; 4- $C_T=30\%$

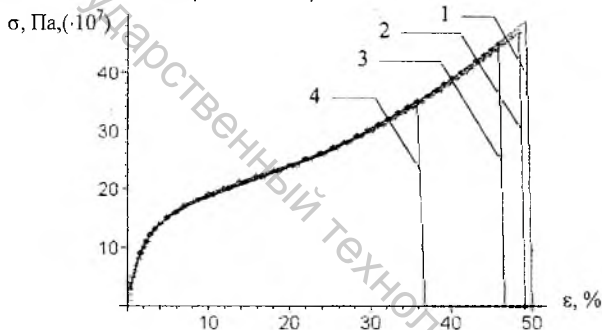


Рис.3.9. Совместное влияние неравномерностей разрывного удлинения ϵ_p и предела прочности σ_p по длине нити на характеристики кривой «напряжение - относительное удлинение»
1- $C_{\sigma_p}, C_{\epsilon_p}=0\%$; 2- $C_{\sigma_p}, C_{\epsilon_p}=5\%$;
3- $C_{\sigma_p}, C_{\epsilon_p}=15\%$; 4- $C_{\sigma_p}, C_{\epsilon_p}=30\%$

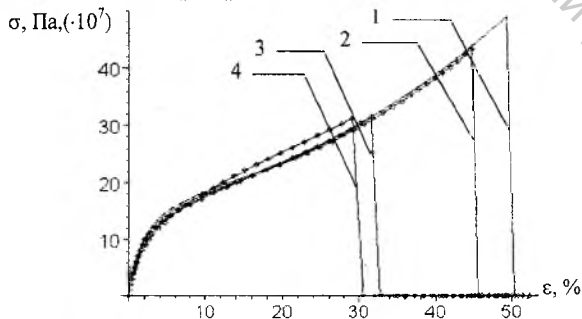


Рис.3.10. Совместное влияние различных неравномерностей показателей механических свойств по длине нити на характеристики кривой «относительное удлинение- напряжение»
1- $C_{\sigma_p}, C_{\epsilon_p}, C_{\sigma_m}, C_T, C_{\sigma_y}=0\%$; 2- $C_{\sigma_p}, C_{\epsilon_p}, C_{\sigma_m}, C_T, C_{\sigma_y}=5\%$;
3- $C_{\sigma_p}, C_{\epsilon_p}, C_{\sigma_m}, C_T, C_{\sigma_y}=15\%$; 4- $C_{\sigma_p}, C_{\epsilon_p}, C_{\sigma_m}, C_T, C_{\sigma_y}=30\%$

В данном случае предел прочности нити практически не изменяется, а её относительное разрывное удлинение ϵ_r изменяется незначительно (в пределах $\pm 3\%$) и хаотически.

По степени влияния гетерогенности характеристик нити по её длине на уменьшение относительного удлинения при разрыве ϵ_r , последние располагаются в следующем порядке: линейная плотность нити T , условный предел пластичности σ_n , предел прочности σ_p , а по степени влияния на уменьшение предела прочности σ_p нити, они располагаются в следующем порядке: T , σ_p , σ_n .

На рис. 3.9 – 3.10 отображено влияние одновременной нестабильности характеристик элементов нити на форму и параметры кривой растяжения. Характер влияния по сравнению с влиянием одного параметра не изменяется. Однако влияние отдельных параметров при их случайном одновременном изменении не суммируется.

При проведении дальнейших исследований предполагается синтезировать аналитические модели прогноза, отражающие влияние характеристик продольной гетерогенности нити на напряжения при разрыве σ_p и относительное удлинение при разрыве ϵ_r [52, 57–58].

3.2.2 Исследование влияния продольной гетерогенности механических свойств и структуры на прочностные характеристики одиночной нити

Данные исследования проводились на основе предложенной в п.3.2.1 имитационной модели деформирования и разрушения одиночной нити (волокна). В качестве объекта исследования использована «синтезированная» нить, параметры которой определены в п.3.2.1. При проведении имитационного моделирования было принято допущение о том, что параметры «синтезированной» одиночной нити, характеризующие деформационные и прочностные свойства, являются независимыми случайными величинами и подчиняются нормальному закону распределения (или закону распределения Вейбулла). При этом параметры распределения Вейбулла определялись на основе совместного решения следующих уравнений:

$$C_x = \left[\frac{\Gamma\left(\frac{a+2}{a}\right)}{\Gamma\left(\frac{a+1}{a}\right)^2} - 1 \right]^{0.5}, \quad (3.9)$$

$$\bar{X} = b \cdot \Gamma\left(\frac{a+1}{a}\right) \quad (3.10)$$

где $\bar{X}$, C_x – среднее значение и коэффициент вариации показателя механических свойств текстильной нити (волокна);

a , b – параметры распределения Вейбулла.

При исследовании влияния нестабильности показателей строения и механических свойств на средние значения напряжения при разрыве $\bar{\sigma}_p$ и относительного разрывного удлинения $\bar{\epsilon}_p$ были поставлены следующие задачи:

- проведение комплексного анализа влияния различных нестабильностей по механическим свойствам одиночной нити на разрывное напряжение $\bar{\sigma}_p$ и относительное разрывное удлинение $\bar{\epsilon}_p$. Выделение наиболее значимых, с точки зрения влияния на данные показатели, вариаций по механическим свойствам;
- проведение анализа результатов совместного влияния наиболее значимых нестабильностей на средние значения прочностных характеристик;
- разработка обобщенной математической модели, описывающей влияние различных вариаций по механическим свойствам на прочностные характеристики одиночной нити.

Результаты имитационного моделирования при условии постоянства скорости нарастания нагрузки представлены на рис.3.11 –3.26. Результаты моделирования при условии постоянства нарастания удлинения не представлены, поскольку различие в условиях проведения моделирования не оказывает существенного влияния на общие закономерности изменения прочностных свойств текстильной нити,

Проведенный анализ изменения напряжения при разрыве одиночной нити (волокна) при наличии вариаций по различным механическим свойствам позволяет сформулировать следующие предварительные выводы:

- к основным свойствам одиночной нити, вариации по которым приводят к закономерному снижению среднего значения напряжения при разрыве $\bar{\sigma}_p$, следует отнести следующие: линейную плотность нити T , условный предел упрочнения $\Delta\sigma_{упр}$ и условный предел пластичности σ_n ;
- нестабильность условного предела упругости σ_y и относительного разрывного удлинения ϵ_p , как показывают результаты проведенного имитационного моделирования, на среднее напряжения при разрыве $\bar{\sigma}_p$ не влияет;

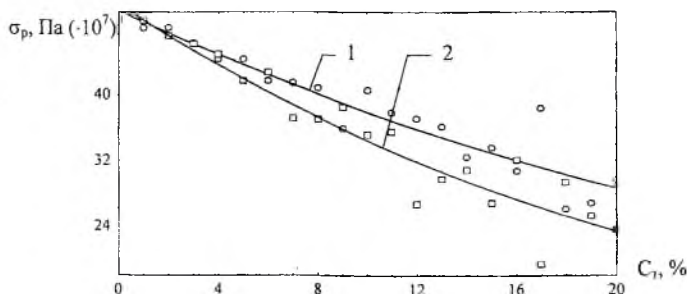


Рис.3.11. Зависимость напряжения при разрыве σ_p одиночной нити от коэффициента вариации по линейной плотности C_T при постоянной скорости нарастания нагрузки
(1-нормальный закон распределения, 2- распределение Вейбулла)

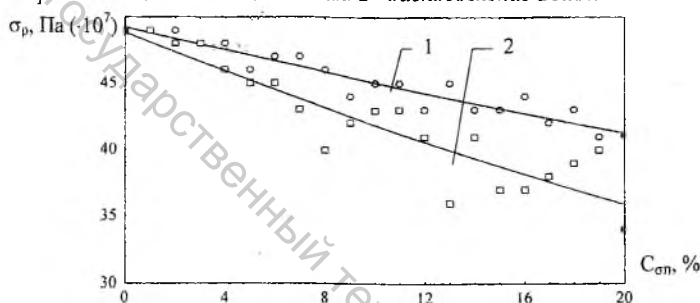


Рис.3.12. Зависимость напряжения при разрыве σ_p одиночной нити (волокна) от коэффициента вариации по условному пределу пластичности C_{σ_n} при постоянной скорости нарастания нагрузки
(1-нормальный закон распределения, 2- распределение Вейбулла)

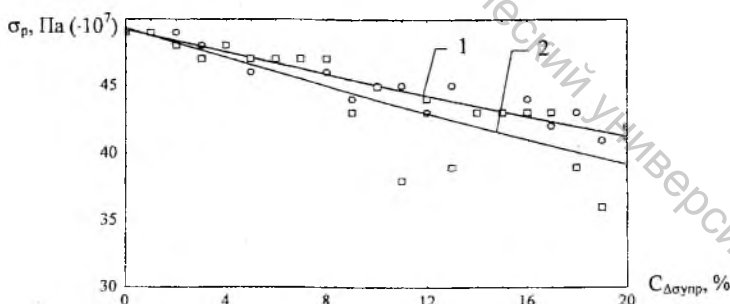


Рис.3.13. Зависимость напряжения при разрыве σ_p одиночной нити (волокна) от коэффициента вариации по условному пределу упрочнения $C_{\Delta\sigma_{упр}}$ при постоянной скорости нарастания нагрузки
(1-нормальный закон распределения, 2- распределение Вейбулла)

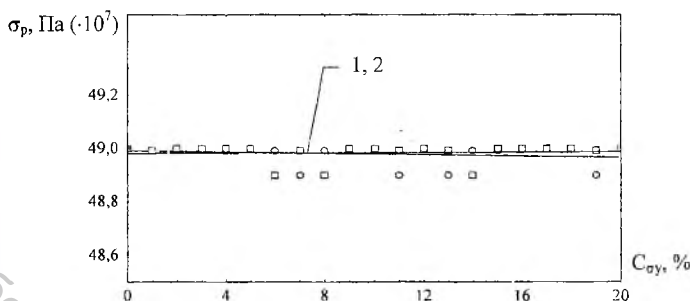


Рис.3.14. Зависимость напряжения при разрыве σ_p одиночной нити (волокна) от коэффициентов вариации по условному пределу упругости $C_{\sigma y}$ (1) и относительному разрывному удлинению $C_{\epsilon p}$ (2) при постоянной скорости нарастания нагрузки.

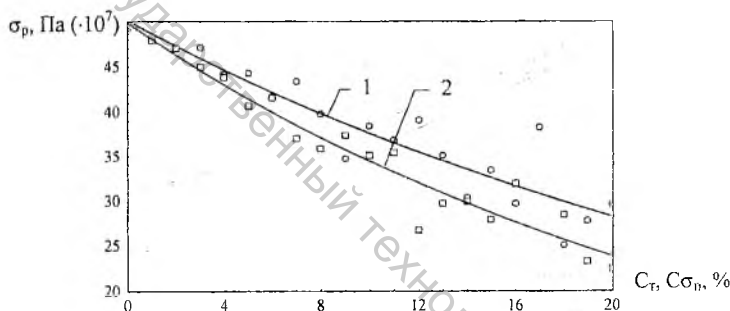


Рис.3.15. Зависимость напряжения при разрыве одиночной нити (волокна) при совместном влиянии вариации по линейной плотности C_T и условному пределу пластичности $C_{\sigma p}$ при постоянной скорости нарастания нагрузки (1-нормальный закон распределения, 2-распределение Вейбулла)

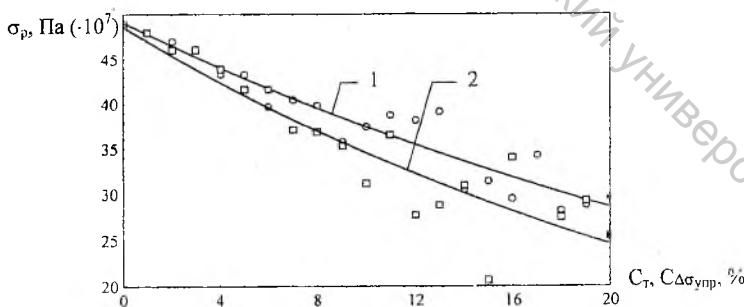


Рис.3.16. Зависимость напряжения при разрыве одиночной нити при совместном влиянии вариации по линейной плотности C_T и условному пределу упругости $C_{\Delta\sigma_{упр}}$ при постоянной скорости нарастания нагрузки (1-нормальный закон распределения, 2-распределение Вейбулла)

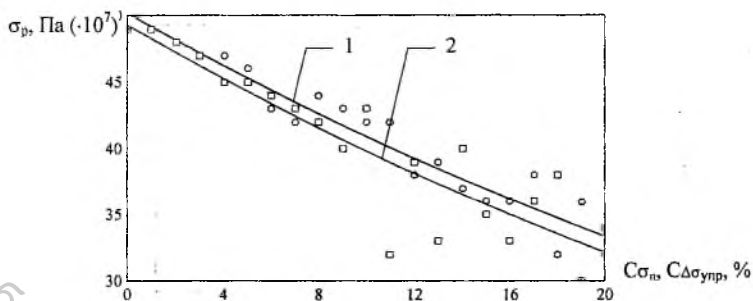


Рис.3.17. Зависимость напряжения при разрыве одиночной нити (волокна) при совместном влиянии вариации по условному пределу пластичности $C\sigma_{п}$ и условному пределу упрочнения $C\Delta\sigma_{упр}$ при постоянной скорости нарастания нагрузки (1-нормальный закон распределения, 2- распределение Вейбулла

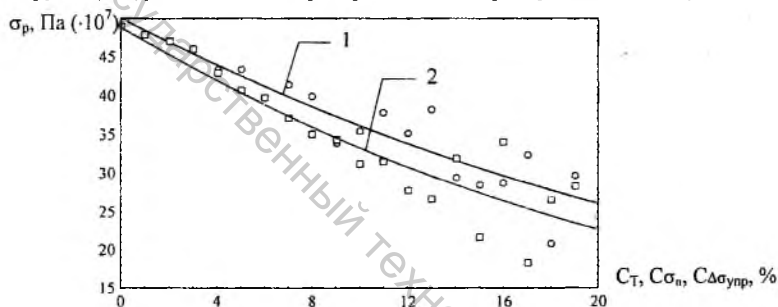


Рис.3.18. Зависимость напряжения при разрыве одиночной нити (волокна) при совместном влиянии вариации по условному пределу пластичности $C\sigma_{п}$, линейной плотности C_T и условному пределу упрочнения $C\Delta\sigma_{упр}$ при постоянной скорости нарастания нагрузки

(1-нормальный закон распределения, 2- распределение Вейбулла

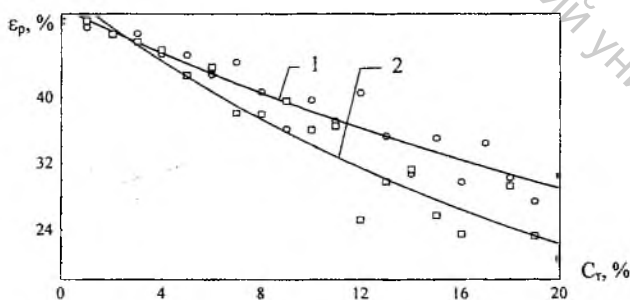


Рис.3.19. Зависимость относительного разрывного удлинения ϵ_p одиночной нити (волокна) от коэффициента вариации по линейной плотности C_T при постоянной скорости нарастания нагрузки.

(1-нормальный закон распределения, 2-распределение Вейбулла)

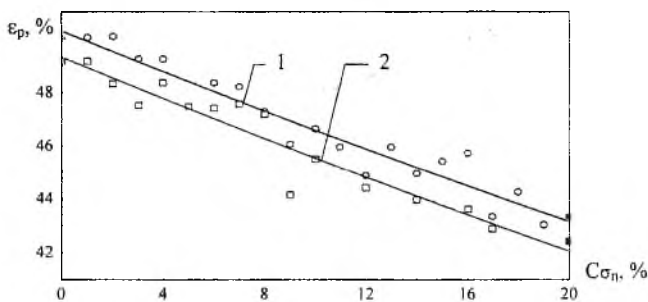


Рис.3.20. Зависимость относительного разрывного удлинения ε_p одиночной нити (волокна) от коэффициента вариации по условному пределу пластичности $C\sigma_n$ при постоянной скорости нарастания нагрузки. (1-нормальный закон распределения, 2-распределение Вейбулла)

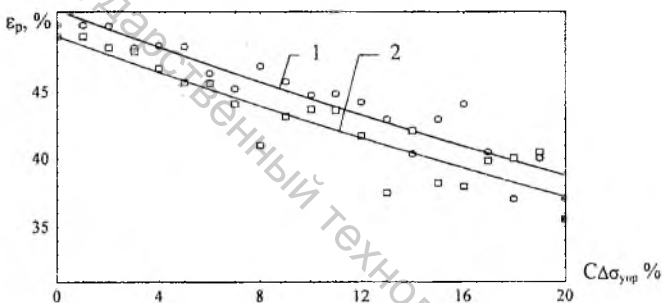


Рис.3.21. Зависимость относительного разрывного удлинения ε_p одиночной нити (волокна) от коэффициента вариации по условному пределу упрочнения $C\Delta\sigma_{упр}$ при постоянной скорости нарастания нагрузки. (1-нормальный закон распределения, 2-распределение Вейбулла)

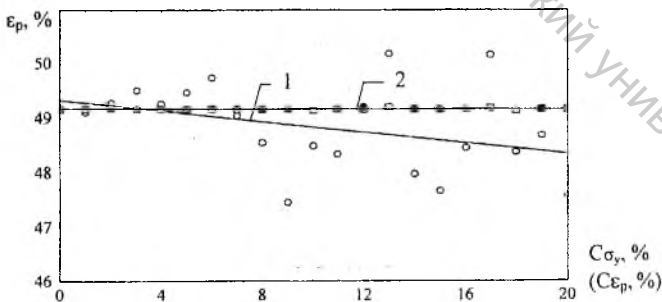


Рис.3.22. Зависимость относительного разрывного удлинения ε_p одиночной нити (волокна) от коэффициентов вариации по относительному разрывному удлинению $C\varepsilon_p$ (кривая 1) и условному пределу упругости $C\sigma_y$ (кривая 2) при постоянной скорости нарастания нагрузки.

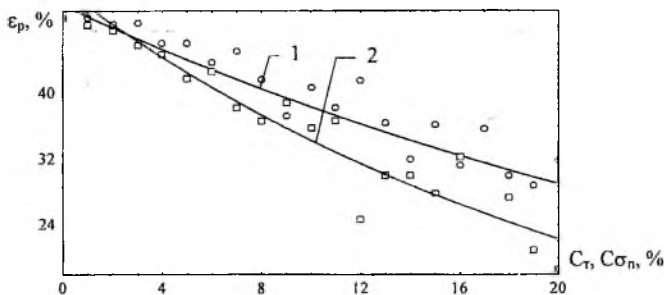


Рис.3.23. Зависимость относительного разрывного удлинения ϵ_r одиночной нити (волокна) от коэффициентов вариации по линейной плотности C_T и условному пределу пластичности $C\sigma_n$ при постоянной скорости нарастания нагрузки. (1-нормальный закон распределения, 2-распределение Вейбулла)

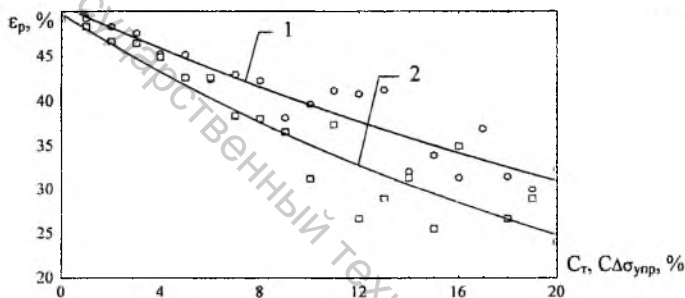


Рис.3.24. Зависимость относительного разрывного удлинения ϵ_r одиночной нити (волокна) от коэффициентов вариации по линейной плотности C_T и условному пределу упрочнения $C\Delta\sigma_{упр}$ пластичности при постоянной скорости нарастания нагрузки.

(1-нормальный закон распределения, 2-распределение Вейбулла)

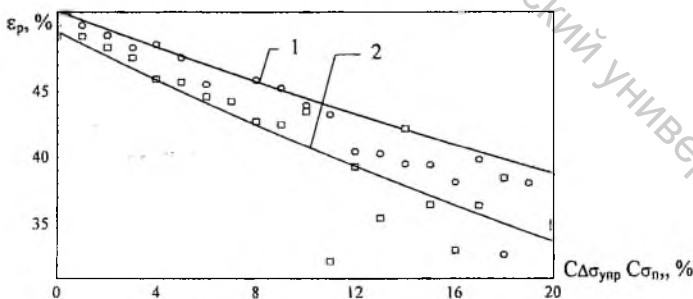


Рис.3.25. Зависимость относительного разрывного удлинения ϵ_r одиночной нити (волокна) от коэффициентов вариации по условному пределу упрочнения $C\Delta\sigma_{упр}$ и условному пределу пластичности $C\sigma_n$ при постоянной скорости нарастания нагрузки.

(1-нормальный закон распределения, 2-распределение Вейбулла)

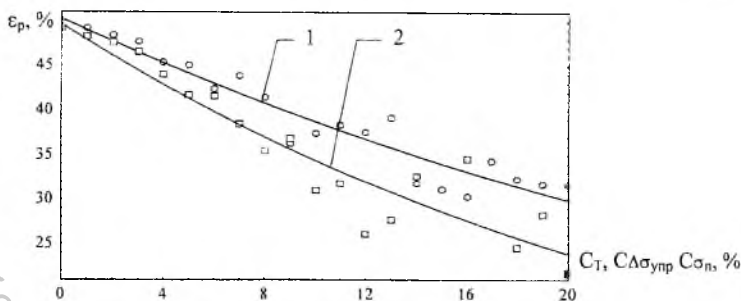


Рис.3.26. Зависимость относительного разрывного удлинения ϵ_r одиночной нити (волокна) от коэффициентов вариации по линейной плотности C_T , условному пределу упрочнения $C\Delta\sigma_{упр}$ и условному пределу пластичности $C\sigma_n$, при постоянной скорости нарастания нагрузки.
(1-нормальный закон распределения, 2-распределение Вейбулла)

- к основным свойствам одиночной нити, вариации по которым приводят к закономерному снижению среднего значения разрывного удлинения ϵ_r , следует отнести следующие: линейную плотность нити T , условный предел упрочнения $\Delta\sigma_{упр}$ и условный предел пластичности σ_n ;
- нестабильность относительного разрывного удлинения ϵ_r и условного предела упругости σ_e , как показывают результаты проведенного имитационного моделирования, не оказывает влияния на среднее значение относительного разрывного удлинения ϵ_r .

Установлено, что на предел прочности существенное влияние оказывают условия проведения испытаний (рис. 3.27) и вид сеанса моделирования (рис.3.28). Следовательно, реализации исследуемых показателей, полученных в результате имитационного моделирования испытания, необходимо рассматривать как некоторую случайную функцию $^{(s)}\sigma_p(C)$, либо $^{(s)}\epsilon_r(C)$ от вариации по исследуемому свойству нити. После представления функции $^{(s)}\sigma_p(C)$ ($^{(s)}\epsilon_r(C)$) в структурном виде и анализа реализации выбор методики выделения функции исследуемого показателя (напряжения при разрыве σ_p , относительного разрывного удлинения ϵ_r) осуществлялся на основе анализа задач, решаемых в ходе проведения исследований.

Применение полной системы ортогональных функций для выделения тренда параметра не позволяет сопоставлять результаты, полученные посредством имитационного моделирования.

Вследствие этого, на основании анализа реализаций $^{(s)}\sigma_p(C_j)$ и $^{(s)}\epsilon_r(C_j)$, полученных на базе разработанной имитационной модели и представленных на рис.3.11–3.26, для аналитического описания функции тренда

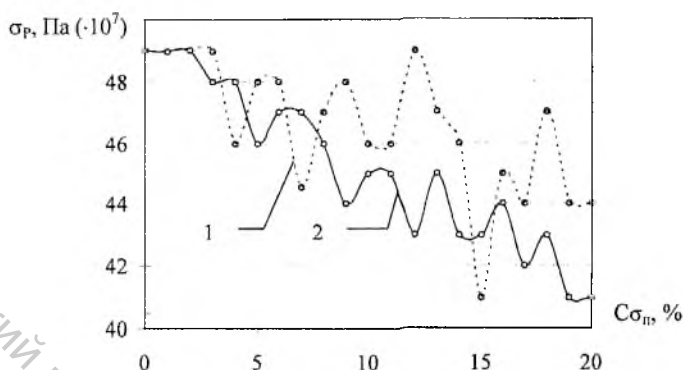


Рис.3.27. Реализация напряжения при разрыве σ_p одиночной нити при изменении нестабильности по условному пределу пластичности $C\sigma_n$ для различных значений q количества структурных элементов при постоянстве скорости нарастания удлинения (1- реализация $\sigma_p(C\sigma_n)$ при $q=5$, 2- реализация $\sigma_p(C\sigma_n)$ при $q=50$)

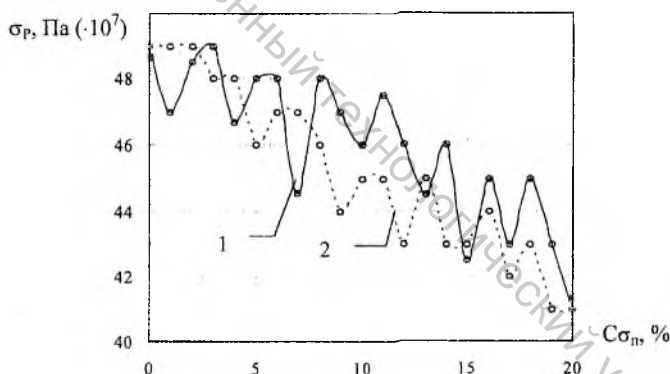


Рис.3.28. Реализация напряжения при разрыве σ_p одиночной нити при изменении нестабильности по условному пределу пластичности $C\sigma_n$ для различных видов сеанса моделирования при постоянной скорости нарастания нагрузки. (1-реализация $\sigma_p(C\sigma_n)$ при единичном сеансе ($m=1$)), 2 – реализация $\sigma_p(C\sigma_n)$ при групповом сеансе($m=50$))

прочностных показателей при наличии различных вариаций была предложена обобщенная математическая модель следующего вида:

$$\eta_{\sigma}(C_j) = \bar{\sigma}_{p0} \cdot \exp[-K_{\sigma} \cdot C_j], \quad (3.11)$$

где $\eta_0(C_j)$ – функция тренда напряжения при разрыве или относительного разрывного удлинения;

$\bar{\sigma}_p(C \rightarrow 0) = \bar{\sigma}_{p0}$ – среднее значение напряжения при разрыве или относительного разрывного удлинения одиночной нити при отсутствии вариаций по различным свойствам;

C_j – коэффициент вариации по исследуемому свойству;

K_σ – параметр модели, характеризующий темп уменьшения напряжения при разрыве или относительного разрывного удлинения одиночной нити при увеличении коэффициента вариации по исследуемому свойству.

Применение математической модели (3.11) позволит не только достоверно описать влияние различных вариаций на прочностные показатели, но также и сопоставить результаты данного влияния.

Следовательно, появляется реальная возможность классификации различных нестабильностей по степени оказываемого влияния на напряжения при разрыве $\bar{\sigma}_p$ и относительное разрывное удлинение $\bar{\epsilon}_p$ не только на качественном уровне, на что указывалось в предварительных выводах, но и на количественном. Использование математической модели типа (3.11) позволяет провести анализ совместного влияния различных вариаций на исследуемый показатель. Параметром математической модели (3.11), который позволяет провести количественное сопоставление результатов имитационного моделирования, является темп уменьшения исследуемого показателя прочности K_σ .

Решение задачи определения параметров математической модели (3.11) осуществлялось на основе общеизвестного подхода [14] посредством линеаризации функции тренда исследуемого показателя.

Параметры математической модели (3.11), характеризующие влияние различных вариаций по механическим свойствам на показатели прочности, определенные на основе подхода [14], представлены в табл.3.1–3.4. В данных таблицах сведены параметры математической модели (3.11), описывающей совместное влияние различных нестабильностей на показатели прочности одиночной нити.

В результате проведения имитационного моделирования процесса испытания на растяжение одиночной нити, результаты которого графически и аналитически представлены на рис.3.11–3.26 и табл.3.1.–3.4, установлено следующее:

- Асимметрия закона распределения, отражающая смещение моды относительно среднего значения, существенно влияет на закономерность уменьшения среднего значения напряжения при разрыве $\bar{\sigma}_p$ и относительного разрывного удлинения $\bar{\epsilon}_p$.

Таблица 3.1

Параметры математической модели (3.11), описывающей влияние различных вариаций по механическим свойствам на напряжение при разрыве "синтезированной" одиночной нити при постоянной скорости нарастания нагрузки

Вариации по исследуемым механическим свойствам «синтезированной» одиночной нити	Среднее значение напряжения при разрыве при отсутствии вариаций по механическим свойствам $\sigma_{\text{ср}}$, ($\cdot 10^7$) Па		Темп уменьшения напряжения при разрыве $K_{\sigma} \cdot 10^{-2}$, 1/%		Величина достоверности модели R^2	
	нормальное распределение	распределение Вейбула	нормальное распределение	распределение Вейбула	нормальное распределение	распределение Вейбула
Вариация по линейной плотности C_T	50,14	50,93	2,90	3,90	0,96	0,94
Вариация по условному пределу пластичности $C_{\sigma n}$	49,25	48,86	0,89	0,88	0,94	0,92
Вариация по условному пределу упрочнения $C_{\Delta \sigma_{упр}}$	49,23	49,35	0,88	1,15	0,95	0,92
Вариация по относительному разрывному удлинению C_{ϵ_r}	48,98	48,99	$\approx 4 \cdot 10^{-5}$	$\approx 5 \cdot 10^{-6}$	0,95	0,94
Вариация по условному пределу упругости C_{σ_y}	48,99	49,01	$\approx 2 \cdot 10^{-3}$	$\approx 1 \cdot 10^{-5}$	0,94	0,92
Вариация по линейной плотности C_T и условному пределу пластичности $C_{\sigma n}$	50,32	50,56	2,94	3,98	0,95	0,91
Вариация по линейной плотности C_T и условному пределу упрочнения $C_{\Delta \sigma_{упр}}$	49,29	49,36	2,76	3,73	0,96	0,93
Вариация по условному пределу пластичности $C_{\sigma n}$ и условному пределу упрочнения $C_{\Delta \sigma_{упр}}$	49,96	49,35	1,98	2,14	0,95	0,92
Вариация по линейной плотности C_T , условному пределу пластичности $C_{\sigma n}$ и условному пределу упрочнения $C_{\Delta \sigma_{упр}}$	50,34	48,99	3,36	3,85	0,96	0,92

Таблица 3.2

Параметры математической модели (3.11), описывающей совместное влияние различных вариаций по механическим свойствам на относительное разрывное удлинение "синтезированной" одиночной нити при постоянной скорости нарастания нагрузки

Вариации по исследуемым механическим свойствам «синтезированной» одиночной нити	Среднее значение разрывного удлинения при отсутствии вариаций по механическим свойствам ε_{p0} , %		Темп уменьшения разрывного удлинения $K\varepsilon \cdot 10^{-2}, 1/\%$		Величина достоверности модели R^2	
	нормальное распределение	распределение Вейбула	нормальное распределение	распределение Вейбула	нормальное распределение	распределение Вейбула
Вариация по линейной плотности C_T	50,71	51,26	2,80	4,90	0,91	0,90
Вариация по условному пределу пластичности $C_{\sigma n}$	50,28	49,48	0,77	0,93	0,92	0,91
Вариация по условному пределу упрочнения $C_{\Delta \sigma_{упр}}$	51,11	49,16	1,38	1,39	0,91	0,89
Вариация по относительному разрывному удлинению ε_p	50,14	49,33	$\approx 7 \cdot 10^{-5}$	$\approx 2 \cdot 10^{-3}$	0,89	0,88
Вариация по условному пределу упругости $C_{\sigma y}$	50,23	49,17	$\approx 5 \cdot 10^{-4}$	$\approx 2 \cdot 10^{-6}$	0,92	0,90
Вариация по линейной плотности C_T и условному пределу пластичности $C_{\sigma n}$	51,71	51,53	2,69	4,89	0,91	0,90
Вариация по линейной плотности C_T и условному пределу упрочнения $C_{\Delta \sigma_{упр}}$	50,61	51,24	2,45	4,1	0,91	0,89
Вариация по условному пределу пластичности $C_{\sigma n}$ и условному пределу упрочнения $C_{\Delta \sigma_{упр}}$	51,45	50,03	1,84	2,04	0,94	0,92
Вариация по линейной плотности C_T , условному пределу пластичности $C_{\sigma n}$ и условному пределу упрочнения $C_{\Delta \sigma_{упр}}$	50,26	51,93	2,6	4,74	0,88	0,90

Таблица 3.3

Параметры математической модели (3.11), описывающей влияние различных вариаций по механическим свойствам на напряжение при разрыве "синтезированной" одиночной нити при постоянной скорости нарастания удлинения

Вариации по исследуемым механическим свойствам «синтезированной» одиночной нити	Среднее значение напряжения при разрыве при отсутствии вариаций по механическим свойствам σ_{pc} , ($\cdot 10^7$) Па		Темп уменьшения напряжения при разрыве $K_{\sigma} \cdot 10^{-2}$, 1/%		Величина достоверности модели R^2	
	нормальное распределение	распределение Вейбула	нормальное распределение	распределение Вейбула	нормальное распределение	распределение Вейбула
Вариация по линейной плотности C_T	51,39	53,25	2,78	4,06	0,92	0,90
Вариация по условному пределу пластичности $C_{\sigma n}$	50,22	50,34	0,91	1,05	0,90	0,89
Вариация по условному пределу упрочнения $C_{\Delta \sigma_{упр}}$	50,58	52,14	1,45	3,63	0,88	0,89
Вариация по линейной плотности C_T и условному пределу пластичности $C_{\sigma n}$	50,26	52,58	2,81	3,96	0,91	0,91
Вариация по линейной плотности C_T и условному пределу упрочнения $C_{\Delta \sigma_{упр}}$	50,58	52,79	2,77	3,91	0,93	0,92
Вариация по условному пределу пластичности $C_{\sigma n}$ и условному пределу упрочнения $C_{\Delta \sigma_{упр}}$	50,18	50,98	1,65	2,01	0,91	0,90
Вариация по линейной плотности C_T , условному пределу пластичности $C_{\sigma n}$ и условному пределу упрочнения $C_{\Delta \sigma_{упр}}$	49,64	52,66	2,67	4,09	0,94	0,91

Параметры математической модели (3.11), описывающей совместное влияние различных вариаций по механическим свойствам на относительное разрывное удлинение "синтезированной" одиночной нити при постоянной скорости нарастания удлинения

Вариации по исследуемым механическим свойствам «синтезированной» одиночной нити	Среднее значение разрывного удлинения при отсутствии вариаций по механическим свойствам $\varepsilon_{\text{р}}$, %		Темп уменьшения разрывного удлинения $K\varepsilon \cdot 10^{-2}, 1/\%$		Величина достоверности модели R^2	
	нормальное распределение	распределение Вейбула	нормальное распределение	распределение Вейбула	нормальное распределение	распределение Вейбула
Вариация по линейной плотности C_T	51,69	52,69	2,61	3,47	0,89	0,90
Вариация по условному пределу пластичности $C_{\text{пп}}$	50,26	50,37	0,79	0,93	0,91	0,93
Вариация по условному пределу упрочнения $C_{\text{доупр}}$	50,72	52,12	1,32	1,91	0,93	0,94
Вариация по линейной плотности C_T и условному пределу пластичности $C_{\text{пп}}$	51,49	52,07	2,71	3,53	0,91	0,92
Вариация по линейной плотности C_T и условному пределу упрочнения $C_{\text{доупр}}$	51,08	52,96	2,72	3,75	0,89	0,91
Вариация по условному пределу пластичности $C_{\text{пп}}$ и условному пределу упрочнения $C_{\text{доупр}}$	50,11	51,08	1,51	1,81	0,94	0,93
Вариация по линейной плотности C_T , условному пределу пластичности $C_{\text{пп}}$ и условному пределу упрочнения $C_{\text{доупр}}$	50,89	52,29	2,86	3,72	0,92	0,92

Смещение моды закона распределения показателей механических свойств в сторону больших значений (закон распределения Вейбулла) приводит к увеличению темпа уменьшения среднего значения напряжения при разрыве $\bar{\sigma}_r$ и относительного разрывного удлинения ε_r (рис.3.11 – рис.3.26) по сравнению с симметричным (нормальным) распределением.

- Вариация механических свойств и структуры одиночной нити приводит к закономерному снижению средних значений показателей, характеризующих прочностные свойства. Наиболее значимыми характеристиками нити, нестабильность по которым оказывает существенное влияние на среднее значение напряжения при разрыве, являются: **линейная плотность T** (при постоянстве скорости нарастания нагрузки – $K\sigma_T = 2,9 \cdot 10^{-2}$ – при нормальном распределении, $K\sigma_T = 3,9 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла; при постоянстве скорости нарастания удлинения – $K\sigma_T = 2,78 \cdot 10^{-2}$ – при нормальном распределении, $K\sigma_T = 4,06 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла), **условный предел упрочнения $\Delta\sigma_{упр}$** (при постоянстве нарастания нагрузки – $K\Delta\sigma_{упр} = 0,88 \cdot 10^{-2}$ – при нормальном распределении, $K\Delta\sigma_{упр} = 1,15 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла; при постоянстве нарастания удлинения – $K\Delta\sigma_{упр} = 1,45 \cdot 10^{-2}$ – при нормальном распределении, $K\Delta\sigma_{упр} = 3,63 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла), **условный предел пластичности σ_n** (при постоянстве скорости нарастания нагрузки – $K\sigma_n = 0,88 \cdot 10^{-2}$ – при нормальном распределении, $K\sigma_n = 0,89 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла; при постоянстве скорости нарастания удлинения – $K\sigma_n = 0,91 \cdot 10^{-2}$ – при нормальном распределении, $K\sigma_n = 1,05 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла). Вариации по относительному разрывному удлинению ε_r ($K\varepsilon_r \approx (0,5-4) \cdot 10^{-7}$) и условному пределу упругости σ_y ($K\sigma_y \approx (0,01-2) \cdot 10^{-5}$) не приводят к изменению напряжения при разрыве нити.
- Отсутствие влияния коэффициента вариации по относительному разрывному удлинению $C\varepsilon_r$ на напряжение при разрыве σ_r объясняется допущением о том, что относительное разрывное удлинение ε_r и предел прочности σ_r являются независимыми случайными величинами (корреляционная связь отсутствует) [10]. С другой, стороны зависимость предела прочности σ_r от вариации условных пределов пластичности σ_n и упрочнения $\Delta\sigma_{упр}$ можно объяснить взаимосвязью данных показателей и напряжения при разрыве ($\sigma_r = \sigma_n + \Delta\sigma_{упр}$).
- Наиболее значимыми свойствами нити, нестабильность по которым оказывает существенное влияние на среднее значение относительного разрывного удлинения, являются: **линейная плотность нити T** (при постоянстве скорости нарастания нагрузки – $K\varepsilon_T = 2,8 \cdot 10^{-2}$ — при нор-

мальном распределении, $K_{\varepsilon_r} = 4,9 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла; при постоянстве скорости нарастания удлинения – $K_{\varepsilon_r} = 2,61 \cdot 10^{-2}$ – при нормальном распределении, $K_{\varepsilon_r} = 3,47 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла), **условный предел упрочнения** $\Delta\sigma_{упр}$ (при постоянстве скорости нарастания нагрузки – $K_{\varepsilon_{\Delta\sigma_{упр}}} = 1,38 \cdot 10^{-2}$ – при нормальном распределении, $K_{\varepsilon_{\Delta\sigma_{упр}}} = 1,39 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла; при постоянстве скорости нарастания удлинения – $K_{\varepsilon_{\Delta\sigma_{упр}}} = 1,32 \cdot 10^{-2}$ – при нормальном распределении, $K_{\varepsilon_{\Delta\sigma_{упр}}} = 1,91 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла) и **условный предел пластичности** σ_n (при постоянстве скорости нарастания нагрузки – $K_{\varepsilon_{\sigma_n}} = 0,77 \cdot 10^{-2}$ – при нормальном распределении, $K_{\varepsilon_{\sigma_n}} = 0,93 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла; при постоянстве скорости нарастания удлинения – $K_{\varepsilon_{\sigma_n}} = 0,79 \cdot 10^{-2}$ – при нормальном распределении, $K_{\varepsilon_{\sigma_n}} = 0,93 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла;). Вариации по относительному разрывному удлинению ε_r ($K_{\varepsilon_{\varepsilon_r}} \approx (0,07-2) \cdot 10^{-5}$) и условному пределу упругости σ_y ($K_{\varepsilon_{\sigma_y}} \approx (0,02-5) \cdot 10^{-6}$) не оказывают влияния на относительное разрывное удлинение нити.

- При различных вариациях по механическим свойствам значения предела прочности $\bar{\sigma}_{p0}$ и относительного разрывного удлинения $\bar{\varepsilon}_{p0}$ практически не изменяются. Среднее значение разброса значений $\bar{\sigma}_{p0}$ и $\bar{\varepsilon}_{p0}$ при вариациях по различным свойствам не превышает 1.5%.
- При совместном влиянии вариаций по различным свойствам не происходит изменения характера зависимости предела прочности и относительного разрывного удлинения от параметров нестабильности. Влияние отдельных параметров при их случайном одновременном изменении не суммируется. Темп уменьшения показателей прочности при влиянии вариаций практически не изменяется относительно параметра K_{σ} для вариации по наиболее значимому свойству.

Подводя итоги работы, результаты которой представлены в данном параграфе, можно отметить, что:

1. установлена закономерность влияния продольной гетерогенности строения и механических свойств на характеристики кривой «напряжение – относительное удлинение» (с увеличением степени указанной неравномерности закономерно снижаются разрывное напряжение и относительное удлинение);
2. установлено, что наибольшее влияние на напряжение при разрыве оказывают неравномерности по линейной плотности и разрывному напряжению;
3. показано, что наиболее значимыми свойствами нити, нестабильность по которым существенно уменьшает относительное разрывное удли-

нение, являются: линейная плотность, напряжение при разрыве и условный предел пластичности;

4. проведено исследование случайного совместного влияния различных нестабильностей (строения, механических свойств нити) на форму и параметры кривой растяжения;
5. показано, что применение параметрического принципа оценки показателей, характеризующих качество текстильных материалов, для анализа реализации случайного значения исследуемого параметра позволяет достоверно провести анализ и сопоставление полученных результатов имитационного моделирования.

Проведенные исследования подтвердили высокую эффективность имитационного моделирования как метода исследования механических свойств текстильных материалов при полуцикловых испытаниях на растяжение. Результаты проведенных исследований можно рекомендовать для прогнозирования изменения прочностных показателей при наличии различных вариаций (неровноты) по механическим свойствам и строению текстильных нитей и волокон.

3.3. Исследование влияния поперечной гетерогенности структуры и механических свойств на показатели механических свойств текстильных материалов.

3.3.1. Имитационное моделирование процессов деформирования и разрушения пучка нитей при полцикловом испытании на растяжение

Как уже отмечалось в главе 2, разрывную нагрузку и удлинение при разрыве химических волокон определяют испытанием одиночных волокон на разрывных машинах, а разрывная нагрузка хлопкового волокна определяется испытанием на разрыв специально подготовленных пучков волокон. Разрывная нагрузка для одного волокна определяется моделью (2.11) [2]. В некоторых случаях рекомендуется определять разрывную нагрузку нитей (пряжи), также испытанием на одновременное растяжение группы образцов (2.12) [8]. В работе [49] проведено теоретическое исследование влияния продольной и поперечной неравномерности прочности нити на кривую растяжения. Авторы предлагают использовать понятие энтропии H , которая характеризует не только неравномерность каждого свойства, но и учитывает корреляцию между различными свойствами (например, разрывной нагрузкой P_r и разрывным удлинением l_p) отдельных нитей. Разработана сложная математическая модель зависимости текущего значения растягивающей силы P от удлинения l пучка нитей, которая учитывает условный закон распределения разрывного удлинения и среднюю функцию деформации волокон определенной группы. Но в работе не отмечено, как выбираются и какими параметрами характеризуются указанные закон распределения и функция деформации.

Кроме того, из приведенных в данной работе зависимостей можно сделать вывод, что разрывное удлинение нити линейно увеличивается с увеличением разрывной нагрузки. Однако, опубликованные в работе [11] результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что такое предположение не всегда является справедливым.

В работе [11] теоретически рассмотрен частный случай, когда растягивающая сила прямо пропорциональна удлинению с одинаковым для всех нитей коэффициентом пропорциональности, а разрывное удлинение распределено по нормальному закону. Кроме того, анализ работ [10–11, 49, 60] показывает, что влияние разнородности участков нитей между зажимами, вызванной различной степенью их извитости в пучке, авторами не учитывалась.

В данных исследованиях, основанных на методе имитационного моделирования полуволнового испытания на растяжение, исследуется самый общий случай испытания на растяжение пучка нитей, когда для каждой i -той нити в пучке из m элементов случайными величинами являются не только характеристики кривой растяжения, но и степень их извитости (или неоднородности) (рис.3.28).

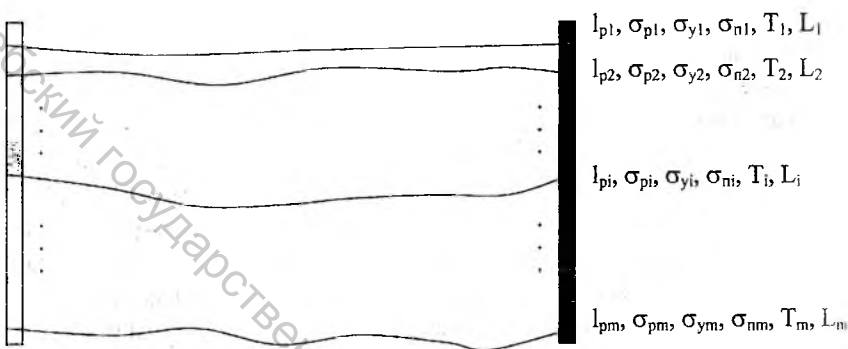


Рис.3.29. Схематическое представление пучка нитей (волокон), обладающих поперечной неравномерностью строения и механических свойств

В соответствии с моделью (2.19) для i -той нити пучка можно записать:

$$P_j = \frac{l_j}{C_{0i} + C_{1i} l_j} + C_{2i} l_j^2; \quad (3.12)$$

$$C_{0i} = \frac{l_{pi} \cdot \gamma}{\sigma_{yi} \cdot T_i \cdot 10^3}; \quad C_{1i} = \left(\frac{1}{\sigma_{ni}} - \frac{1}{\sigma_{yi}} \right) \cdot \frac{\gamma}{T_i \cdot 10^3}; \quad C_{2i} = \frac{(\sigma_{pi} - \sigma_{ni}) \cdot T_i \cdot 10^3}{l_{pi}^2 \cdot \gamma}, \quad (3.13)$$

где P_j – текущее значение растягивающей силы, Н;

l_j – текущее значение абсолютного удлинения нити, мм;

l_{pi} – абсолютное разрывное удлинение i -той нити, мм;

γ – плотность материала нити, кг/м³;

T_i – линейная плотность i -той нити пучка, текс;

σ_{ni} – условный предел пластичности i -той нити пучка, Па;

σ_{yi} – условный предел упругости i -той нити, Па;

σ_{pi} – разрывное напряжение i -той нити, Па;

Переменными случайными величинами для каждого i –той нити будут являться значения l_{pi} , T_i , σ_{pi} , σ_{yi} , σ_{ri} и ΔL_i .

На начальном этапе имитационного моделирования генератор случайных чисел, в соответствии с задаваемым законом распределения (нормальный либо Вейбулла), генерирует m (по числу нитей в пучке) случайных значений l_{pi} , T_i , $(\sigma_p - \sigma_n)_i$, σ_{yi} и L_i . Затем определяются параметры математической модели (3.12) C_{0i} , C_{1i} , C_{2i} и P_{pi} . Из всех нитей выбирается нить, обладающая минимальной длиной L_{min} , тогда каждой из остальных нитей будет соответствовать излишек длины ΔL_i , который определяется как $\Delta L_i = L_i - L_{min}$. Полученные значения параметров запоминаются.

Имитационное моделирование эксперимента состоит в том, что нижнему зажиму разрывной машины последовательно сообщается постоянное на каждом шаге перемещение, что вызывает удлинение Δl . Тогда удлинение на j -том шаге моделирования l_j будет, соответственно, определяться, как $l_j = j \cdot \Delta l$. На каждом j -том шаге для каждой i -той нити вычисляются абсолютное удлинение l_{ij} и, приложенная к данной нити, нагрузка P_{ij} :

$$l_{ij} = l_i - \Delta L_i = j \cdot \Delta l - \Delta L_i;$$

$$P_{ij} = \frac{l_{ij}}{C_{0i} + C_{1i} \cdot l_{ij}} + C_{2i} \cdot l_{ij}. \quad (3.14)$$

При выполнении условий:

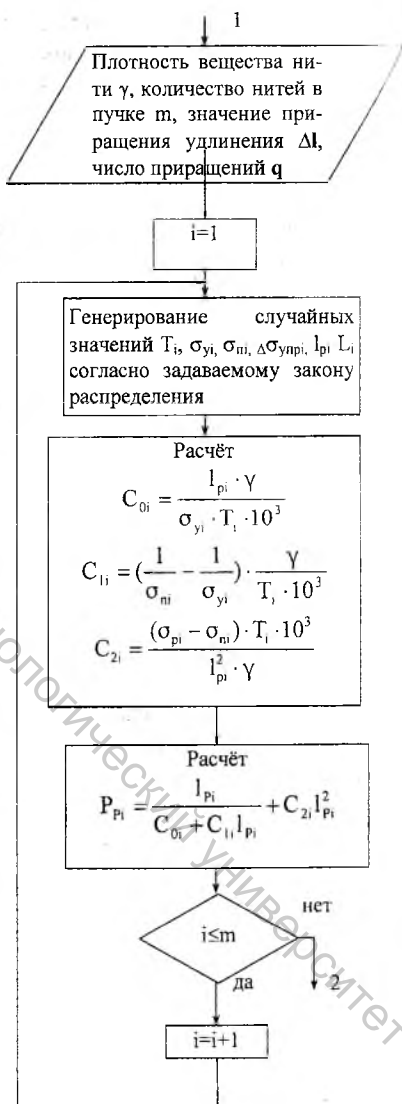
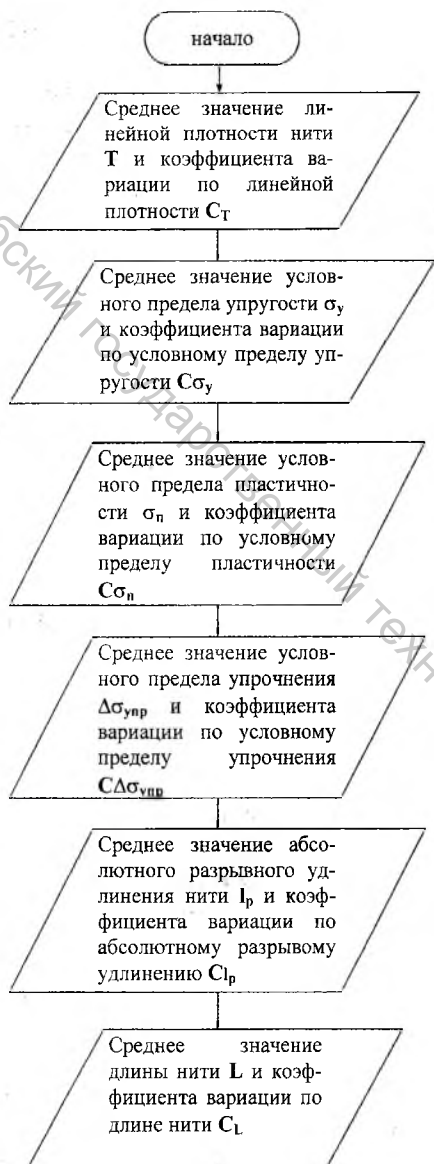
- $l_{ij} \leq 0$ (когда $\Delta L_i \leq j \cdot \Delta l$),
- $l_{ij} \geq l_{pi}$ или $P_{ij} > P_{pi}$,

соответствующая i -я нить считается разорванной и далее текущее значение нагрузки, приложенной к i -той нити, P_{ij} принимается равной нулю.

На каждом шаге моделирования определяется суммарная сила растяжения Q_j и средняя нагрузка, приходящаяся на одну нить $\bar{P}_j$:

$$Q_j = \sum_{i=1}^m P_{ij}; \quad \bar{P}_j = \frac{Q_j}{m}. \quad (3.15)$$

Результаты имитационного моделирования представляются в виде приведенных кривых растяжения пучка нитей в координатах «нагрузка – абсолютное удлинение». Схема алгоритма имитационной модели деформирования и разрушения пучка нитей при полуцикловом испытании на растяжение представлена на рис.3.30.



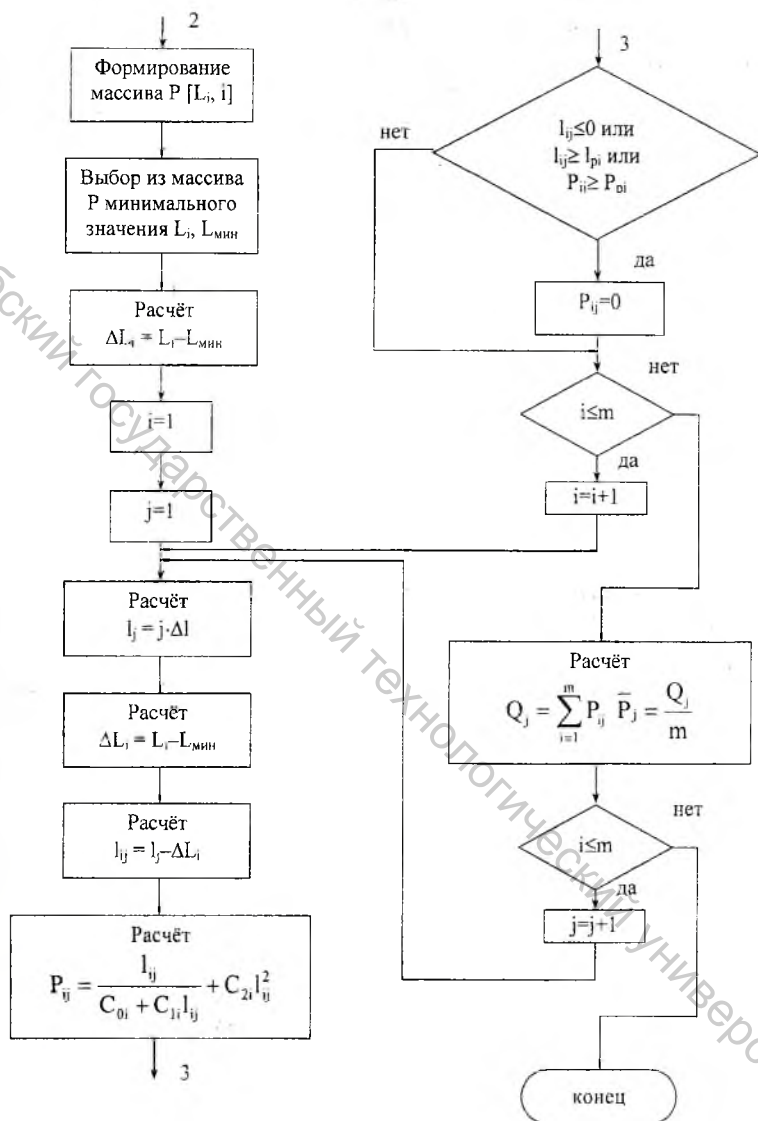


Рис.3.30. Схема алгоритма имитационной модели деформирования и разрушения пучка нитей (волокон) с поперечной гетерогенностью строения и механических свойств

Некоторые результаты имитационного моделирования для “синтезированной”, согласно [52, 57–59], нити представлены на рис.3.31–3.39. Численные значения показателей структуры и механических свойств “синтезированного” пучка нитей (волокон) принимались следующими:

- среднее значение условного предела упругости $\bar{\sigma}_y = 50$ МПа;
- среднее значение условного предела пластичности $\bar{\sigma}_n = 2$ МПа;
- среднее значение разрывного напряжения нитей $\bar{\sigma}_p = 5$ МПа;
- среднее значение абсолютного разрывного удлинения $\bar{l}_p = 10$ мм
- зажимная длина $L_0 = 20$ мм;
- отношение плотности вещества к линейной плотности нитей (волокон) пучка принималась равной $1/\bar{\gamma}T = 1 \text{ 1/м}^2$.

При проведении имитационного моделирования шаг приращения удлинения нитей (волокон) пучка составлял $\Delta l = 0,5$ мм, а количество нитей (волокон) m в пучке принималось равным 50.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 3.31 – 3.40., позволяет сделать следующие предварительные выводы:

- наибольшее влияние на форму, приведенной к одной нити кривой «нагрузка – абсолютное удлинение» оказывают вариации разрывного удлинения Cl_p (3.31) и степени извитости C_L (рис.3.32) нитей (волокон) пучка. С увеличением коэффициента вариации этих показателей между нитями (волокнами) пучка изменяется не только форма кривой растяжения, но и значение, и положение ее максимума, а также полное удлинение при разрыве;
- поперечная гетерогенность условного предела упругости σ_y , условного предела пластичности σ_n , условного предела упрочнения $\Delta\sigma_{упр}$ и линейной плотности T нитей (волокон) пучка не оказывают влияние на форму и параметры приведенной к одной нити кривой «нагрузка – абсолютное удлинение» (рис.3.33–3.35);
- при увеличении коэффициента вариации удлинения при разрыве Cl_p уменьшаются средние значения разрывной нагрузки и разрывного удлинения первой из разорвавшихся нитей (волокон). Следует отметить, увеличение отклонения от вертикальности нисходящей части кривой растяжения (рис. 3.30). Восходящая часть кривой растяжения практически не изменяется. Первые нити (волокна) в пучке начинают рваться при приближении кривой растяжения к максимуму, а нисходящая часть кривой растяжения становится более пологой

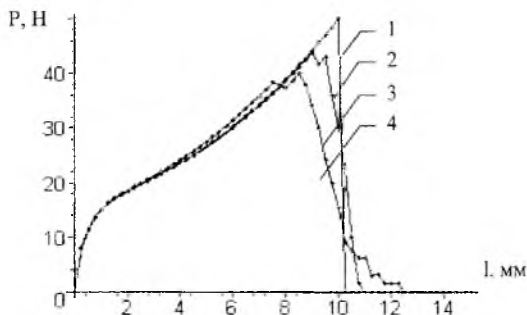


Рис.3.31. Влияние поперечной вариации разрывного удлинения нитей l_p в пучке на характеристики кривой «нагрузка – абсолютное удлинение»

1 – $C_{lp}=0\%$; 2 – $C_{lp}=5\%$; 3 – $C_{lp}=10\%$; 4 – $C_{lp}=15\%$.

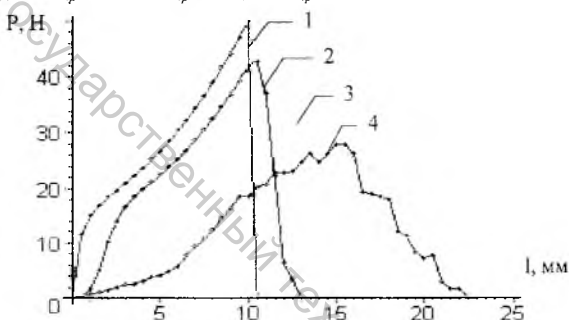


Рис.3.32. Влияние вариации степени извитости нитей L в пучке на характеристики кривой «нагрузка – абсолютное удлинение»

1 – $C_L=0\%$; 2 – $C_L=5\%$; 3 – $C_L=10\%$; 4 – $C_L=15\%$.

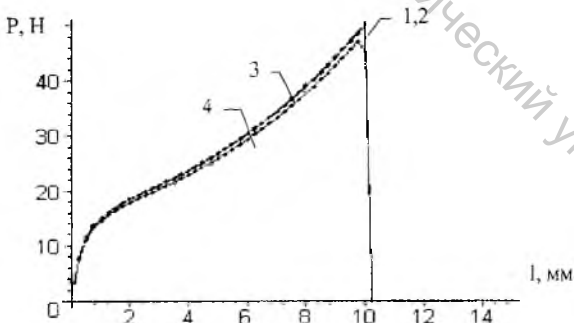


Рис.3.33. Влияние поперечной вариации линейной плотности нитей T в пучке на характеристики кривой «нагрузка – абсолютное удлинение»

1 – $C_T=0\%$; 2 – $C_T=10\%$; 3 – $C_T=20\%$; 4 – $C_T=30\%$.

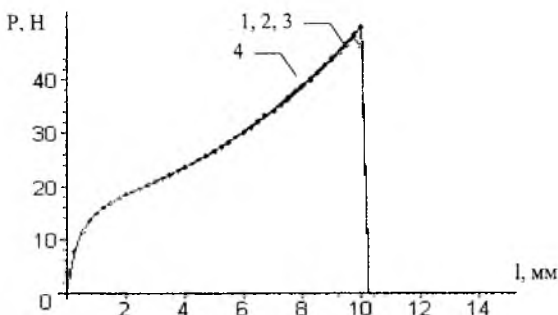


Рис.3.34. Влияние поперечной вариации условного предела упрочнения нитей $\Delta\sigma_{упр}$ в пучке на характеристики кривой «нагрузка – абсолютное удлинение»

1 – $C\Delta\sigma_{упр}=0\%$; 2 – $C\Delta\sigma_{упр}=10\%$; 3 – $C\Delta\sigma_{упр}=20\%$; 4 – $C\Delta\sigma_{упр}=30\%$.

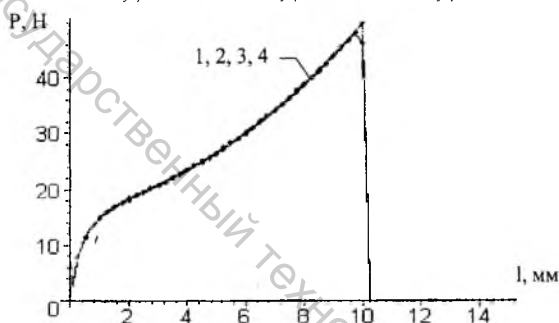


Рис.3.35. Влияние поперечной вариации условного предела пластичности нитей σ_n в пучке на характеристики кривой «нагрузка – абсолютное удлинение»

1 – $C\sigma_n=0\%$; 2 – $C\sigma_n=10\%$; 3 – $C\sigma_n=20\%$; 4 – $C\sigma_n=30\%$.

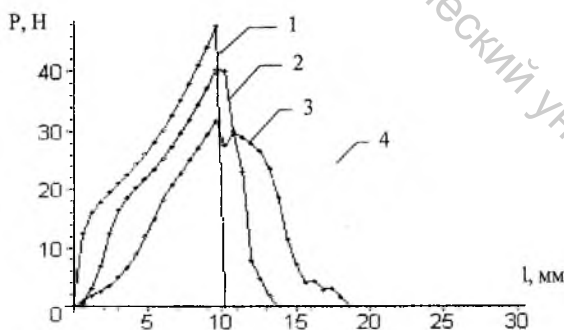


Рис.3.36. Совместное влияние поперечной вариации разрывного удлинения l_p и степени извитости L нитей в пучке на характеристики кривой «нагрузка – абсолютное удлинение»

1 – $C_{L, C_{lp}}=0\%$; 2 – $C_{L, C_{lp}}=5\%$; 3 – $C_{L, C_{lp}}=10\%$; 4 – $C_{L, C_{lp}}=15\%$.

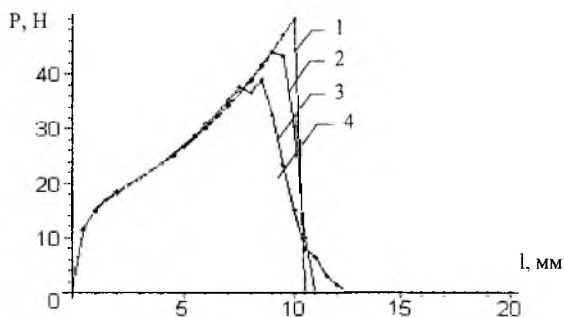


Рис.3.37. Совместное влияние поперечной вариации разрывного удлинения l_p и линейной плотности T нитей в пучке на характеристики кривой «нагрузка – абсолютное удлинение»

1 – $C_T, C_{lp}=0\%$; 2 – $C_T, C_{lp}=5\%$; 3 – $C_T, C_{lp}=10\%$; 4 – $C_T, C_{lp}=15\%$.

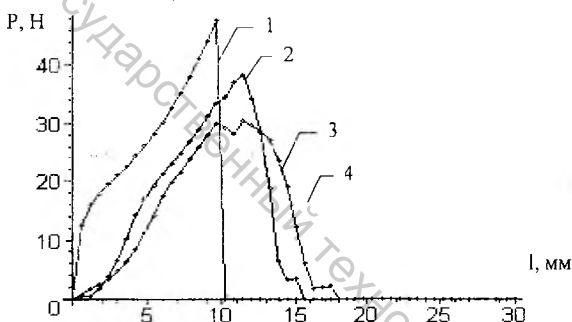


Рис.3.38. Совместное влияние вариации степени извитости L и линейной плотности T нитей в пучке на характеристики кривой «нагрузка – абсолютное удлинение»

1 – $C_T, C_L=0\%$; 2 – $C_T, C_L=5\%$; 3 – $C_T, C_L=10\%$; 4 – $C_T, C_L=15\%$.

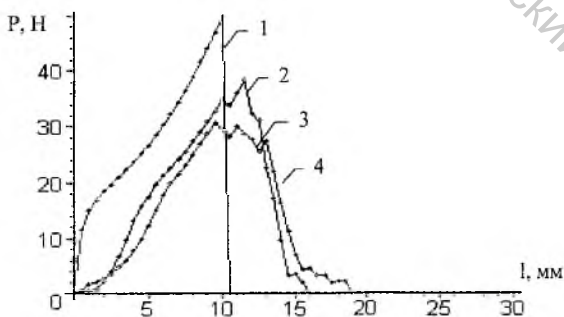


Рис.3.39. Совместное влияние поперечных вариаций разрывного удлинения l_p , линейной плотности T и степени извитости L нитей в пучке на характеристики кривой «нагрузка – абсолютное удлинение»

1 – $C_L, C_T, C_{lp}=0\%$; 2 – $C_L, C_T, C_{lp}=5\%$; 3 – $C_L, C_T, C_{lp}=10\%$; 4 – $C_L, C_T, C_{lp}=15\%$.

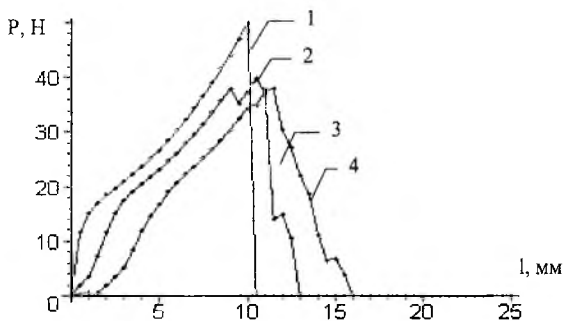


Рис. 3.40. Влияние количества нитей в пучке на характеристики кривой «нагрузка – абсолютное удлинение» при наличии вариаций разрывного удлинения l_p , линейной плотности T и степени извитости L нитей C_L , C_T , $C_p=5\%$

1 – C_L , C_T , $C_p=0\%$, $m=30$; 2 – C_L , C_T , $C_p=5\%$, $m=10$;

3 – C_L , C_T , $C_p=5\%$, $m=30$; 4 – C_L , C_T , $C_p=5\%$, $m=60$

Средний угол наклона ψ нисходящей части кривой растяжения к вертикали в первом приближении пропорционален коэффициенту вариации разрывного удлинения между нитями (волокнами) пучка:

$$C_{lp} \sim \psi^\circ; \quad (3.16)$$

- при увеличении коэффициента вариации извитости нитей (волокон) в пучке не только уменьшается разрывная нагрузка пучка нитей (волокон) и максимум сдвигается вправо, но изменяется форма как правой, так и левой части кривой растяжения (рис. 3.32). Угол наклона β касательной, проведенной из начала координат к левой, восходящей части кривой растяжения, к вертикали может служить приближенной оценкой коэффициента вариации извитости нитей C_L в пучке:

$$C_L \sim \beta^\circ; \quad (3.17)$$

Следует отметить, что математические модели (3.16) и (3.17) достоверны при достаточно большом количестве ($m \geq 50$) нитей в пучке, так как при малом их числе ($m \leq 10$) приведенная кривая растяжения несколько изменяет свою форму. Как это следует из зависимости, представленной на рис. 3.40, углы α и β несколько уменьшаются, а максимум силы растяжения незначительно сдвигается влево.

В результате проведенных исследований установлено, что анализ приведенной кривой растяжения пучка нитей (волокон) позволяет в первом приближении оценить коэффициенты вариации степени извитости C_L

и разрывного удлинения C_p нитей в пучке. Дальнейшие исследования в этом направлении позволят получить более точные и информативные модели. Таким образом, можно предположить, проведение стандартных испытаний, не требующих дополнительного специального оборудования, может значительно расширить диапазон полученных сведений и позволит более объективно и всесторонне оценить качество волокон и нитей.

3.3.2. Исследование влияния поперечной вариации показателей строения и механических свойств на прочностные характеристики пучка нитей (волокон).

Данные исследования проводились на основе предложенной в п.3.3.1 имитационной модели деформирования и разрушения пучка нитей (волокон). В качестве объекта исследования использована «синтезированная» нить, параметры которой определены в п.3.3.1. При проведении имитационного моделирования было принято допущение, что параметры пучка "синтезированных" нитей (волокон), характеризующие деформационные и прочностные свойства, являются независимыми случайными величинами и подчиняются нормальному закону распределения (или закону распределения Вейбулла). При этом параметры распределения Вейбулла определялись на основе совместного решения уравнений (3.9), (3.10).

В качестве прочностных показателей пучка нитей (волокон) при проведении исследований использовались:

- среднее значение разрывной нагрузки пучка нитей $\bar{P}_p$;
- среднее значение относительного удлинения, при котором происходит разрушение первой нити (волокна) пучка $\bar{\epsilon}_p$;
- среднее значение относительного удлинения, при котором происходит разрушение последней нити (волокна) пучка $\bar{\epsilon}_{pn}$, в дальнейшем полное относительное разрывное удлинение;

При исследовании влияния поперечной вариации показателей строения и механических свойств пучка нитей (волокон) на прочностные характеристики были поставлены следующие задачи:

- проведение комплексного анализа влияния различных вариаций показателей строения и механических свойств пучка нитей (волокон) на прочностные характеристики, и выделение наиболее значимых, с точки зрения влияния на данные показатели, вариаций по механическим свойствам;
- проведение анализа результатов совместного влияния наиболее значимых нестабильностей показателей строения и механических свойств

нитей (волокон) пучка на средние значения прочностных характеристик;

- разработка обобщенной математической модели, описывающей влияние различных поперечных вариаций по показателям строения и механических свойств на прочностные характеристики пучка нитей (волокон).

При проведении исследований шаг изменения коэффициента вариации по исследуемому показателю принимался равным 1%. На основании анализа результатов предварительных исследований, представленных на рис.3.31–3.40, установлено, что поперечная вариация условного предела упругости σ_y , условного предела пластичности σ_n , условного предела упругости $\Delta\sigma_{упр}$ и линейной плотности T нитей (волокон) пучка не влияют на прочностные характеристики.

Вследствие этого, исследования влияния вариаций указанных показателей на прочностные характеристики не проводилось.

Как уже отмечалось в п.3.2.2, исследуемые показатели прочности необходимо рассматривать как некоторую случайную функцию от вариации по исследуемому свойству нити. А выбор методики выделения функции тренда исследуемого показателя производить на основании анализа решаемых задач в ходе проведения имитационного моделирования. Анализ реализации показателей прочностных характеристик, представленных на рис. 3.41–3.49, а также исходя из решаемых задач в процессе проведения имитационного моделирования, для количественной оценки влияния поперечной гетерогенности структуры и показателей механических свойств на прочностные характеристики предлагается использовать следующие обобщенные модели:

$$\bar{P}_P(C_j) = \bar{P}_{P0} \cdot \exp[-K_{Pp} \cdot C_j], \quad (3.18)$$

где $\bar{P}_P(C_j)$ – функция тренда разрывной нагрузки пучка нитей (волокон), Н;
 $\bar{P}_P(C \rightarrow 0) = \bar{P}_{P0}$ – среднее значение разрывной нагрузки пучка нитей (волокон) при отсутствии поперечной гетерогенности механических свойств, Н;

$$\bar{\epsilon}_P(C_j) = \bar{\epsilon}_{P0} \cdot \exp[K_{\epsilon p} \cdot C_j], \quad (3.19)$$

где $\bar{\epsilon}_P(C_j)$ – функция тренда относительного разрывного удлинения нитей (волокон) пучка, %;

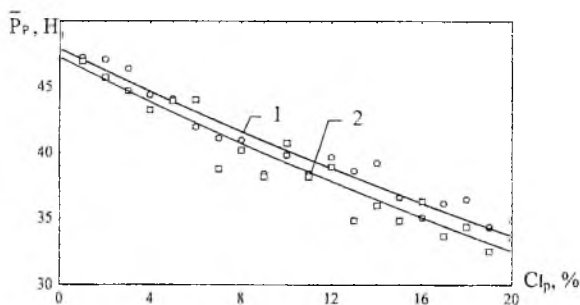


Рис.3.41. Зависимость среднего значения разрывной нагрузки пучка нитей (волокон) от коэффициента вариации по абсолютному разрывному удлинению Cl_p при отсутствии поперечных вариаций по другим свойствам.

1-нормальный закон распределения, 2- распределение Вейбулла

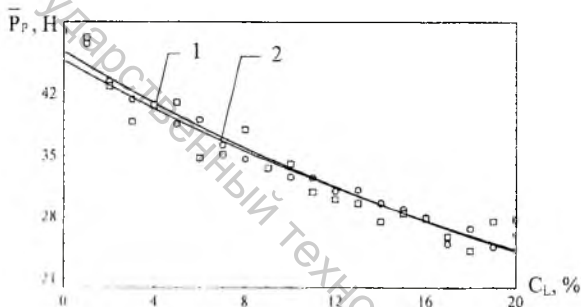


Рис.3.42. Зависимость среднего значения разрывной нагрузки пучка нитей (волокон) от коэффициента вариации по степени извитости CL при отсутствии поперечных вариаций по другим свойствам.

1-нормальный закон распределения, 2- распределение Вейбулла

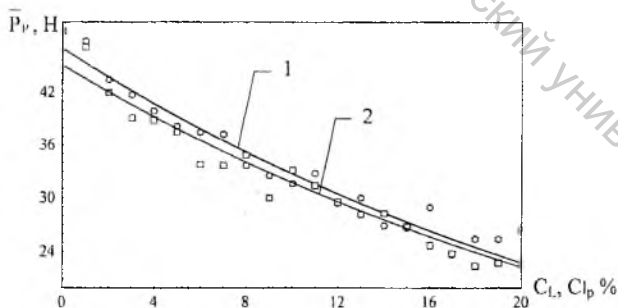


Рис.3.43. Зависимость среднего значения разрывной нагрузки пучка нитей (волокон) от коэффициентов вариации по степени извитости CL и абсолютному разрывному удлинению Cl_p при отсутствии поперечных вариаций по другим свойствам.

1-нормальный закон распределения, 2- распределение Вейбулла

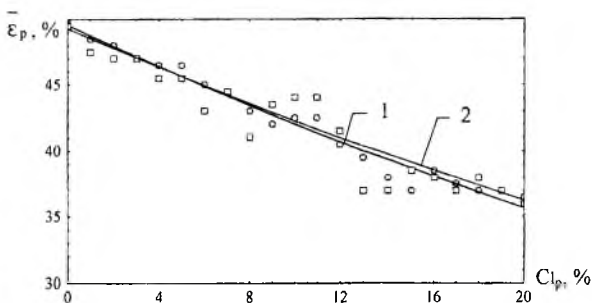


Рис.3.44. Зависимость среднего значения относительного разрывного удлинения пучка нитей (волокон) ε_p от коэффициента вариации по абсолютному разрывному удлинению Cl_p при отсутствии поперечных вариаций по другим свойствам.

1-нормальный закон распределения, 2-распределение Вейбулла

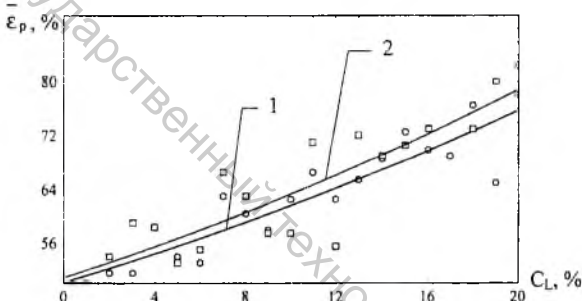


Рис.3.45. Зависимость среднего значения относительного разрывного удлинения пучка нитей (волокон) от коэффициента вариации по степени извитости Cl при отсутствии поперечных вариаций по другим параметрам.

1-нормальный закон распределения, 2-распределение Вейбулла

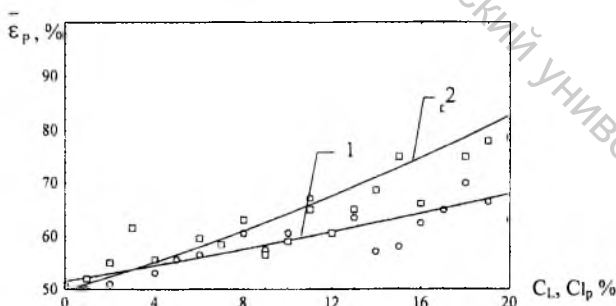


Рис.3.46. Зависимость среднего значения относительного разрывного удлинения пучка нитей (волокон) от коэффициентов вариации по степени извитости Cl и абсолютному разрывному удлинению Cl_p при отсутствии поперечных вариаций по другим параметрам.

1-нормальный закон распределения, 2-распределение Вейбулла

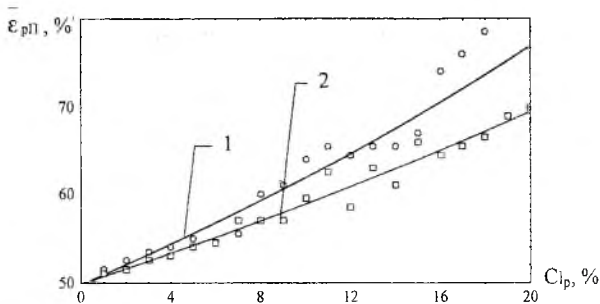


Рис.3.47. Зависимость среднего значения полного относительного разрывного удлинения пучка нитей (волокон) $E_{рп}$ от коэффициента вариации по абсолютному разрывному удлинению $C_{л}$ при отсутствии поперечных вариаций по другим параметрам.

1-нормальный закон распределения, 2- распределение Вейбулла

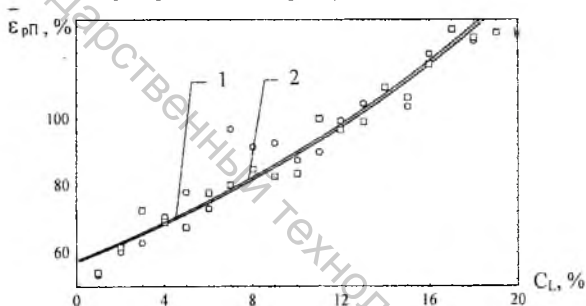


Рис.3.48. Зависимость среднего значения полного относительного разрывного удлинения пучка нитей (волокон) от коэффициента вариации по степени извитости $C_{л}$ при отсутствии поперечных вариаций по другим параметрам.

1-нормальный закон распределения, 2- распределение Вейбулла

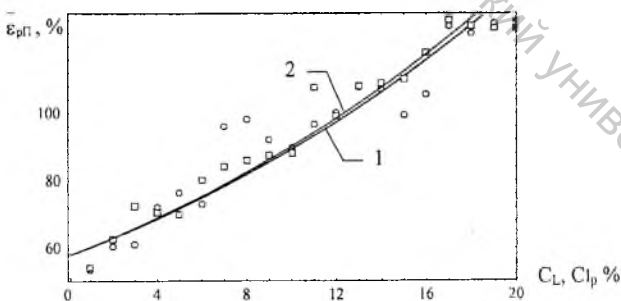


Рис.3.49. Зависимость полного относительного разрывного удлинения пучка нитей (волокон) от коэффициентов вариации по степени извитости $C_{л}$ и абсолютному разрывному удлинению $C_{лр}$ при отсутствии поперечных вариаций по другим параметрам.

1-нормальный закон распределения, 2- распределение Вейбулла

$\bar{\epsilon}_p(C \rightarrow 0) = \bar{\epsilon}_{p0}$ – среднее значение относительного разрывного удлинения нитей (волокон) пучка при отсутствии поперечной вариации механических свойств, %;

$$\bar{\epsilon}_{p\Pi}(C_j) = \bar{\epsilon}_{p\Pi 0} \cdot \exp[K_{\epsilon_{p\Pi}} \cdot C_j], \quad (3.20)$$

где $\bar{\epsilon}_{p\Pi}(C_j)$ – функция тренда полного относительного разрывного удлинения пучка нитей (волокон), %;

$\bar{\epsilon}_{p\Pi}(C \rightarrow 0) = \bar{\epsilon}_{p\Pi 0}$ – среднее значение полного относительного разрывного удлинения пучка нитей (волокон) при отсутствии поперечной вариации механических свойств, %;

C_j – коэффициент вариации по исследуемому свойству;

$K_{R_p}, K_{\epsilon_p}, K_{\epsilon_{p\Pi}}$ – параметры моделей, характеризующие темп изменения исследуемого показателя прочности при увеличении коэффициента вариации по исследуемому свойству, 1/%.

Использование предложенных математических моделей (3.18)–(3.20) позволит не только достоверно описать влияние различных вариаций на прочностные показатели, и сопоставить результаты данного влияния, но и классифицировать различные поперечные вариации свойств по степени оказываемого влияния на прочностные характеристики пучка нитей на количественном уровне. Как уже отмечалось в п.3.2.2., параметром математических моделей (3.18)–(3.20), который позволяет провести количественное сопоставление результатов имитационного моделирования, является темп уменьшения исследуемого показателя прочности.

Решение задачи определения параметров математических моделей (3.18)–(3.20) осуществлялось на основе общеизвестного подхода [14] посредством линеаризации функции тренда исследуемого показателя.

Параметры математических моделей (3.18)–(3.20), характеризующие влияние различных поперечных вариаций структуры и механических свойств на показатели прочности, представлены в табл.3.5–3.7.

В результате проведения имитационного моделирования процесса испытания на растяжение пучка нитей (волокон), результаты которого графически и аналитически представлены на рис.3.41–3.49 и табл.3.5.–3.7, можно отметить:

- увеличение показателя поперечной вариации степени извитости C_L и абсолютного разрывного удлинения C_l нитей (волокон) пучка приводит к закономерному снижению разрывной нагрузки P_p , приходящейся на одну нить (рис.3.41, 3.42).

Таблица 3.5

Параметры математической модели (3.18), описывающей влияние различных поперечных вариаций на разрывную нагрузку пучка «синтезированных» нитей (волокон)

Вариации по исследуемым механическим свойствам пучка «синтезированных» нитей (волокон)	Среднее значение разрывной нагрузки пучка нитей при отсутствии вариаций $\bar{P}_{p0}$, Н		Темп уменьшения разрывной нагрузки K_{rp} , $\cdot 10^{-2}$, 1/%		Величина достоверности модели R^2	
	нормальное	Вейбулла	нормальное	Вейбулла	нормальное	Вейбулла
Вариация по абсолютному разрывному удлинению нитей (волокон) пучка Cl_p	47,93	47,28	1,76	1,87	0,957	0,972
Вариация по степени извитости нитей (волокон) пучка Cl_L	47,24	45,82	3,32	3,17	0,971	0,951
Вариация по абсолютному разрывному удлинению Cl_p и степени извитости Cl_L нитей (волокон) пучка	47,27	45,14	3,62	3,23	0,964	0,938

Таблица 3.6

Параметры математической модели (3.19), описывающей влияние различных поперечных вариаций на разрывное удлинение пучка «синтезированных» нитей (волокон)

Вариации по исследуемым механическим свойствам пучка «синтезированных» нитей (волокон)	Среднее значение разрывного удлинения пучка нитей при отсутствии вариаций $\bar{\epsilon}_{p0}$, %		Темп изменения разрывного удлинения K_{ep} , 10^{-2} , 1/%		Величина достоверности модели R^2	
	нормальное	Вейбулла	нормальное	Вейбулла	нормальное	Вейбулла
Вариация по абсолютному разрывному удлинению нитей (волокон) пучка Cl_p	49,56	48,75	-1,64	-1,54	0,972	0,928
Вариация по степени извитости нитей (волокон) пучка Cl_L	50,14	51,15	2,07	2,46	0,939	0,946
Вариация по абсолютному разрывному удлинению Cl_p и степени извитости Cl_L нитей (волокон) пучка	50,77	51,29	1,42	2,18	0,957	0,929

Таблица 3.7

Параметры математической модели (3.20), описывающей влияние различных поперечных вариаций на полное разрывное удлинение пучка «синтезированных» нитей (волокон)

Вариации по исследуемым механическим свойствам пучка «синтезированных» нитей (волокон)	Среднее значение полного разрывного удлинения пучка нитей при отсутствии вариаций $\bar{\varepsilon}_{p\pi 0}$, %		Темп изменения полного разрывного удлинения, $K_{\varepsilon_{p\pi}} \cdot 10^{-2}$, 1/%		Величина достоверности модели R^2	
	нормальное	Вейбулла	нормальное	Вейбулла	нормальное	Вейбулла
Вариация по абсолютному разрывному удлинению нитей (волокон) пучка Cl_p	52,61	49,91	2,26	1,66	0,948	0,968
Вариация по степени извитости нитей (волокон) пучка Cl	56,01	58,12	4,45	4,46	0,963	0,962
Вариация по абсолютному разрывному удлинению Cl_p и степени извитости Cl нитей (волокон) пучка	57,69	58,72	4,36	4,44	0,954	0,947

При этом вариация степени извитости нитей (волокон) пучка оказывает наибольшее влияние на среднее значение разрывной нагрузки $\bar{P}_p$ (табл. 3.5) ($K_{Pp}=3,32 \cdot 10^{-2}$, 1/% – при нормальном распределении, $K_{Pp}=3,17 \cdot 10^{-2}$, 1/% – при распределении Вейбулла) относительно вариации по абсолютному разрывному удлинению Cl_p нитей (волокон) пучка ($K_{Pp}=1,76 \cdot 10^{-2}$, 1/% – при нормальном распределении, $K_{Pp}=1,87 \cdot 10^{-2}$, 1/% – при распределении Вейбулла). Случайное совместное влияние данных вариаций не вызывает изменения характера зависимости среднего значения разрывной нагрузки $\bar{P}_p$ от параметров вариации (рис.3.43). При поперечных вариациях показателей структуры и механических свойств значение параметра модели (3.18) $\bar{P}_{p0}$ практически не изменяется. Среднее значение разброса значений параметра $\bar{P}_{p0}$ при вариация по различным свойствам не превышает 5–6% относительно исходного значения. Ассиметрия закона распределения, выражающая смещение моды относительно среднего значения практически не оказывает влияния на закономерность уменьшения среднего значения разрывной нагрузки $\bar{P}_p$ пучка нитей (волокон). Смещение моды закона распределения в сторону больших значений

(закон распределения Вейбулла) не приводит к существенному изменению темпового параметра K_{rp} модели (3.18).

- влияние значимых показателей поперечной гетерогенности структуры и механических свойств пучка нитей (волокон) на относительное разрывное удлинение является неоднозначным. Увеличение степени вариации абсолютного разрывного удлинения C_p пучка нитей (волокон) приводит к снижению относительного разрывного удлинения первой из разорвавшейся нити (волокна) пучка (рис.3.44). При этом асимметрия закона распределения не приводит к изменению темпа снижения среднего значения относительного разрывного удлинения (табл. 3.6) ($K_{\epsilon_p} = -1,64 \cdot 10^{-2}$, 1/% – при нормальном распределении, $K_{\epsilon_p} = -1,54 \cdot 10^{-2}$, 1/% – при распределении Вейбулла). Увеличение показателя неравномерности степени разнотолщинности C_L нитей (волокон) пучка (рис.3.45) введет к увеличению относительного разрывного удлинения первой из разорвавшейся нити пучка. При этом следует отметить, что смещение моды закона распределения в сторону больших значений (закон распределения Вейбулла) приводит к увеличению темпа изменения среднего значения относительного разрывного удлинения пучка нитей (волокон) (рис.3.43) ($K_{\epsilon_p} = 2,07 \cdot 10^{-2}$, 1/% – при нормальном распределении, $K_{\epsilon_p} = 2,46 \cdot 10^{-2}$, 1/% – при распределении Вейбулла). При случайном совместном влиянии поперечных вариаций свойств нитей (волокон) пучка (рис.3.46) характер зависимости относительного разрывного удлинения от параметров гетерогенности не изменяется по отношению к зависимости относительного разрывного удлинения по степени извитости нитей (волокон) пучка (рис.3.45). Однако следует отметить некоторое снижение темпа изменения относительного разрывного удлинения при наличии вариаций относительно параметра K_{ϵ_p} для вариации по наиболее значимому свойству (степени разнотолщинности) нитей (волокон) пучка (рис. 3.45). При различных поперечных вариациях по структуре и механическим свойствам значение относительного разрывного удлинения $\bar{\epsilon}_{p0}$ практически не изменяется (среднее значение разброса значения $\bar{\epsilon}_{p0}$ при вариациях по различным свойствам не превышает 1,5%);
- при увеличении показателей неравномерности значимых показателей структуры и механических свойств пучка нитей (волокон) происходит закономерное увеличение полного относительного разрывного удлинения (рис.3.47–3.49). Вариация по степени разнотолщинности нитей (волокон) пучка оказывает наибольшее влияние на изменение полного относительного удлинения пучка ($K_{\epsilon_{rp}} = 4,45 \cdot 10^{-2}$, 1/% – при

нормальном распределении, $K_{\epsilon_{рп}} = 4,46 \cdot 10^{-2}$, 1/% – при распределении Вейбулла) относительно неравномерности абсолютного разрывного удлинения нитей (волокон) пучка ($K_{\epsilon_{рп}} = 2,26 \cdot 10^{-2}$, 1/% – при нормальном распределении, $K_{\epsilon_{рп}} = 1,66 \cdot 10^{-2}$, 1/% – при распределении Вейбулла). При этом следует отметить, что асимметрия закона распределения оказывает влияние на изменение полного относительного разрывного удлинения только при наличии вариации абсолютного разрывного удлинения (табл.3.6). Случайное совместное влияние поперечной гетерогенности значимых показателей структуры и механических свойств пучка нитей (волокон) не изменяет характера зависимости относительного разрывного удлинения пучка от параметров нестабильности. Темп изменения полного относительного разрывного удлинения практически не изменяется относительно показателя $K_{\epsilon_{рп}}$ для вариации по наиболее значимому свойству ($K_{\epsilon_{рп}} = 4,36 \cdot 10^{-2}$, 1/% – при нормальном распределении, $K_{\epsilon_{рп}} = 4,44 \cdot 10^{-2}$, 1/% – при распределении Вейбулла).

Подводя итоги работы, результаты которой представлены в данном параграфе, можно отметить, что в результате проведенных исследований:

1. установлена закономерность влияния поперечной гетерогенности строения и механических свойств нитей (волокон) пучка на характеристики кривой растяжения в координатах «нагрузка – абсолютное удлинение»;
2. произведена оценка влияния поперечных вариаций показателей структуры и механических свойств не только на качественном уровне, как отмечалось, в предварительных выводах, но и на количественном. С увеличением степени указанной неравномерности закономерно снижаются прочностные показатели текстильных нитей (волокон);
3. установлено, что наибольшее влияние на прочностные характеристики текстильных материалов оказывают поперечные гетерогенности степени извитости нитей (волокон) пучка и абсолютного разрывного удлинения;
4. произведен анализ случайного совместного влияния различных поперечных вариаций (строения, механических свойств нити) на форму и параметры кривой растяжения, а также на прочностные характеристики текстильных материалов.

Исследования подтвердили высокую эффективность имитационного моделирования как метода исследования механических свойств текстильных материалов при полуцикловых испытаниях на растяжение. Результаты проведенных исследований можно рекомендовать для прогнозирования

изменения прочностных показателей при наличии различных поперечных вариаций механических свойств и строения текстильных нитей и волокон. Однако следует отметить, что при проведении имитационного моделирования использовался целый ряд упрощающих допущений, что, несомненно, отражается на полученных результатах (не учитывается взаимодействие нитей (волокон) пучка при деформировании и разрушении). Как следствие, для объективного прогнозирования изменения прочностных свойств текстильных материалов, обладающих различными (продольными и поперечными) вариациями структуры и механических свойств, возникает необходимость в разработке новой имитационной модели. Данная имитационная модель должна учитывать не только поперечную неравномерность показателей структуры и механических свойств нитей (волокон) пучка, но и продольную неравномерность свойств каждой нити (волокна) в отдельности.

3.3.3. Оценка степени разнотолщинности пучка текстильных нитей (волокон) по результатам полуциклового испытания на растяжение

В результате проведенного имитационного моделирования полуциклового испытания на растяжение пучка нитей (волокон) установлена зависимость угла между касательной, проведенной из начала координат к левой восходящей части кривой растяжения и осью ординат β от параметра гетерогенности степени разнотолщинности нитей (волокон) пучка (рис.3.32, 3.36, 3.38–3.40).

Проведенный анализ процесса деформирования и разрушения пучка нитей (волокон) по-

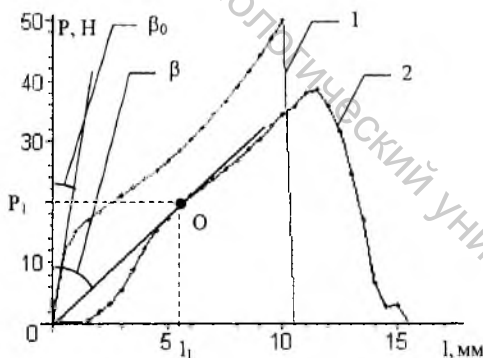


Рис.3.50 Схематическое представление кривой растяжения пучка нитей при наличии поперечной гетерогенности степени извитости нитей (волокон) пучка 1— кривая растяжения при отсутствии вариации показателей строения и механических свойств; 2— кривая растяжения при наличии поперечной вариации степени разнотолщинности C_L

звояет отметить, что касательная, проведенная из начала координат к левой, восходящей части кривой растяжения выделяет на кривой характерную точку **O**, с координатами P_1, l_1 (рис.3. 50).

При этом данная точка **O** на диаграмме характеризует некоторые текущие значения приложенной нагрузки P_1 и абсолютного удлинения пучка нитей l_1 , при котором все нити пучка участвуют в деформировании (рис. 3.50).

Установление взаимосвязи угла наклона касательной, проведенной из начала координат к восходящей части кривой растяжения, к вертикали β от параметра гетерогенности степени извитости нитей (волокон) пучка C_L осуществлялось методами имитационного моделирования полущиклового испытания на растяжение пучка нитей (волокон) в соответствии с разработанным алгоритмом, представленным на рис.3.29.

Шаг изменения параметра вариации степени разнотолщины пучка нитей (волокон) C_L принимался равным 2%.

Данные, полученные в результате имитационного моделирования, сведены в табл.3.8.–3.9 и представлены на рис. 3.51–3.52.

Комплексный анализ результатов, проведенного имитационного моделирования позволяет сформулировать следующие выводы:

- увеличение показателя вариации степени разнотолщины нитей (волокон) пучка C_L приводит к закономерному увеличению угла β наклона касательной, проведенной из начала координат к восходящей части кривой растяжения, к вертикали. Асимметрия закона распределения, выражающая смещение моды закона распределения в сторону больших значений (закон распределения Вейбулла) не приводит к существенному изменению данной закономерности;
- для практического использования полученных результатов взаимосвязи угла β наклона касательной, проведенной из начала координат к восходящей части кривой растяжения, к вертикали и параметра гетерогенности степени разнотолщины нитей (волокон) пучка C_L предлагается следующая математическая модель:

$$\beta = \beta_0 + K_L \cdot C_L, \quad (3.21)$$

где β_0 – среднее значение угла наклона касательной, проведенной из начала координат к левой, восходящей части кривой растяжения, к вертикали при отсутствии вариации показателей строения и механических свойств нитей (волокон) пучка, град;

C_L – коэффициент вариации степени разнотолщины нитей (волокон) пучка, %;

K_L – параметр модели, характеризующий абсолютное изменение угла β при увеличении коэффициента вариации степени разноразности нитей (волокон) пучка на 1%, град/°.

Таблица 3.8

Результаты имитационного моделирования по оценке показателя гетерогенности степени разноразности нитей (волокон) пучка C_L при отсутствии вариаций по другим свойствам

Значение коэффициента вариации степени разноразности нитей (волокон) пучка C_L , %	Нормальное распределение			Распределение Вейбулла		
	Среднее значение $\bar{P}_1$, Н	Среднее значение $\bar{l}_1$, мм	Значение угла β , °	Среднее значение $\bar{P}_1$, Н	Среднее значение $\bar{l}_1$, мм	Значение угла β , °
2	16,66	2,5	8,53	16,13	2,5	8,71
4	16,95	3,0	10,03	18,71	4,5	13,52
6	17,51	4,5	14,42	17,81	5,5	17,17
8	20,53	7,0	18,85	24,33	8,5	19,25
10	21,33	8	20,55	22,47	9,0	21,8
12	18,04	9,0	26,55	25,27	11,0	23,52
14	16,55	9,5	29,85	26,47	12,0	24,3
16	14,26	10,5	33,69	21,72	12,0	28,92
18	14,75	11,0	36,71	18,83	12,0	32,52
20	14,39	12,0	39,82	16,91	12,5	36,47

Таблица 3.9

Результаты имитационного моделирования по оценке показателя гетерогенности степени разноразности нитей (волокон) пучка C_L при наличии вариаций по другим свойствам ($C_{I_p}=10\%$)

Значение коэффициента вариации степени разноразности нитей (волокон) пучка C_L , %	Нормальное распределение			Распределение Вейбулла		
	Среднее значение $\bar{P}_1$, Н	Среднее значение $\bar{l}_1$, мм	Значение угла β , °	Среднее значение $\bar{P}_1$, Н	Среднее значение $\bar{l}_1$, мм	Значение угла β , °
2	15,96	2,5	8,91	18,44	2,0	6,19
4	18,33	4,5	13,18	23,66	4,0	9,60
6	16,88	5,5	18,06	17,95	5,5	17,04
8	20,92	8,0	20,94	24,68	8,5	19,01
10	23,53	10,0	23,04	22,84	9,0	21,52
12	28,34	13,0	24,97	21,99	10,0	24,47
14	25,44	13,5	27,97	23,19	11,5	26,39
16	23,06	14,0	31,28	18,92	11,5	31,31
18	20,07	15,0	36,79	18,12	12,0	33,53
20	18,73	15,5	39,63	16,15	12,5	37,76

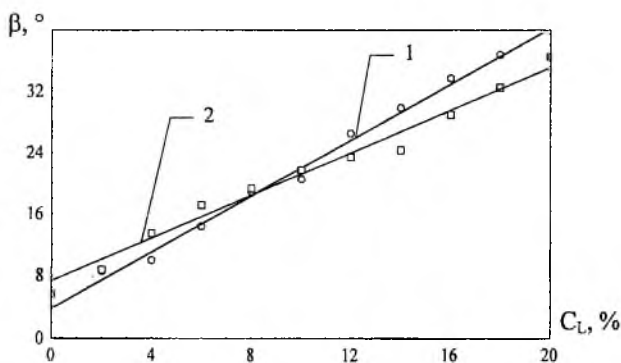


Рис.3.51. Зависимость угла β от коэффициента вариации по степени разнородности нитей (волокон) пучка C_L при отсутствии поперечных вариаций по другим свойствам.

(1- при нормальном законе распределения, 2- при распределении Вейбулла)

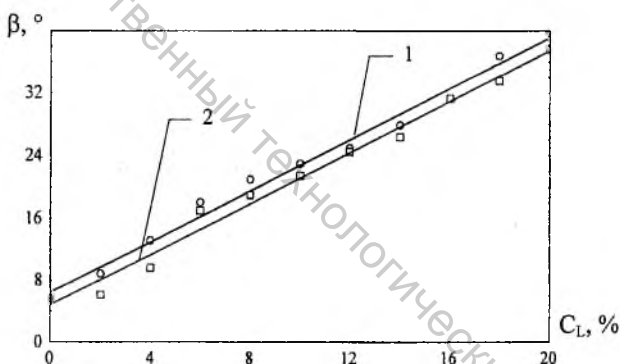


Рис.3.52. Зависимость угла β от коэффициента вариации по степени разнородности нитей (волокон) пучка C_L при наличии поперечной вариации абсолютного разрывного удлинения $Cl_p = 10\%$.

(1- при нормальном законе распределения, 2- при распределении Вейбулла)

При обосновании физического смысла условного предела упругости было указано, что:

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg}(90 - \beta_0) = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_p}, \quad (3.22)$$

где σ_y – условный предел упругости или напряжение, при котором произошло бы разрушение абсолютно упругой нити, Па;

ϵ_p – относительное разрывное удлинение, %.

Следовательно, для практической оценки параметра β_0 модели (3.21) рекомендуется применение следующего соотношения:

$$\beta_0 = \arctg \left[\frac{\epsilon_p}{\sigma_y} \right] = \arctg \left[\frac{1}{E_y} \right], \quad (3.23)$$

где E_y – условный модуль упругости пучка нитей (волокон) пучка, Па

Таким образом, подставив соотношение (3.23) в модель (3.21), и выразив показатель гетерогенности степени разнотолщинности C_L получим

$$C_L = \frac{1}{K_L} \cdot \left[\arctg \left(\frac{l_1}{P_i} \right) - \arctg \left(\frac{\epsilon_p}{\sigma_y} \right) \right], \quad (3.24)$$

где P_i – текущее значение нагрузки, при котором в деформировании участвуют все нити (волокна) пучка, Н;

l_1 – абсолютное удлинение пучка нитей (волокон) пучка, при котором в деформировании участвуют все нити (волокна) пучка, м;

При использовании в качестве объекта исследований пучка “синтезированных” нитей (волокон), численные значения показателей структуры и механических свойств которого определены в п. 3.3.2, получены следующие численные значения параметров математической модели (3.24):

- при отсутствии поперечных вариаций строения и механических свойств (табл.3.8, рис.3.51)
 - нормальный закон распределения – $K_L=1,83$ °/%, $\beta_0=7,44^\circ$, $R^2=0,994$
 - закон распределения Вейбулла – $K_L=1,39$ °/%, $\beta_0=10,11^\circ$, $R^2=0,978$
- при наличии поперечных вариаций строения и механических свойств (табл.3.9, рис.3.52) ($Cl_p=10\%$)
 - нормальный закон распределения – $K_L=1,66$ °/%, $\beta_0=7,73^\circ$, $R^2=0,983$
 - закон распределения Вейбулла – $K_L=1,61$ °/%, $\beta_0=6,82^\circ$, $R^2=0,986$

Численное значение величины достоверности модели R^2 , а также тот факт, что максимальное отклонение значения β_0 , определяемого по результатам имитационного моделирования (модель (3.21)) и задаваемого значения данного параметра (соотношение (3.23)) не превышает 2,5 %, свидетельствует о достоверности предлагаемой модели (3.24) результатам, полученным в результате имитационного моделирования.

3.3.4. Оценка степени поперечной гетерогенности абсолютного разрывного удлинения текстильных нитей (волокон) по результатам полуциклового испытания на растяжение

Ранее отмечалось, что проведение имитационного моделирования полуциклового испытания на растяжение пучка нитей (волокон) и анализ его результатов позволило установить взаимосвязь среднего значения угла между вертикалью и касательной, проведенной к нисходящей части кривой растяжения и коэффициента вариации разрывного удлинения между нитями (волокнами) пучка C_{l_p} (рис.3.32, 3.36–3.40). Однако трудности в практической оценке угла наклона касательной и отсутствие явно выраженного физического смысла данной точки на кривой растяжения указывают на невозможность практического применения вышеуказанных результатов моделирования.

Дальнейший анализ процесса деформирования пучка нитей (волокон) позволяет отметить, что угол между вертикалью и прямой, соединяющей точки А и А', ψ в первом приближении пропорционален показателю гетерогенности абсолютного разрывного удлинения C_{l_p} (рис.3.32, 3.36–3.40).

При этом точка А' на диаграмме характеризует абсолютное удлинение при котором происходит разрушение последней нити (волокна) пучка $l_{pп}$ (рис.3.53), а точка А – значения разрывной нагрузки P_p и абсолютного разрывного удлинения первой из разрушившихся нитей (волокон) пучка l_p (рис. 3.53).

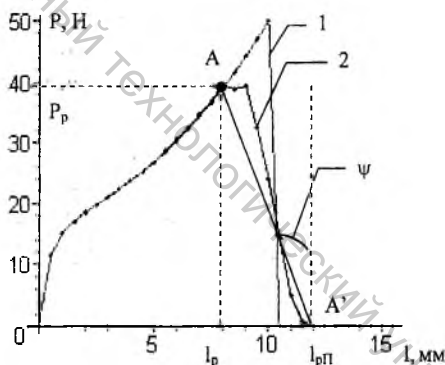


Рис.3.53. Схематическое представление кривой растяжения пучка нитей (волокон) при наличии поперечной гетерогенности абсолютного разрывного удлинения нитей (волокон) пучка (1 – при отсутствии гетерогенности структуры и механических свойств, 2 – при $C_{l_p}=10\%$)

Установление взаимосвязи угла ψ от параметра неравномерности абсолютного разрывного удлинения нитей (волокон) пучка C_{l_p} осуществлялось методами имитационного моделирования полуциклового испытания на растяжение пучка нитей (волокон) в соответствии с разработанным ал-

горитмом, представленным на рис.3.30. Шаг изменения параметра вариации абсолютного разрывного удлинения нитей (волокон) пучка C_{I_p} принимался равным 1%, и являлся соизмеримым с погрешностью оценки абсолютного разрывного удлинения. Данные, полученные в результате имитационного моделирования, сведены в табл.3.10.–3.11 и представлены на рис. 3.54–3.55.

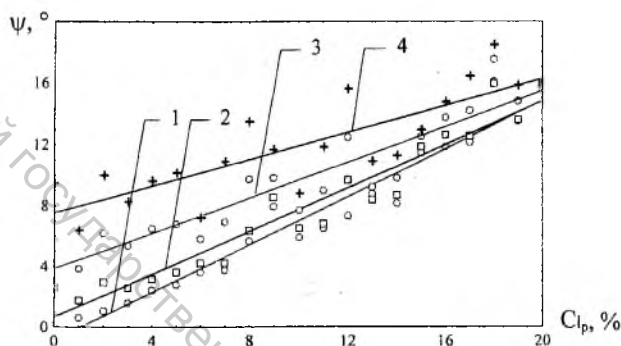


Рис.3.54. Зависимость угла ψ от коэффициента вариации по абсолютному разрывному удлинению нитей (волокон) пучка C_{I_p} при нормальном законе распределения (1— $C_L=0\%$, 2— $C_L=2\%$, 3— $C_L=4\%$, 4— $C_L=6\%$.)

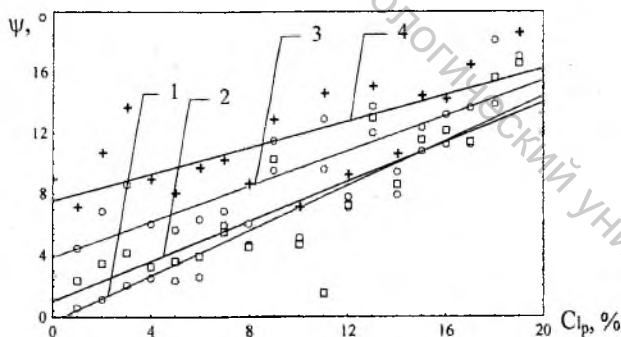


Рис.3.55. Зависимость угла ψ от коэффициента вариации по абсолютному разрывному удлинению нитей (волокон) пучка C_{I_p} при законе распределения Вейбулла (1— $C_L=0\%$, 2— $C_L=2\%$, 3— $C_L=4\%$, 4— $C_L=6\%$.)

Таблица 3.10

Результаты имитационного моделирования по оценке показателя гетерогенности абсолютного разрывного удлинения нитей (волокон) пучка C_L (нормальный закон распределения)

Значение коэффициента вариации абсолютного разрывного удлинения нитей (волокон) пучка C_L , %	Среднее значение угла ψ , ° при										
	$C_L=0\%$	$C_L=1\%$	$C_L=2\%$	$C_L=3\%$	$C_L=4\%$	$C_L=5\%$	$C_L=6\%$	$C_L=7\%$	$C_L=8\%$	$C_L=9\%$	$C_L=10\%$
0	0,11	1,35	2,68	4,16	5,84	7,59	9,48	11,39	13,35	15,58	17,89
1	0,58	0,96	1,76	2,77	3,87	5,23	6,39	7,78	9,21	10,56	11,92
2	1,09	1,47	2,95	4,39	6,2	8,16	10,02	11,65	13,48	15,38	17,47
3	1,6	1,61	2,6	3,79	5,36	6,85	8,31	9,95	11,79	13,69	15,69
4	2,41	2,27	3,15	4,65	6,49	8,14	9,65	11,44	13,17	14,73	16,63
5	2,78	3,09	3,64	4,93	6,76	8,32	10,17	12,02	13,91	15,98	17,94
6	3,6	3,9	4,22	4,87	5,82	6,54	7,28	9,3	9,52	10,81	12,32
7	3,75	3,88	4,2	4,99	6,91	8,77	10,93	12,97	15,34	17,5	19,9
8	5,63	5,67	6,35	7,8	9,7	11,44	13,48	14,93	17,11	19,32	21,67
9	7,96	8,2	8,55	9,1	9,82	10,74	11,72	12,65	13,73	15,15	16,43
10	5,88	6,1	6,47	6,99	7,69	7,99	8,82	9,87	11,22	12,77	14,55
11	6,46	6,42	6,81	7,78	8,97	10,28	11,87	12,82	14,24	15,52	16,8
12	7,33	8,5	9,66	11	12,43	13,83	15,6	16,79	18,48	20,22	22,1
13	8,72	8,55	8,35	8,53	9,18	10,1	10,92	12,26	13,65	15,39	16,98
14	8,13	8,41	8,69	9,09	9,8	10,71	11,31	12,15	12,65	13,8	15,28
15	11,44	11,4	11,83	11,95	12,51	12,8	13	13,31	13,97	14,81	15,4
16	11,82	12,06	12,57	13,07	13,72	14,25	14,79	15,49	16,4	17,33	17,95
17	12,18	12,5	12,5	13,04	14,2	15,2	16,48	17,21	18,51	20,03	21,34
18	16,07	15,64	15,955	16,44	17,52	17,95	18,46	18,75	19,42	20,97	22,51
19	13,5	13,25	13,62	14,35	14,79	15,66	15,86	16,68	18	19,53	21,11
20	15,96	16,01	15,85	15,53	15,46	15,11	15,47	15,47	16,16	17,33	18,48

Таблица 3.11

Результаты имитационного моделирования по оценке показателя гетерогенности абсолютного разрывного удлинения нитей (волокон) пучка C_L (закон распределения Вейбулла)

Значение коэф- фициента ва- риации абсо- лютного раз- рывного удли- нения нитей (волокон) пучка C _L , %	Среднее значение угла ψ, ° при										
	C _L =0%	C _L =1%	C _L =2%	C _L =3%	C _L =4%	C _L =5%	C _L =6%	C _L =7%	C _L =8%	C _L =9%	C _L =10%
0	0,23	1,33	2,61	3,95	5,56	7,13	8,96	10,74	12,91	14,86	16,85
1	0,58	1,2	2,31	3,29	4,46	5,81	7,17	8,49	10,13	11,7	13,16
2	1,11	1,71	3,5	5,04	6,85	8,66	10,73	12,73	14,96	17,07	19,32
3	2,03	3,58	4,12	6,33	8,63	11,16	13,71	16,38	18,65	21,21	23,78
4	2,48	2,98	3,25	4,48	6,01	7,42	8,98	10,46	11,86	13,42	14,99
5	2,31	2,03	3,63	4,44	5,66	6,75	8,05	9,12	10,42	11,76	13,12
6	2,59	2,86	3,96	5,15	6,37	7,96	9,74	11,59	13,65	15,62	17,89
7	5,96	6,18	5,49	6,04	6,9	8,53	10,23	11,85	13,41	14,94	16,33
8	4,68	5,24	4,5	5,15	6,05	7,24	8,65	9,89	11,36	12,75	14,15
9	9,53	9,18	10,23	10,81	11,51	12,21	12,91	14,12	15,14	15,91	17,05
10	4,91	5,07	4,71	4,57	5,11	6,17	7,19	8,49	9,98	11,37	12,51
11	9,61	9,23	1,51	12,37	12,89	13,64	14,62	15,61	17,13	18,57	20,03
12	7,09	7,39	7,23	7,51	7,77	8,13	9,26	10,53	11,34	12,71	14,22
13	11,98	12,21	13,02	13,14	13,72	14,23	15,12	16,73	18,41	19,92	21,68
14	7,95	8,21	8,57	9,09	9,4	9,94	10,66	11,47	12,59	13,92	15,69
15	10,77	10,26	11,54	11,85	12,36	13,27	14,52	15,98	17,12	17,96	19,19
16	11,24	10,8	12,14	12,51	13,2	13,51	14,31	14,94	16,11	17,41	18,55
17	11,23	11,5	11,42	12,08	13,69	15,28	16,53	18,18	20,58	22,01	24,04
18	13,87	14,02	15,59	16,81	18,12	19,49	21,01	22,58	23,64	25,21	26,45
19	16,64	17,35	16,59	16,63	17,06	17,93	18,64	19,87	20,95	22,27	23,3
20	11,92	11,82	11,97	12,76	13,28	14,22	14,98	16,11	17,11	18,15	19,59

Анализ результатов имитационного моделирования, представленных на рис. 3.54–3.55 позволяет сформулировать следующие выводы и предложения:

- увеличение степени неравномерности абсолютного разрывного удлинения нитей (волокон) пучка приводит к закономерному изменению угла ψ наклона прямой, проведенной из точки, характеризующей абсолютное удлинение при котором происходит разрушение последней нити (волокна) пучка $l_{рп}$ к точке А на кривой растяжения, определяющей разрывную нагрузку и абсолютное разрывное удлинение первой, из разрушившийся, нитей (волокон) пучка. Ассиметрия закона распределения (закон распределения Вейбулла) не приводит к существенному изменению данной закономерности;
- для практического использования полученных результатов взаимосвязи угла ψ (рис. 3.53) и параметра вариации абсолютного разрывного удлинения нитей (волокон) пучка $C_{лр}$ предлагается математическая модель следующего вида:

$$\psi = \psi_0 + K_{лр} \cdot C_{лр}, \quad (3.25)$$

где ψ_0 – среднее значение угла наклона прямой при отсутствии вариации абсолютного разрывного удлинения $C_{лр}$ нитей (волокон) пучка, град;

$C_{лр}$ – коэффициент вариации абсолютного разрывного удлинения нитей (волокон) пучка, %;

$K_{лр}$ – параметр модели, характеризующий абсолютное изменение угла ψ при увеличении коэффициента вариации абсолютного разрывного удлинения нитей (волокон) пучка на 1%, град/%.

Следует отметить, что при совместном влиянии вариаций степени разнодлинности C_L и абсолютного разрывного удлинения $C_{лр}$ происходит изменение параметров ψ_0 и $K_{лр}$ модели (3.25). Вследствие этого возникает необходимость в проведении дополнительных исследований и установлении взаимосвязи между параметрами модели (3.25) и показателем вариации степени разнодлинности нитей (волокон) пучка C_L .

Однако, анализ данных представленных в табл.3.10–3.11, дает возможность оценить параметры модели (3.25) в зависимости от показателя степени разнодлинности нитей (волокон) пучка C_L . Результаты данной оценки сведены в табл.3.12. и графически представлены на рис.3.56–3.57.

Таблица 3.12

Параметры математической модели (3.25), описывающей влияние степени вариации абсолютного разрывного удлинения пучка "синтезированных" нитей (волокон) на угол ψ

Значение коэффициента вариации степени разноразличности (волокон) пучка $C_L, \%$	Нормальное распределение			Распределение Вейбулла		
	Среднее значение $K_p, \text{ }^\circ/\%$	Среднее значение $\psi_0, ^\circ$	Значение S_0^2	Среднее значение $K_p, \text{ }^\circ/\%$	Среднее значение $\psi_0, ^\circ$	Значение S_0^2
0	0,784	0,23	1,154	0,736	0,23	2,598
1	0,757	0,25	1,135	0,696	0,37	2,798
2	0,707	0,66	1,387	0,650	1,01	3,431
3	0,646	2,07	1,571	0,612	2,64	4,189
4	0,580	3,87	1,896	0,559	4,16	4,917
5	0,506	5,68	2,322	0,510	5,74	5,665
6	0,436	7,55	3,142	0,456	7,63	6,512
7	0,354	9,55	3,216	0,423	9,38	7,844
8	0,302	11,43	4,412	0,382	11,29	9,011
9	0,266	13,36	5,503	0,343	13,17	10,252
10	0,218	15,45	6,838	0,311	15,07	11,603

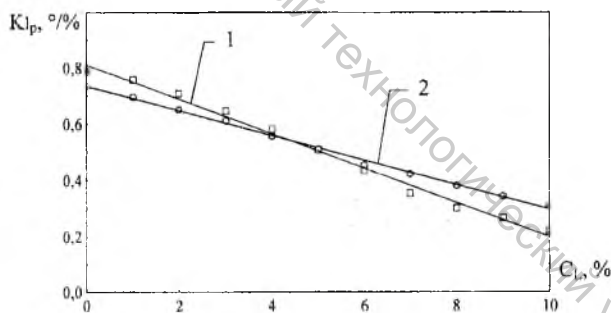


Рис.3.56. Зависимость параметра K_p модели (3.25) от коэффициента вариации по степени разноразличности нитей (волокон) пучка C_L (1- при нормальном законе распределения, 2- при распределении Вейбулла)

Анализ результатов моделирования, представленных на рис. 3.56–3.58, позволяет отметить следующее:

- увеличение степени разноразличности нитей (волокон) пучка приводит к закономерному уменьшению значения параметра K_p модели (3.25) (рис.3.56).

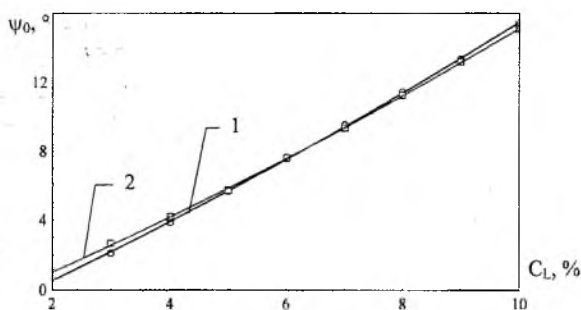


Рис.3.57. Зависимость параметра ψ_0 модели (3.25) от коэффициента вариации по степени разнородности нитей (волокон) пучка C_L (1- при нормальном законе распределения, 2- при распределении Вейбулла)

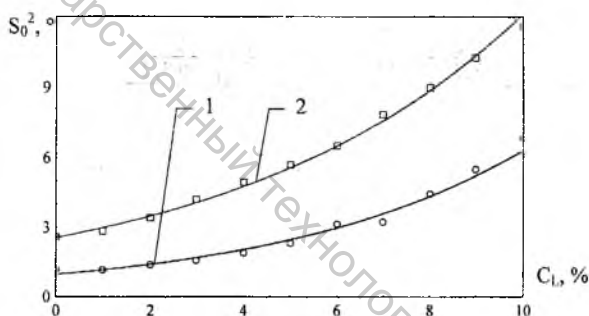


Рис.3.58. Зависимость значения остаточной дисперсии S_0^2 от коэффициента вариации по степени разнородности нитей (волокон) пучка C_L (1- при нормальном законе распределения, 2- при распределении Вейбулла)

При этом асимметрия закона распределения не изменяет закономерности влияния степени извитости на параметр K_{ip} . Для практического использования результатов имитационного моделирования предлагается следующая математическая модель:

$$K_{ip} = K_{ip0} - K \cdot C_L, \quad (3.26)$$

где K_{ip0} – параметр K_{ip} модели (3.25) при отсутствии гетерогенности степени разнородности нитей (волокон) пучка, град/%;
 C_L – коэффициент вариации степени разнородности нитей (волокон) пучка, %;

K – параметр, характеризующий абсолютное уменьшение параметра K_{I_p} модели (3.25) при увеличении коэффициент вариации степени разнотолщины нитей (волокон) пучка на 1 %.

При использовании в качестве объекта исследований пучка “синтезированных” нитей (волокон), численные значения показателей структуры и механических свойств которого определены в п. 3.3.2, получены следующие численные значения параметров математической модели (3.26):

- нормальный закон распределения – $K_{I_{p0}}=0,81$ °/%, $K=0,06$ °/(%)², $R^2=0,992$;
- закон распределения Вейбулла – $K_{I_{p0}}=0,74$ °/%, $K=0,04$ °/(%)², $R^2=0,997$.

- Увеличение коэффициента вариации степени извитости нитей (волокон) C_L приводит к закономерному увеличению угла ψ_0 наклона прямой AA' при отсутствии вариации абсолютного разрывного удлинения C_{I_p} нитей (волокон) пучка (рис.3.57). Математическая модель зависимости угла ψ_0 от показателя вариации степени извитости C_L имеет следующий вид:

$$\psi_0 = \psi_0' + K_\psi \cdot C_L, \quad (3.27)$$

где ψ_0' – параметр модели, определяющий угол между вертикалью и прямой AA' при отсутствии вариации показателей структуры и механических свойств пучка нитей (волокон), град. Для практической оценки вышеуказанного параметра рекомендуется использовать следующее соотношение:

$$\psi_0' = \arctg \left[\frac{\Delta l}{P_{p0}} \right],$$

где Δl – шаг приращения удлинения нитей (волокон) пучка при моделировании;

P_{p0} – среднее значение разрывной нагрузки пучка нитей (волокон) при отсутствии вариации показателей строения и механических свойств.

K_ψ – параметр модели, смысл которого аналогичен смыслу параметра K модели (3.26), град/°.

При использовании в качестве объекта исследований пучка “синтезированных” нитей (волокон) получены следующие численные значения параметров математической модели (3.27):

нормальный закон распределения – $K_\psi=1,6$ °/%, $\psi_0'=0,1$ °, $R^2=0,985$;

- закон распределения Вейбулла – $K_{I_{p0}}=1,7 \text{ } ^\circ/\%$, $\psi_0'=0,1^\circ$, $R^2=0,986$.

Для практического использования результатов исследований угол ψ рекомендуется определять из геометрических соображений (рис.3.53):

$$\psi = \arctg \left[\frac{(\bar{I}_{p\Pi} - \bar{I}_p)}{\bar{P}_p} \right], \quad (3.28)$$

где $\bar{P}_p$ – среднее значение разрывной нагрузки пучка нитей (волокон);

$\bar{I}_p$ – среднее значение абсолютного удлинения, при котором происходит разрушение первой нити (волокна) пучка;

$\bar{I}_{p\Pi}$ – среднее значение абсолютного удлинения, при котором происходит разрушение последней нити (волокна) пучка.

Таким образом, для практического использования математическая модель (3.25) с учётом соотношений (3.26)–(3.28), приобретает следующий вид:

$$C_{I_p} = \frac{1}{K_{I_{p0}} - K \cdot C_L} \cdot \left[\arctg \left(\frac{(\bar{I}_{p\Pi} - \bar{I}_p)}{\bar{P}_p} \right) - \arctg \left(\frac{\Delta l}{\bar{P}_{p0}} + K_w \cdot C_L \right) \right], \quad (3.29)$$

Для оценки возможности применения математической модели (3.26) при определении коэффициента вариации абсолютного разрывного удлинения C_{I_p} при наличии неравномерности степени разнодлинности C_L нитей (волокон) пучка был произведен анализ изменении остаточной дисперсии при наличии вариации степени разнодлинности нитей (волокон) пучка (рис.3.58). Установлен факт нелинейного увеличения значения остаточной дисперсии при увеличении коэффициента вариации степени разнодлинности нитей (волокон) пучка C_L . Следовательно, можно предположить о существовании некоторого критического значения $C_{L_{кр}}$, превышение которого приводит к недостоверным результатам.

На основе применения теоремы о среднем интегрального исчисления критическое значение коэффициента вариации степени разнодлинности нитей (волокон) пучка при оценке показателя поперечной гетерогенности абсолютного разрывного удлинения C_{I_p} составляет:

- нормальный закон распределения – $C_{L_{кр}}=5,76 \text{ } \%$;
- закон распределения Вейбулла – $C_{L_{кр}}=5,68 \text{ } \%$.

Таким образом, можно сделать заключение, что в результате комплекса аналитических исследований

1. проведено теоретическое обоснование подхода к вопросу оценки показателей поперечной гетерогенности показателей структуры и механиче-

ских свойств текстильных нитей в зависимости от формы и параметров кривой растяжения;

2. научно обоснованы и разработаны математические модели оценки показателей поперечной гетерогенности степени извитости и абсолютного разрывного удлинения пучка нитей (волокон) по результатам полуциклового испытания на растяжение, применение которых позволит без использования дополнительного специального оборудования значительно расширить диапазон полученных сведений, и позволит более объективно и всесторонне оценить качество волокон и нитей.

3.4. Исследование совместного влияния продольной и поперечной гетерогенности структуры и механических свойств на прочностные характеристики текстильных материалов

3.4.1. Совмещенная имитационная модель процесса деформирования и разрушения текстильной нити при полуцикловом испытании на растяжение

При разработке совмещенной имитационной модели деформирования и разрушения текстильной нити была выдвинута гипотеза, что условно нить можно представить в виде m параллельно расположенных структурных элементов, для которых случайными характеристиками будут являться не только показатели механических свойств и структуры, но и степень их извитости (или разнодлинности). Следовательно, переменными случайными величинами для i -той нити пучка будут являться значения L_i , T_i , I_{pi} , $\Delta\sigma_{упри}$, σ_{pi} и σ_{yi} . Однако каждая i -тая нить пучка обладает и продольной неравномерностью показателей строения и механических свойств, и вследствие этого, ранее была представлена как k последовательно соединенных структурных элементов. При этом каждый j -тый элемент i -той нити пучка имеет не только различную длину L_{ij} и линейную плотность T_{ij} , но и различные значения показателей прочностных и деформационных свойств I_{pij} , σ_{pij} , σ_{yij} , $\Delta\sigma_{упrij}$. Схематическое представление текстильной нити, обладающей продольной и поперечной гетерогенностью показателей структуры и механических свойств, представлено на рис. 3.59.

На начальном этапе моделирования генерируется, согласно задаваемому закону распределения (нормальный либо Вейбулла), m (по числу нитей в пучке) случайных значений I_{pi} , T_i , σ_{pi} , σ_{yi} , $\Delta\sigma_{упри}$ и L_i . Затем определяются параметры математической модели (3.12) C_{0i} , C_{1i} , C_{2i} , относительное удлинение ε_{pi} и разрывная нагрузка P_{pi} для каждой i -той нити пучка:

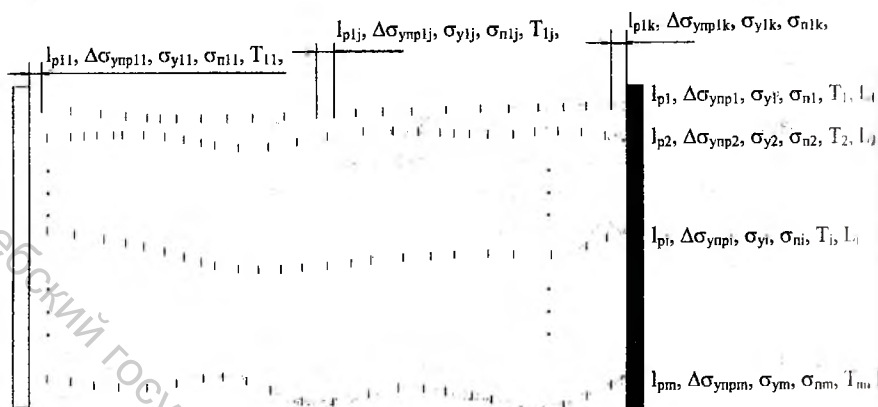


Рис.3.59. Схематическое представление текстильной нити, обладающей поперечной и продольной неравномерностью строения и механических свойств

$$C_{0i} = \frac{l_{pi} \cdot \gamma}{\sigma_{yi} \cdot T_i \cdot 10^3}; C_{1i} = \left(\frac{1}{\sigma_{ni}} \cdot \frac{1}{\sigma_{yi}} \right) \cdot \frac{\gamma}{T_i \cdot 10^3}; C_{2i} = \frac{\Delta\sigma_{ynpi} \cdot T_i \cdot 10^3}{l_{pi}^2 \cdot \gamma}, \quad (3.30)$$

$$\epsilon_{pi} = \frac{l_{pi}}{L_i}; P_{pi} = \frac{l_{pi}}{C_{0i} + C_{1i} l_{pi}} + C_{2i} l_{pi}^2. \quad (3.31)$$

Из всех нитей выбирается нить, обладающая минимальной длиной L_{min} , и определяется излишек длины, соответствующий остальным нитям пучка $\Delta L_i = L_i - L_{min}$. Полученные значения параметров пучка нитей запоминаются.

Для каждой i -той нити пучка генератор случайных чисел, по задаваемому закону распределения, генерирует значение k_i , которое округляется до ближайшего целого числа, и является числом условных структурных элементов i -той нити пучка. Для учёта влияния продольной вариации показателей строения и механических свойств генерируется k значений, по числу условных структурных элементов, ϵ_{rij} , σ_{nij} , σ_{yij} , $\Delta\sigma_{ynrij}$, T_{ij} и L_{ij} . При этом случайные значения показателей структуры и механических свойств для i -той нити пучка ϵ_{pi} , T_{is} , σ_{ni} , σ_{yi} , $\Delta\sigma_{ynpi}$ и L_i являются модальными для генерирования случайных значений показателей структуры и механических свойств j -того условного структурного элемента i -той нити пучка.

Тогда для j -того условного структурного элемента i -той нити пучка параметры математической модели (3.1) определяются, согласно их физическому смыслу, исходя из следующих соотношений:

$$b_{0ij} = \frac{l_{pij}}{\sigma_{yij} \cdot L_{ij}}, \quad b_{1ij} = \left(\frac{1}{\sigma_{nij}} - \frac{1}{\sigma_{yij}} \right); \quad b_{2ij} = \frac{\Delta \sigma_{упrij}}{l_{pij}^2} \cdot L_{ij}^2, \quad (3.32)$$

где σ_{yij} – условный предел упругости j -того элемента i -той нити пучка, Па;

l_{pij} – разрывное удлинение j -того элемента i -той нити пучка, м;

$\Delta \sigma_{упrij}$ – условный предел упрочнения j -того элемента i -той нити пучка, Па;

σ_{nij} – условный предел пластичности j -того элемента i -той нити пучка, Па.

L_{ij} – длина j -того элемента i -той нити пучка, м, определяемая как $L_{ij} = L_i/k_j$.

При проведении имитационного моделирования эксперимента нижнему зажиму разрывной машины последовательно сообщается постоянное на каждом этапе перемещение, что вызывает удлинение Δl . Тогда удлинение на n -том шаге моделирования l_n будет, соответственно, определяться, как $l_n = n \cdot \Delta l$. На каждом n -том шаге моделирования для каждой i -той нити пучка вычисляются абсолютное удлинение l_{in} :

$$l_{in} = l_n - \Delta L_i = n \cdot \Delta l - \Delta L_i;$$

и, приложенная к данной нити, нагрузка P_{in}

$$P_{in} = \frac{l_{in}}{C_{0i} + C_{1i} \cdot l_{in}} + C_{2i} \cdot l_{in}. \quad (3.33)$$

Затем для каждого j -того элемента i -той нити определяются значения относительного удлинения ε_{ijn} на n -том этапе моделирования (решением методом итераций уравнения (3.34)):

$$\varepsilon_{ijn} = \frac{\gamma P_{in}}{T_{ij} \left(\frac{1}{b_{0ij} + b_{1ij} \varepsilon_{ijn}} + b_{2ij} \varepsilon_{ijn} \right)}, \quad (3.34)$$

и напряжения σ_{ijn} :

$$\sigma_{ijn} = P_{in} \cdot \frac{Y}{T_{ij}} \quad (3.35)$$

Абсолютное удлинение каждого j -того элемента i -той нити ε_{ijn} на n -м этапе моделирования будет определяться следующим соотношением:

$$l_{ijn} = \varepsilon_{ijn} \cdot \Delta L_{ij}. \quad (3.36)$$

При выполнении одного из следующих условий:

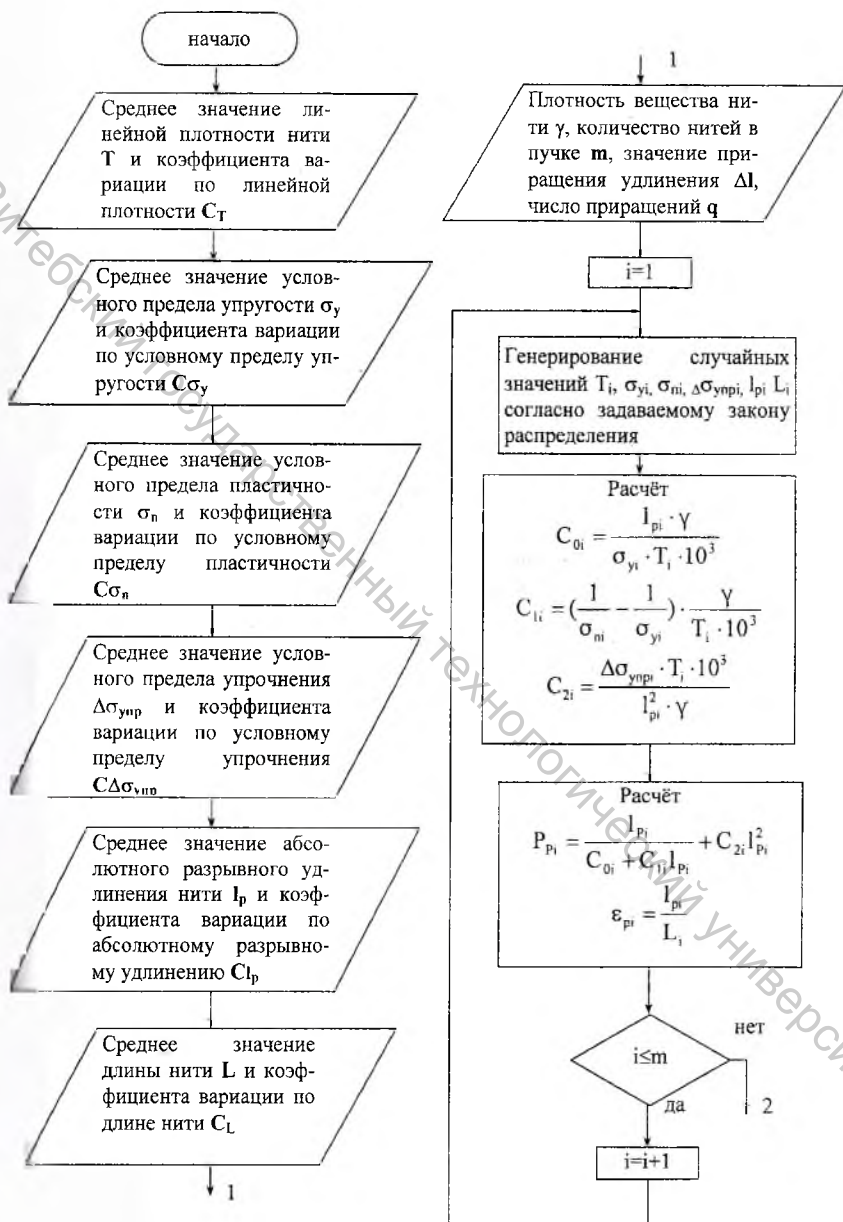
- $l_{in} \leq 0$ (когда $\Delta L_i \leq n \cdot \Delta l$);
- $l_{in} \geq l_{pi}$ или $P_{in} \geq P_{pi}$;
- $l_{ijn} \geq l_{pij}$ ($\varepsilon_{ijn} \geq \varepsilon_{pij}$) или $\sigma_{ijn} \geq \sigma_{pij}$

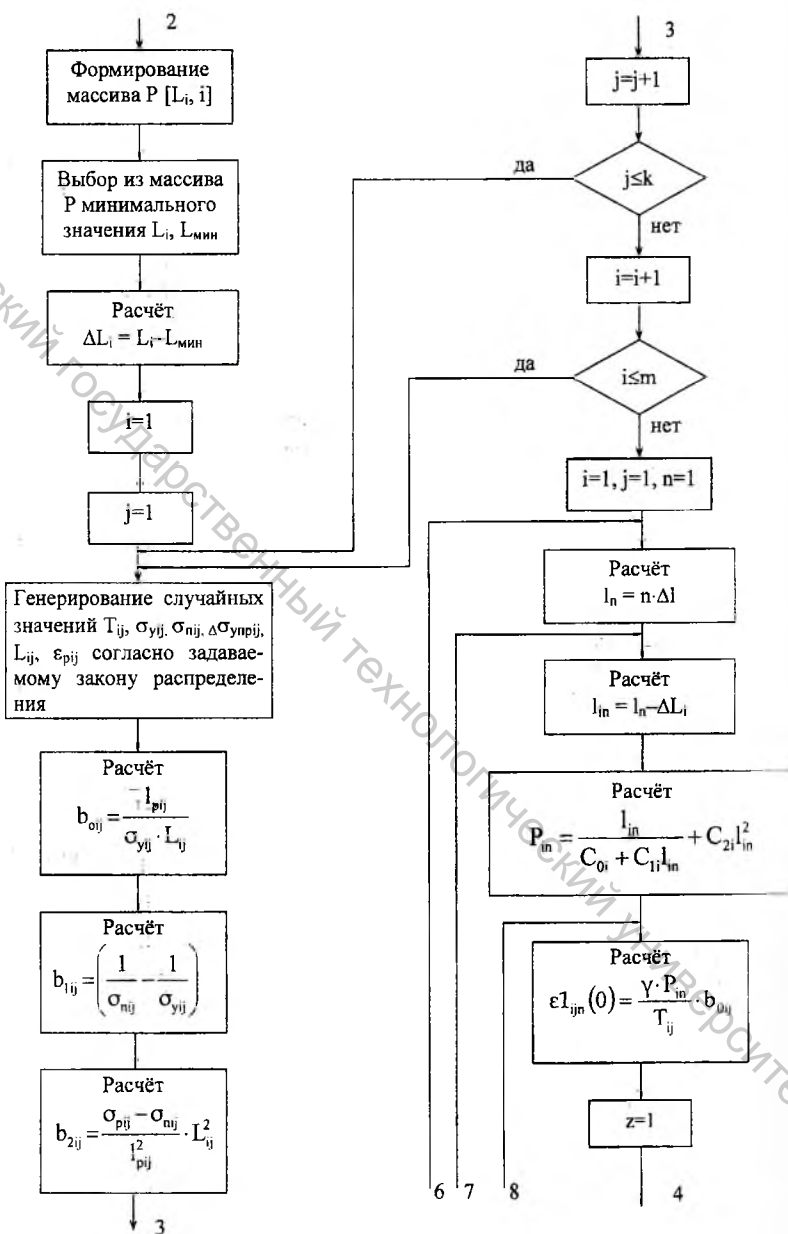
соответствующая i -я нить считается разорванной и далее текущее значение нагрузки, приложенной к i -той нити, P_{ijn} принимается равной нулю.

На каждом шаге моделирования определяется суммарная сила растяжения Q_n и средняя сила, приходящаяся на одну нить $\bar{P}_n$.

$$Q_n = \sum_{i=1}^m P_{in}; \quad \bar{P}_n = \frac{Q_n}{m}. \quad (3.37)$$

Результаты имитационного моделирования могут быть представлены в виде приведенных кривых растяжения пучка нитей в координатах «нагрузка P – абсолютное удлинение l ». Такое представление результатов моделирования позволяет произвести анализ влияния параметров вариации показателей строения и механических свойств на форму и параметры кривой растяжения на качественном уровне. Схема алгоритма совмещенной имитационной модели деформирования и разрушения текстильной нити, обладающей продольной и поперечной вариацией показателей строения и механических свойств представлена на рис.3.60.





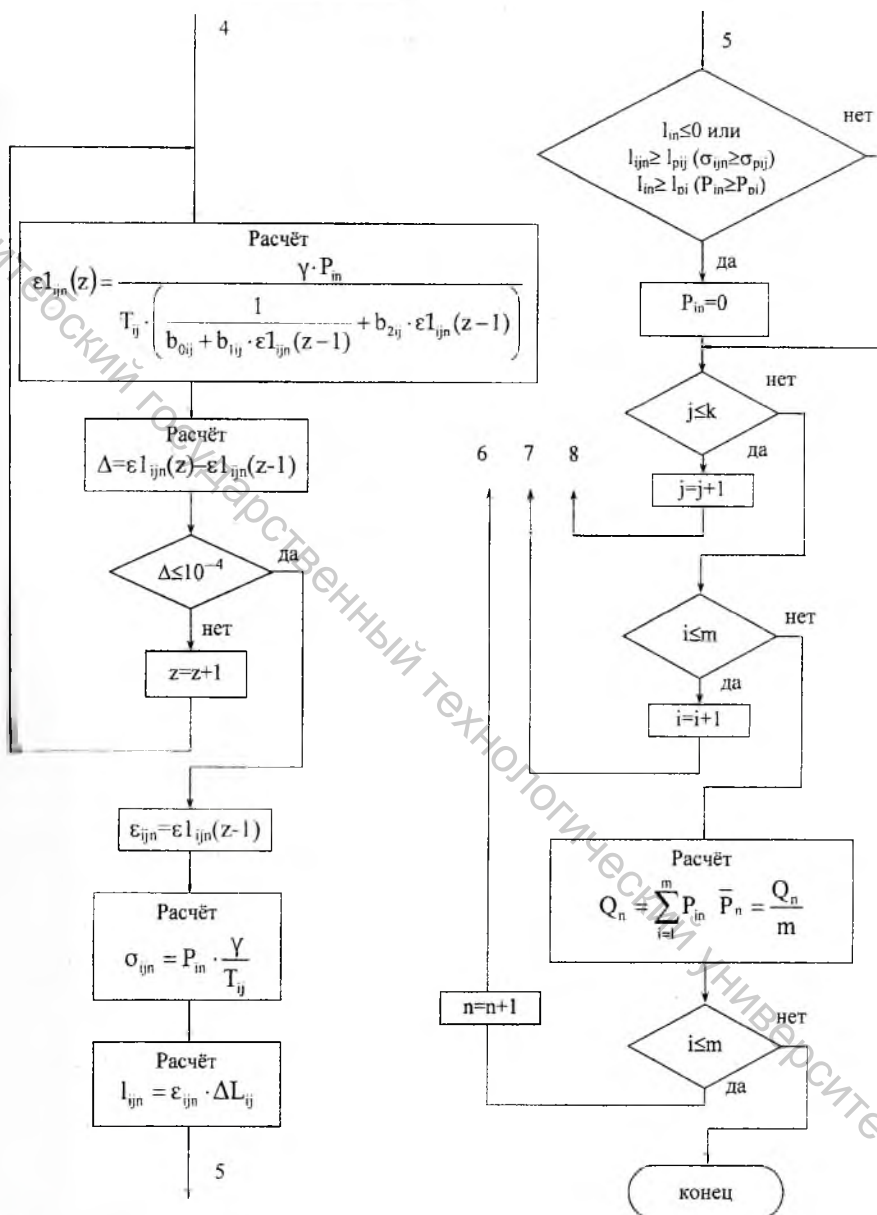


Рис.3.60. Схема алгоритма имитационной модели деформирования и разрушения текстильной нити (волокна), обладающей продольной и поперечной гетерогенностью показателей строения и механических свойств

3.4.2. Исследование совместного влияния продольной и поперечной вариаций показателей структуры и механических свойств на прочностные характеристики пучка текстильных нитей (волокон).

Данные исследования проводились на основе предложенной в п.3.4.1 совмещенной имитационной модели деформирования и разрушения текстильной нити, обладающей продольной и поперечной гетерогенностью показателей строения и механических свойств. В качестве объекта исследования использована «синтезированная» нить, параметры которой определены в п.3.3.1. При проведении имитационного моделирования было принято допущение, заключающееся в том, что параметры пучка «синтезированных» нитей, характеризующие их деформационные и прочностные свойства, являются независимыми случайными величинами и подчиняются нормальному закону распределения (либо закону распределения Вейбулла). При этом параметры распределения Вейбулла определялись на основе совместного решения уравнений (3.9), (3.10).

В качестве прочностных показателей текстильной нити при проведении исследований использовались: среднее значение разрывной нагрузки нити $\bar{R}_p$; среднее значение относительного удлинения, при котором происходит разрушение первой нити (волокна) пучка $\bar{\epsilon}_p$; среднее значение относительного удлинения, при котором происходит разрушение последней нити (волокна) пучка $\bar{\epsilon}_{pn}$ (полное относительное разрывное удлинение).

При исследовании совместного влияния продольной и поперечной вариаций показателей строения и механических свойств пучка нитей (волокон) на прочностные характеристики были поставлены следующие задачи:

- проведение анализа результатов совместного влияния наиболее значимых продольных и поперечных вариаций показателей строения и механических свойств нитей (волокон) пучка на средние значения прочностных характеристик;
- разработка обобщенных математических моделей, описывающих влияние различных продольных и поперечных вариаций по показателям строения и механических свойств на прочностные характеристики пучка нитей (волокон).

На основании анализа результатов влияния продольной гетерогенности показателей строения и механических свойств на прочностные характеристики (представленных в п. 3.2) было отмечено, что вариации условного предела упругости σ_y и относительного разрывного удлинения ϵ_r не оказывают существенного влияния на прочностные характеристики нити.

ти. Вследствие этого, исследования влияния вариаций указанных показателей на прочностные характеристики не проводилось. На рис.3.61 графически представлена степень влияния продольной вариации показателей структуры и механических свойств на прочностные характеристики. Данное графическое представление наглядно показывает, что при совместном влиянии продольных вариаций по различным свойствам не происходит изменения характера зависимости прочностных характеристик от параметров нестабильности, а также влияние отдельных параметров при их случайном одновременном изменении не суммируется (темп уменьшения показателей прочности при влиянии вариаций практически не изменяется относительно параметра K_p (K_ϵ) для вариации по наиболее значимому свойству). Вследствие этого, при проведении имитационного моделирования, значения коэффициентов продольной вариации показателей механических свойств принимали дискретные значения C_T , C_{σ_p} , $C_{\Delta\sigma_{упр}}$ – 0%, 5%, 10%, 15%, 20%.

На основании анализа результатов исследований, представленных в п.3.3, к свойствам, поперечная нестабильность которых оказывает значительное влияние на прочностные показатели текстильной нити было отнесено: степень разнородности L и относительное разрывное удлинение ϵ_p нитей (волокон) пучка. При проведении исследований шаг изменения коэффициента поперечной вариации по исследуемому свойству принимался равным 1%.

На основании анализа результатов имитационного моделирования испытания на растяжение текстильной нити, обладающей поперечной и продольной гетерогенностью показателей механических свойств и строения, некоторые из которых представлены на рис. 3.62–3.73 и табл. 3.12–3.14 установлено, что

- совместное влияние различных (продольных и поперечных) вариаций показателей структуры и механических свойств текстильных нитей не изменяет закономерного снижения среднего значения разрывной нагрузки при увеличении степени поперечной гетерогенности степени разнородности и относительного разрывного удлинения;
- для количественной оценки совместного влияния поперечной и продольной вариаций структуры и показателей механических свойств на разрывную нагрузку существует возможность использования обобщенной модели (3.18). Отмечается уменьшение значений параметров $\bar{R}_{p0}$ (среднего значения разрывной нагрузки при отсутствии поперечных вариаций) и темпового показателя K_{rp} модели (3.18), а асимметрия закона распределения не изменяет характер изменения параметров модели (3.18).

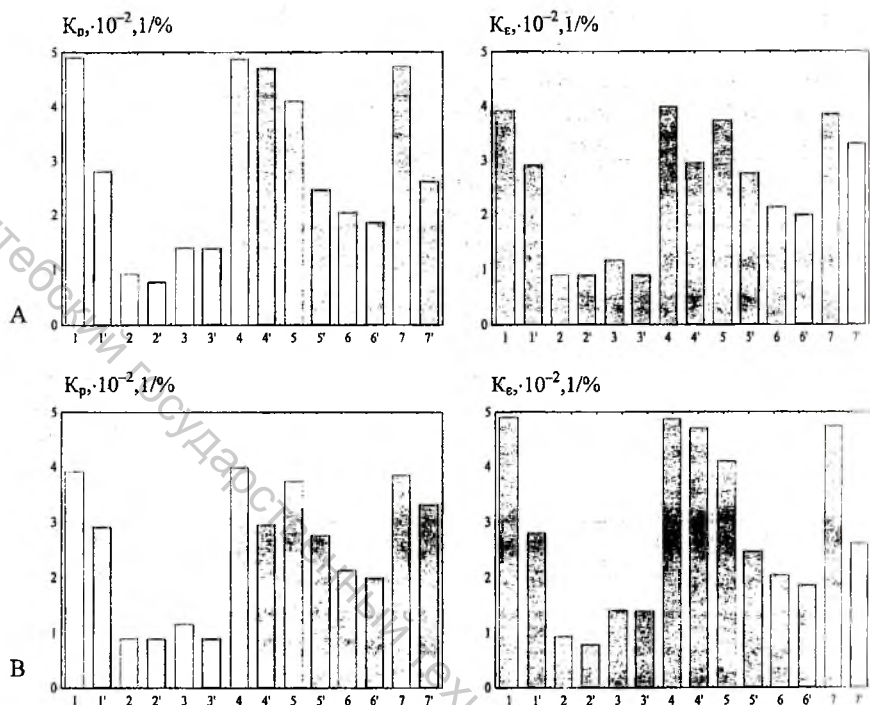


Рис.3.61. Графическое представление степени влияния продольной вариации показателей структуры и механических свойств на прочностные характеристики. (**А** – при постоянной скорости нарастания нагрузки, **В** – при постоянной скорости нарастания удлинения)

1,1' – вариация по линейной плотности нити;

2,2' – вариация по условному пределу пластичности нити;

3,3' – вариация по условному пределу упрочнения нити;

4,4' – совместное влияние вариаций по линейной плотности и условному пределу пластичности нити;

5,5' – совместное влияние вариаций по линейной плотности и условному пределу упрочнения нити;

6,6' – совместное влияние вариаций по условному пределу пластичности и условному пределу упрочнения нити;

7,7' – совместное влияние вариаций по линейной плотности, условному пределу упрочнения и условному пределу пластичности нити.

(**1,2,3,4,5,6,7** – при нормальном законе распределения,

1',2',3',4',5',6',7' – при распределении Вейбулла)

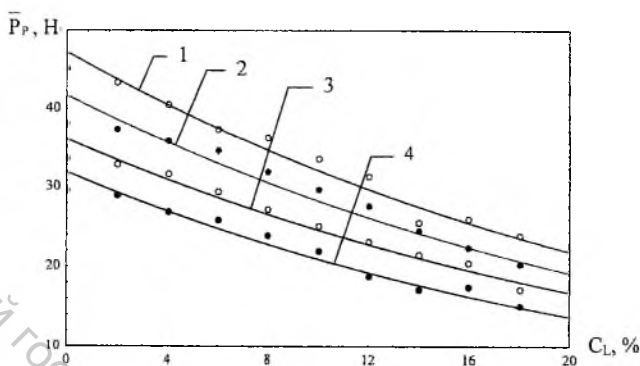


Рис.3.62. Зависимость среднего значения разрывной нагрузки пучка нитей (волокон) от коэффициента вариации по степени неоднородности C_L при различных значениях продольной гетерогенности показателей механических свойств нитей (волокон) пучка при **нормальном законе распределения**.

1– $C_T, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{нпр}=5\%$, 2– $C_T, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{нпр}=10\%$

3– $C_T, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{нпр}=15\%$, 4– $C_T, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{нпр}=20\%$

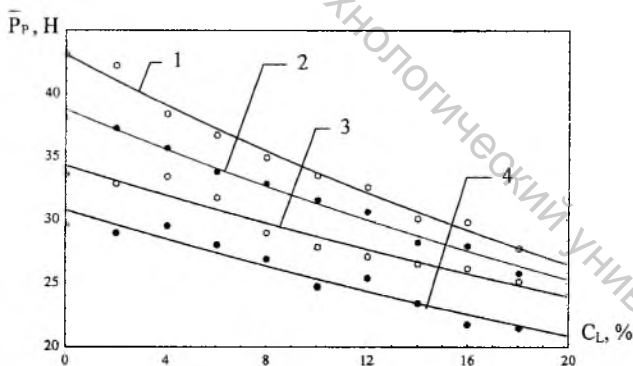


Рис.3.63. Зависимость среднего значения разрывной нагрузки пучка нитей (волокон) от коэффициента вариации по степени неоднородности C_L при различных значениях продольной гетерогенности показателей механических свойств нитей (волокон) пучка при **законе распределения Вейбулла**.

1– $C_T, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{нпр}=5\%$, 2– $C_T, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{нпр}=10\%$

3– $C_T, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{нпр}=15\%$, 4– $C_T, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{нпр}=20\%$

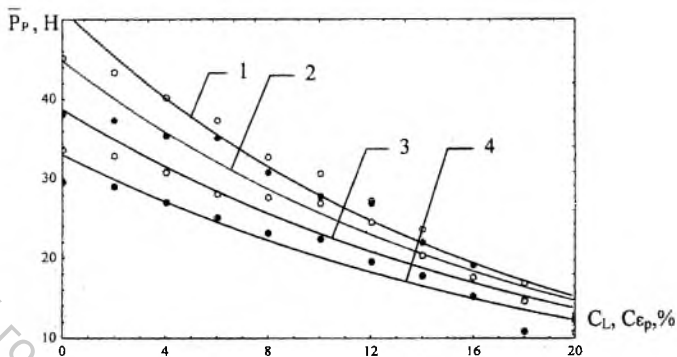


Рис.3.64. Зависимость среднего значения разрывной нагрузки пучка нитей (волокон) от коэффициентов вариации по степени разнородности C_L и относительному разрывному удлинению C_{ϵ_p} при различных значениях продольной гетерогенности показателей механических свойств нитей (волокон) пучка при **нормальном законе распределения**.

1— $C_L, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{\text{нр}}=5\%$, 2— $C_L, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{\text{нр}}=10\%$

3— $C_L, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{\text{нр}}=15\%$, 4— $C_L, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{\text{нр}}=20\%$

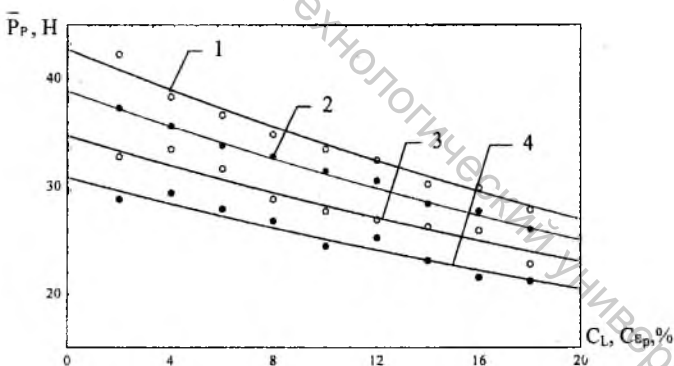


Рис.3.65. Зависимость среднего значения разрывной нагрузки пучка нитей (волокон) от коэффициентов вариации по степени разнородности C_L и относительному разрывному удлинению C_{ϵ_p} при различных значениях продольной гетерогенности показателей механических свойств нитей (волокон) пучка при **законе распределения Вейбулла**.

1— $C_L, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{\text{нр}}=5\%$, 2— $C_L, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{\text{нр}}=10\%$

3— $C_L, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{\text{нр}}=15\%$, 4— $C_L, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{\text{нр}}=20\%$

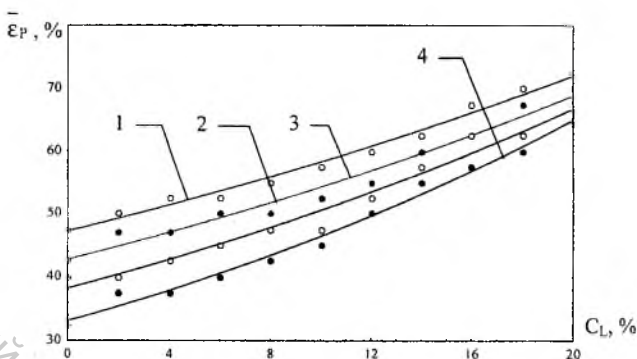


Рис.3.66. Зависимость среднего значения относительного разрывного удлинения пучка нитей (волокон) от коэффициента вариации по степени разноразличности C_L при различных значениях продольной гетерогенности показателей механических свойств нитей (волокон) пучка при нормальном законе распределения.

1- $C_T, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{yp}=5\%$, 2- $C_T, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{yp}=10\%$
 3- $C_T, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{yp}=15\%$, 4- $C_T, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{yp}=20\%$

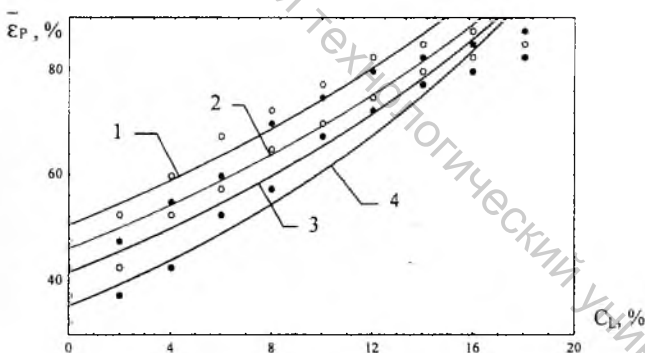


Рис.3.67. Зависимость среднего значения относительного разрывного удлинения пучка нитей (волокон) от коэффициента вариации по степени разноразличности C_L при различных значениях продольной гетерогенности показателей механических свойств нитей (волокон) пучка при законе распределения Вейбулла.

1- $C_T, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{yp}=5\%$, 2- $C_T, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{yp}=10\%$
 3- $C_T, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{yp}=15\%$, 4- $C_T, C_{\sigma_m}, C\Delta\sigma_{yp}=20\%$

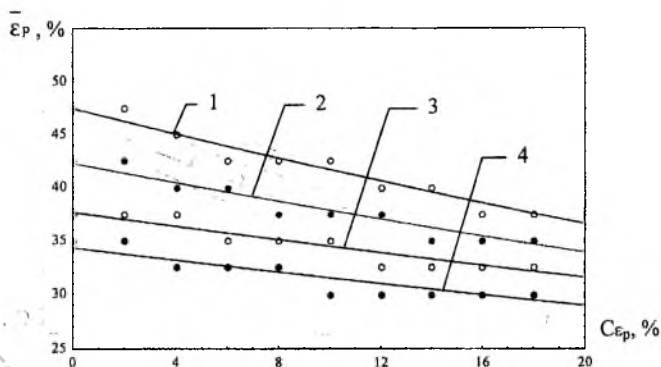


Рис.3.68. Зависимость среднего значения относительного разрывного удлинения пучка нитей (волокон) от коэффициента вариации по относительному разрывному удлинению C_{ε_p} при различных значениях продольной гетерогенности показателей механических свойств нитей (волокон) пучка при законе распределения Вейбулла.

1- $C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{yp}=5\%$, 2- $C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{yp}=10\%$

3- $C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{yp}=15\%$, 4- $C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{yp}=20\%$

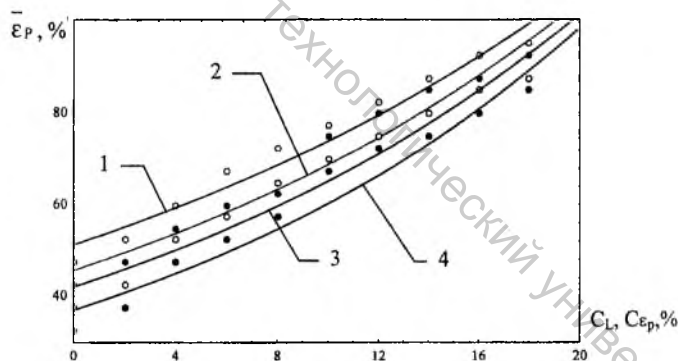


Рис.3.69. Зависимость среднего значения относительного разрывного удлинения пучка нитей (волокон) от коэффициентов вариации по степени разнородности C_L и относительному разрывному удлинению C_{ε_p} при различных значениях продольной гетерогенности показателей механических свойств нитей (волокон) пучка при законе распределения Вейбулла.

1- $C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{yp}=5\%$, 2- $C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{yp}=10\%$

3- $C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{yp}=15\%$, 4- $C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{yp}=20\%$

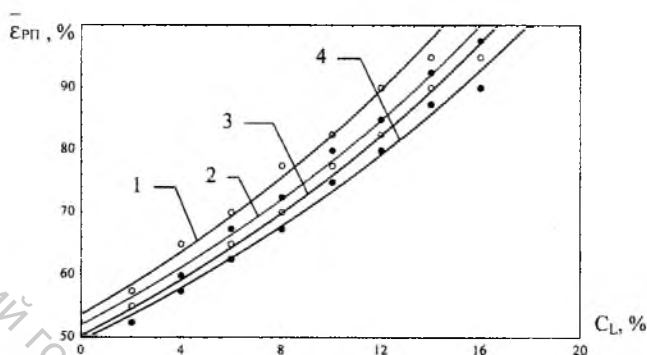


Рис.3.70. Зависимость среднего значения полного относительного разрывного удлинения пучка нитей (волокон) от коэффициента вариации по степени разнородности C_L при различных значениях продольной гетерогенности показателей механических свойств нитей (волокон) пучка при **нормальном законе распределения**.

1– $C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{ур}}=5\%$, 2– $C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{ур}}=10\%$
 3– $C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{ур}}=15\%$, 4– $C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{ур}}=20\%$

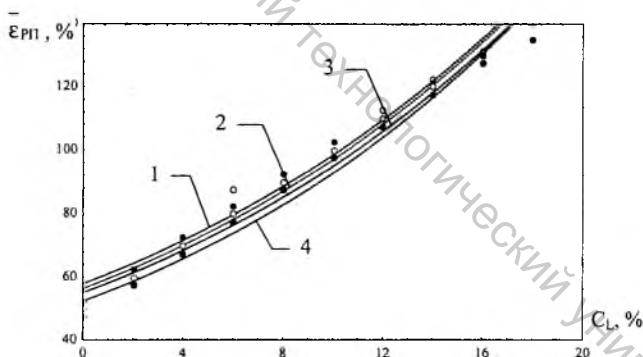


Рис.3.71. Зависимость среднего значения полного относительного разрывного удлинения пучка нитей (волокон) от коэффициента вариации по степени разнородности C_L при различных значениях продольной гетерогенности показателей механических свойств нитей (волокон) пучка при **законе распределения Вейбулла**.

1– $C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{ур}}=5\%$, 2– $C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{ур}}=10\%$
 3– $C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{ур}}=15\%$, 4– $C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{ур}}=20\%$

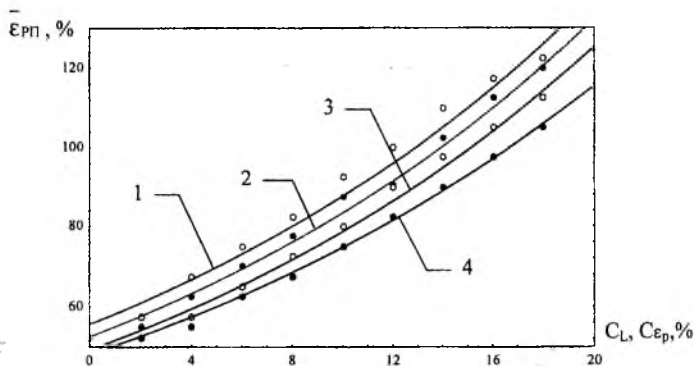


Рис.3.72. Зависимость среднего значения полного разрывного удлинения пучка нитей (волокон) от коэффициентов вариации по степени разнодлинности C_L и относительному разрывному удлинению C_{E_p} при различных значениях продольной гетерогенности показателей механических свойств нитей (волокон) пучка при нормальном законе распределения.

1— $C_L, C_{\sigma_n}, C\Delta\sigma_{нпр}=5\%$, 2— $C_L, C_{\sigma_n}, C\Delta\sigma_{нпр}=10\%$

3— $C_L, C_{\sigma_n}, C\Delta\sigma_{нпр}=15\%$, 4— $C_L, C_{\sigma_n}, C\Delta\sigma_{нпр}=20\%$

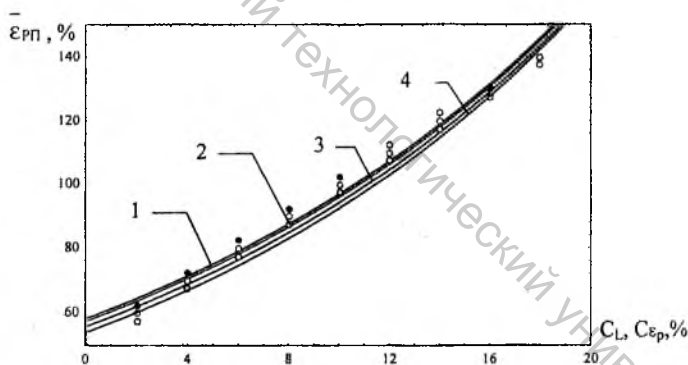


Рис.3.73. Зависимость среднего значения полного разрывного удлинения пучка нитей (волокон) от коэффициентов вариации по степени разнодлинности C_L и относительному разрывному удлинению C_{E_p} при различных значениях продольной гетерогенности показателей механических свойств нитей (волокон) пучка при законе распределения Вейбулла

1— $C_L, C_{\sigma_n}, C\Delta\sigma_{нпр}=5\%$, 2— $C_L, C_{\sigma_n}, C\Delta\sigma_{нпр}=10\%$

3— $C_L, C_{\sigma_n}, C\Delta\sigma_{нпр}=15\%$, 4— $C_L, C_{\sigma_n}, C\Delta\sigma_{нпр}=20\%$

Таблица 3.12

Параметры математической модели (3.18), описывающей совместное влияние различных поперечных и продольных вариаций механических свойств и строения на разрывную нагрузку пучка «синтезированных» нитей

Поперечные вариации по исследуемым механическим свойствам пучка «синтезированных» нитей	Продольные вариации по исследуемым механическим свойствам «синтезированных» нитей пучка	Среднее значение разрывной нагрузки пучка нитей при отсутствии вариаций $P_{\text{ср}}, H$		Темп уменьшения разрывной нагрузки $K_{\text{рр}}, \cdot 10^{-2}, 1\%$		Величина достоверности модели R^2	
		нормальное	Вейбула	нормальное	Вейбула	нормальное	Вейбула
Вариация по степени неоднородности нитей (волокон) пучка C_L	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{\text{упр}}} = 0\%$	47,24	45,82	3,32	3,17	0,971	0,951
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{\text{упр}}} = 5\%$	46,79	43,08	2,89	2,42	0,973	0,989
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{\text{упр}}} = 10\%$	41,74	38,78	2,64	2,14	0,961	0,987
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{\text{упр}}} = 15\%$	36,12	34,33	2,05	1,95	0,975	0,974
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{\text{упр}}} = 20\%$	31,93	30,79	1,92	1,81	0,965	0,962
Вариация по абсолютному разрывному удлинению C_{I_p}	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{\text{упр}}} = 0\%$	47,93	47,28	1,76	1,87	0,957	0,972
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{\text{упр}}} = 5\%$	45,92	43,27	1,29	1,32	0,953	0,931
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{\text{упр}}} = 10\%$	38,89	38,18	0,64	0,92	0,942	0,957
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{\text{упр}}} = 15\%$	34,11	33,67	0,61	0,87	0,931	0,992
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{\text{упр}}} = 20\%$	31,81	29,67	0,60	0,85	0,925	0,999
Вариация по абсолютному разрывному удлинению C_{I_p} и степени неоднородности C_L нитей (волокон) пучка	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{\text{упр}}} = 0\%$	47,27	45,14	3,62	3,52	0,964	0,938
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{\text{упр}}} = 5\%$	47,04	42,77	3,21	2,37	0,973	0,983
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{\text{упр}}} = 10\%$	44,85	38,89	2,87	2,25	0,961	0,991
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{\text{упр}}} = 15\%$	38,78	34,75	2,42	2,05	0,975	0,953
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{\text{упр}}} = 20\%$	33,02	30,91	2,07	2,03	0,965	0,956

Таблица 3.13

Параметры математической модели (3.19), описывающей совместное влияние различных поперечных и продольных вариаций механических свойств и строения на разрывное удлинение пучка «синтезированных» нитей

Поперечные вариации по исследуемым механическим свойствам пучка «синтезированных» нитей	Продольные вариации по исследуемым механическим свойствам «синтезированных» нитей пучка	Среднее значение разрывного удлинения пучка нитей при отсутствии вариаций ϵ , %		Темп изменения разрывного удлинения K_{ϵ} , 10^{-2} , 1/%		Величина достоверности модели R^2	
		нормальное	Вейбулла	нормальное	Вейбулла	нормальное	Вейбулла
Вариация по степени разнородности нитей (волокон) пучка C_L	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{упр}}=0\%$	50,14	51,15	2,07	2,46	0,937	0,947
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{упр}}=5\%$	48,51	50,07	2,11	3,63	0,945	0,945
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{упр}}=10\%$	42,73	46,05	2,39	4,11	0,987	0,935
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{упр}}=15\%$	39,41	41,59	2,86	4,54	0,954	0,936
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{упр}}=20\%$	34,18	35,33	3,47	5,42	0,938	0,947
Вариация по абсолютному разрывному удлинению C_{I_p}	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{упр}}=0\%$	49,56	48,75	-1,64	-1,54	0,972	0,928
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{упр}}=5\%$	48,19	47,18	-1,41	-1,37	0,967	0,984
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{упр}}=10\%$	42,18	41,25	-1,26	-1,18	0,958	0,973
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{упр}}=15\%$	38,63	37,87	-0,91	-0,85	0,947	0,935
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{упр}}=20\%$	35,11	34,84	-0,87	-0,82	0,959	0,948
Вариация по абсолютному разрывному удлинению C_{I_p} и степени разнородности C_L нитей (волокон) пучка	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{упр}}=0\%$	50,77	51,29	1,42	2,18	0,954	0,922
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{упр}}=5\%$	48,12	50,61	1,99	3,66	0,951	0,961
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{упр}}=10\%$	43,04	45,65	2,52	4,11	0,948	0,959
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{упр}}=15\%$	38,88	42,04	2,94	4,39	0,935	0,944
	$C_T, C_{\sigma_n}, C_{\Delta\sigma_{упр}}=20\%$	34,85	37,00	3,72	5,20	0,933	0,938

Таблица 3.14

Параметры математической модели (3.20), описывающей совместное влияние различных поперечных и продольных вариаций механических свойств и строения на полное разрывное удлинение пучка «синтезированных» нитей

Поперечные вариации по исследуемым механическим свойствам пучка «синтезированных» нитей	Продольные вариации по исследуемым механическим свойствам «синтезированных» нитей пучка	Среднее значение полного разрывного удлинения пучка нитей при отсутствии вариаций ε , %		Темп изменения полного разрывного удлинения, $K\varepsilon_{рп} \cdot 10^{-2}$, 1/%		Величина достоверности модели R^2	
		нормальное	Вейбулла	нормальное	Вейбулла	нормальное	Вейбулла
Вариация по степени разнородности нитей (волокон) пучка C_L	$C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{упр}=0\%$	56,01	58,12	4,45	4,46	0,961	0,965
	$C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{упр}=5\%$	54,75	57,87	4,50	5,31	0,989	0,966
	$C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{упр}=10\%$	51,04	56,38	4,51	5,42	0,992	0,974
	$C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{упр}=15\%$	49,31	55,05	4,54	5,45	0,994	0,980
	$C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{упр}=20\%$	48,24	52,04	4,69	5,71	0,995	0,973
Вариация по абсолютному разрывному удлинению Cl_p	$C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{упр}=0\%$	52,61	49,91	2,26	1,66	0,949	0,968
	$C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{упр}=5\%$	51,45	48,17	1,91	0,87	0,969	0,984
	$C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{упр}=10\%$	48,68	47,04	1,76	0,74	0,947	0,965
	$C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{упр}=15\%$	47,72	46,23	1,14	0,62	0,952	0,953
	$C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{упр}=20\%$	46,89	45,02	1,07	0,53	0,948	0,947
Вариация по абсолютному разрывному удлинению Cl_p и степени разнородности C_L нитей (волокон) пучка	$C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{упр}=0\%$	57,69	58,72	4,36	4,44	0,956	0,947
	$C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{упр}=5\%$	55,59	58,15	4,54	5,11	0,9721	0,985
	$C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{упр}=10\%$	52,54	57,33	4,61	5,14	0,994	0,964
	$C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{упр}=15\%$	50,76	55,74	4,66	5,24	0,997	0,973
	$C_T, C\sigma_n, C\Delta\sigma_{упр}=20\%$	49,69	53,97	4,73	5,38	0,992	0,952

С целью разработки обобщенной математической модели совместного влияния различных вариаций на прочностные характеристики текстильной нити введем понятие **обобщенного показателя продольной вариации** показателей механических свойств и строения $\delta_{пр}$:

$$\delta_{пр} = K_T \cdot C_T = K_{\sigma_n} \cdot C_{\sigma_n} = K_{\Delta\sigma_{упр}} \cdot C_{\Delta\sigma_{упр}} = \dots = K_{i_{пр}} \cdot C_{i_{пр}}, \quad (3.39)$$

где K_T (K_{σ_n} , $K_{\Delta\sigma_{упр}}$) – темп уменьшения разрывной нагрузки P_p при увеличении вариации по линейной плотности (условному пределу пластичности либо условному пределу упрочнения) нити, 1/%.

$C_{i_{пр}}$ – коэффициент вариации по показателю i -того свойства нити, %

$K_{i_{пр}}$ – темп уменьшения разрывной нагрузки P_p при увеличении вариации показателя i -того свойства нити, 1/%.

Анализ математической модели (3.11) указывает, что обобщенный показатель продольной вариации $\delta_{пр}$ является безразмерным показателем.

$$\bar{P}_p(C_{i_{пр}}) = \bar{P}_{p0} \exp[-\delta_{пр}] \Rightarrow \delta_{пр} = -\ln \frac{\bar{P}_p(C_{i_{пр}})}{\bar{P}_{p0}}, \quad (3.40)$$

$$\Delta = \frac{\bar{P}_p(C_{i_{пр}})}{\bar{P}_{p0}} = \exp[-\delta_{пр}], \quad (3.41)$$

где $\bar{P}_p(C_{i_{пр}})$ – текущее значение разрывной нагрузки при наличии продольной вариации по i -тому свойству нити, Н

$\bar{P}_{p0}$ – значение разрывной нагрузки текстильной нити при отсутствии продольной гетерогенности показателей строения и механических свойств, Н.

Δ – относительный показатель снижения разрывной нагрузки текстильной нити вследствие наличия продольной вариации показателей механических свойств и строения.

Следовательно, $\delta_{пр} = 1$ при условии, если текущее значение прочности нити при наличии продольных вариаций показателей строения и механических свойств $\bar{P}_p(C_{i_{пр}})$ меньше значения разрывной нагрузки при отсутствии продольной гетерогенности $\bar{P}_{p0}$ в e раз.

Необходимость введения обобщенного показателя продольной вариации $\delta_{пр}$ обуславливается тем фактом, что все зависимости разрывной нагрузки текстильной нити от коэффициентов продольной вариации показателей механических свойств и строения идентичны (рис.3.11 – 3.19), а проведение анализа влияния продольной гетерогенности показателей структу-

ры и механических свойств на прочностные характеристики в безразмерной форме сокращает объём факторного пространства. Анализ математической модели (3.41), а также её графическая интерпретация, представленная на рис.3.74, позволяет отметить, что для любых видов текстильных нитей данная математическая модель является адекватной. Отличие для текстильных нитей различного сырьевого состава наблюдается только в диапазоне изменения обобщенного показателя продольной вариации $\delta_{пр}$. Следовательно, с определением диапазона изменения значений $\delta_{пр}$ появляется возможность оценки степени влияния продольной гетерогенности показателей структуры и механических свойств на прочностные характеристики.

При проведении имитационного моделирования совместного влияния продольных и поперечных вариаций показателей строения и механических

свойств на прочностные характеристики значение обобщенного показателя продольной вариации $\delta_{пр}$ изменялось в диапазоне от 0 до 6,72 при нормальном законе распределения и в диапазоне от 0 до 7,71 при законе распределения Вейбулла.

Таким образом, обобщенная математическая модель совместного влияния продольной и поперечной гетерогенности показателей строения и механических свойств на разрывную нагрузку текстильной нити (соотношение (3.15)) имеет следующей вид:

$$\bar{P}_p(C_j, \delta_{пр}) = \bar{P}_{p0}(\delta_{пр}) \cdot \exp[-K_p(\delta_{пр}) \cdot C_j], \quad (3.41)$$

где $\bar{P}_{p0}(\delta_{пр})$ – среднее значение разрывной нагрузки текстильной нити при отсутствии поперечных вариаций показателей механических свойств и строения как функции от обобщенного показателя продольной вариации $\delta_{пр}$, Н;

$K_p(\delta_{пр})$ – темп уменьшения разрывной нагрузки текстильной нити при наличии поперечных вариаций показателей механических свойств и строения как функции от обобщенного показателя продольной вариации $\delta_{пр}$, 1/%;

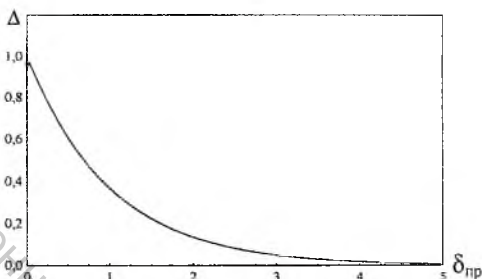


Рис.3.74. Зависимость относительного показателя снижения разрывной нагрузки текстильной нити (волокна) Δ , обладающей продольной вариацией показателей строения и механических свойств, от обобщенного показателя продольной вариации $\delta_{пр}$

C_j – коэффициент поперечной вариации значимых показателей механических свойств и строения текстильной нити, %

На основе анализа результатов имитационного моделирования, представленных в табл.3.12, для количественной оценки влияния обобщенного показателя продольной вариации $\delta_{пр}$ структуры и показателей механических свойств на параметры $\bar{P}_{p0}(\delta_{пр})$ и $K_p(\delta_{пр})$ предлагается использовать следующие обобщенные модели:

$$\bar{P}_{p0}(\delta_{пр}) = \bar{P}_0 \cdot \exp[-b_p \cdot \delta_{пр}], \quad (3.42)$$

где $\bar{P}_0$ – среднее значение разрывной нагрузки пучка синтезированных нитей (волокон) при отсутствии поперечной и продольной гетерогенности механических свойств и структуры, Н;
 b_p – безразмерный темп уменьшения значения параметра $\bar{P}_{p0}(\delta_{пр})$ модели (3.41).

$$K_p(\delta_{пр}) = K_{p0} - a_p \cdot \delta_{пр}, \quad (3.43)$$

где K_{p0} – темп снижения разрывной нагрузки при условии отсутствия продольной вариации показателей механических свойств и структуры нити, 1/%;

a_p – параметр модели, характеризующий абсолютное изменение темпа уменьшения разрывной нагрузки текстильной нити при увеличении обобщенного показателя продольной вариации $\delta_{пр}$, 1/%.

Следует отметить, что по результатам проведенного имитационного моделирования установлено, что параметры $\bar{P}_0$ и b_p модели (3.42) не зависят от показателей поперечной гетерогенности механических свойств и структуры текстильной нити и находятся в пределах: $\bar{P}_0 = 47,99\text{--}50,16$ Н, $b_p = 0,05\text{--}0,06$. Ассиметрия закона распределения случайных величин при проведении моделирования не влияет на численные значения данных параметров.

Численные значения параметров модели (3.43) представлены в табл.3.15. Обработка полученных результатов имитационного моделирования осуществлялась с использованием математического пакета “Statistica”.

Следует отметить, что при случайном совместном влиянии поперечных вариаций практически не происходит изменения численных значений параметров модели (3.43) относительно значений данных параметров, полученных при влиянии поперечной вариации наиболее значимого свойства нити (степени неоднородности нитей или волокон в пучке).

Таблица 3.15

Параметры математической модели (3.43), описывающей влияние обобщенного показателя продольной вариации $\delta_{пр}$ на темповый параметр K_p модели (3.41)

Поперечные вариации по исследуемым механическим свойствам пучка «синтезированных» нитей (волокон)	Среднее значение K_{p0} , 1/%		Среднее значение a_p , 1/%		Величина достоверности модели R^2	
	нормальное	Вейбулла	нормальное	Вейбулла	нормальное	Вейбулла
Вариация по абсолютному разрывному удлинению нитей (волокон) пучка Cl_p	1,76	1,58	0,18	0,18	0,941	0,963
Вариация по степени разнотолщинности нитей (волокон) пучка Cl_L	3,02	3,29	0,19	0,22	0,963	0,967
Вариация по абсолютному разрывному удлинению Cl_p и степени разнотолщинности Cl_L нитей (волокон) пучка	3,01	3,61	0,20	0,23	0,956	0,974

Подставив соотношения (3.42), (3.43) в модель (3.41) получим общий вид обобщенной математической модели совместного влияния продольной и поперечной гетерогенности показателей строения и механических свойств на разрывную нагрузку текстильной нити:

$$\bar{P}_p(C_j, \delta_{пр}) = \bar{P}_0 \cdot \exp\left[-\left(b_p \cdot \delta_{пр} + (K_{p0} - a_p \cdot \delta_{пр}) \cdot C_j\right)\right]. \quad (3.44)$$

В результате проведенного имитационного моделирования

- подтвержден неоднозначный характер влияния значимых показателей поперечной гетерогенности структуры и механических свойств пучка нитей (волокон) на относительное разрывное удлинение (табл. 3.13). В отличие от влияния вариации степени разнотолщинности нитей (волокон) пучка, увеличение степени абсолютного разрывного удлинения Cl_p пучка нитей (волокон) приводит к снижению относительного разрывного удлинения первой из разорвавшейся нити (волокна) пучка;
- для количественной оценки совместного влияния поперечной и продольной вариаций структуры и показателей механических свойств на разрывную нагрузку существует возможность использования обобщенной модели (3.19). При увеличении значения обобщенного показателя продольной вариации $\delta_{пр}$ происходит закономерное изменение

значений параметров $\bar{\varepsilon}_{p0}$ и $K_{\varepsilon p}$ математической модели (3.19). Ассиметрия закона распределения не изменяет характер изменения параметров модели (3.19).

Для количественной оценки совместного влияния параметров продольной и поперечной вариаций механических свойств и структуры на среднее значение относительного разрывного удлинения пучка “синтезированных” нитей (волокон) воспользуемся, разработанной в п.3.3, математической моделью (3.19) с учётом подхода, предложенного для построения модели (3.44).

Обобщенная математическая модель совместного влияния продольной и поперечной гетерогенности показателей строения и механических свойств на среднее значение относительного разрывного удлинения имеет следующий вид:

$$\varepsilon_p(C_j, \delta_{np}) = \bar{\varepsilon}_{p0}(\delta_{np}) \cdot \exp[K_{\varepsilon}(\delta_{np}) \cdot C_j], \quad (3.45)$$

где $\bar{\varepsilon}_{p0}(\delta_{np})$, $K_{\varepsilon}(\delta_{np})$ – параметры математической модели, имеющие физический смысл, аналогичный соответствующих параметров модели (3.41).

На основе анализа результатов имитационного моделирования, представленных в табл.3.13, для количественной оценки влияния обобщенного показателя продольной вариации δ_{np} структуры и показателей механических свойств на параметры $\bar{\varepsilon}_{p0}(\delta_{np})$, $K_{\varepsilon}(\delta_{np})$ предлагается использовать следующие обобщенные модели, аналогичные моделям (3.42), (3.43):

$$\bar{\varepsilon}_{p0}(\delta_{np}) = \bar{\varepsilon}_0 \cdot \exp[-b_{\varepsilon} \cdot \delta_{np}], \quad (3.46)$$

$$K_{\varepsilon}(\delta_{np}) = K_{\varepsilon 0} + a_{\varepsilon} \cdot \delta_{np}, \quad (3.47)$$

При этом следует отметить, что физический смысл параметров моделей (3.46) и (3.47) является аналогичным смыслу соответствующих параметров моделей (3.42), (3.43).

По результатам проведенного имитационного моделирования установлено, что параметры $\bar{\varepsilon}_0$ и b_{ε} модели (3.46) не зависят от показателей поперечной гетерогенности и находятся в пределах:

- при нормальном законе распределения $\bar{\varepsilon}_0 = 50,83 - 51,74 \%$, $b_{\varepsilon} = 0,054 - 0,058$.
- при законе распределения Вейбулла $\bar{\varepsilon}_0 = 49,89 - 53,21 \%$, $b_{\varepsilon} = 0,046 - 0,048$.

Численные значения параметров модели (3.43) представлены в табл.3.16. Обработка полученных результатов имитационного моделирования осуществлялась с использованием математического пакета “Statistica”.

Таблица 3.16

Параметры математической модели (3.47), описывающей влияние обобщенного показателя продольной вариации $\delta_{пр}$ на темповый параметр K_ϵ модели (3.45)

Поперечные вариации по исследуемым механическим свойствам пучка «синтезированных» нитей (волокон)	Среднее значение $K_{\epsilon 0}$, 1/%		Среднее значение a_ϵ , 1/%		Величина достоверности модели R^2	
	нормальное	Вейбулла	нормальное	Вейбулла	нормальное	Вейбулла
Вариация по абсолютному разрывному удлинению нитей (волокон) пучка Cl_p	1,87	2,67	0,21	0,35	0,961	0,965
Вариация по степени разнотолщинности нитей (волокон) пучка Cl_L	-1,63	-1,54	0,12	0,10	0,991	0,959
Вариация по абсолютному разрывному удлинению Cl_p и степени разнотолщинности Cl_L нитей (волокон) пучка	1,1	2,55	0,33	0,35	0,908	0,918

Таким образом, обобщенная математическая модель совместного влияния параметров продольной и поперечной вариации механических свойств и структуры на среднее значение относительного разрывного удлинения первой из разорвавшейся нити (волокна) пучка имеет следующий вид:

$$\bar{\epsilon}_p(C_j, \delta_{пр}) = \bar{\epsilon}_0 \cdot \exp[(K_{\epsilon 0} + a_\epsilon \cdot \delta_{пр}) \cdot C_j - b_\epsilon \cdot \delta_{пр}]. \quad (3.48)$$

В результате проведенных исследований установлено, что

- совместное влияние различных (продольных и поперечных) вариаций показателей структуры и механических свойств текстильной нити не изменяет закономерный характер увеличения полного разрывного удлинения $\epsilon_{рп}$ (табл.3.14).
- Полученные результаты не находятся в противоречии с данными имитационного моделирования по деформированию и разрушению текстильной нити, обладающей поперечной гетерогенностью показателей строения и механических свойств, представленными в п.3.3. Следовательно, для количественной оценки совместного влияния различных вариаций на полное разрывное удлинение пучка «синтезированных»

нитей существует возможность использования математической модели (3.20).

- Установлено закономерное уменьшение значений параметров $\bar{\varepsilon}_{pn0}$ (среднего значения полного разрывного удлинения при отсутствии поперечных вариаций) и темпового параметра $K_{\varepsilon_{np}}$ модели (3.20) при увеличении степени продольной вариации показателей механических свойств и структуры.
- Ассиметрия закона распределения при проведении имитационного моделирования, отражающая смещение моды закона распределения относительно среднего значения в сторону больших значений, не изменяет закономерный характер изменения параметров модели (3.20).

Для разработки совмещенной модели влияния различных вариаций на полное разрывное удлинение воспользуемся математической моделью (3.20) с учётом подхода, предложенного для построения моделей (3.44), (3.48):

$$\bar{\varepsilon}_{pn}(C_j, \delta_{np}) = \bar{\varepsilon}_{pn0}(\delta_{np}) \cdot \exp[K_{\varepsilon_{np}}(\delta_{np}) \cdot C_j], \quad (3.49)$$

где $\bar{\varepsilon}_{pn0}(\delta_{np})$, $K_{\varepsilon_{np}}(\delta_{np})$ – параметры математической модели, имеющие физический смысл, аналогичный соответствующих параметров модели (3.41) и (3.45).

На основе анализа результатов имитационного моделирования, представленных в табл.3.14, для количественной оценки влияния обобщенного показателя продольной вариации δ_{np} структуры и показателей механических свойств на параметры $\bar{\varepsilon}_{pn0}(\delta_{np})$, $K_{\varepsilon_{np}}(\delta_{np})$ предлагается использовать следующие обобщенные модели, аналогичные моделям (3.42), (3.43), (3.46), (3.47):

$$\bar{\varepsilon}_{pn0}(\delta_{np}) = \bar{\varepsilon}_{pn0} \cdot \exp[-b_{\varepsilon_{np}} \cdot \delta_{np}], \quad (3.50)$$

$$K_{\varepsilon_{np}}(\delta_{np}) = K_{\varepsilon_{np0}} + a_{\varepsilon_{np}} \cdot \delta_{np}, \quad (3.51)$$

Физический смысл параметров моделей (3.46) и (3.47) является идентичным смыслу соответствующих параметров моделей (3.42), (3.43), (3.46), (3.47).

Оценка параметров математических моделей (3.50), (3.51) производилась с использованием математического пакета “Statistica”. Численные значения параметров моделей (3.50), (3.51) представлены в табл.3.17, 3.18.

Таблица 3.17

Параметры математической модели (3.50), описывающей влияние обобщенного показателя продольной вариации $\delta_{пр}$ на параметр $\bar{\epsilon}_{p0}$ модели (3.45)

Поперечные вариации по исследуемым механическим свойствам пучка «синтезированных» нитей (волокон)	Среднее значение $\bar{\epsilon}_{p0}$, %		Среднее значение $\bar{\epsilon}_{вп}$		Величина достоверности модели R^2	
	нормальное	Вейбулла	нормальное	Вейбулла	нормальное	Вейбулла
Вариация по абсолютному разрывному удлинению нитей (волокон) пучка Cl_p	56,13	58,95	0,024	0,012	0,963	0,946
Вариация по степени разнодлинности нитей (волокон) пучка Cl	52,54	49,64	0,018	0,012	0,957	0,986
Вариация по абсолютному разрывному удлинению Cl_p и степени разнодлинности Cl нитей (волокон) пучка	57,52	59,20	0,023	0,014	0,976	0,934

Таблица 3.18

Параметры математической модели (3.51), описывающей влияние обобщенного показателя продольной вариации $\delta_{пр}$ на темповый параметр $K\epsilon_n$ модели (3.45)

Поперечные вариации по исследуемым механическим свойствам пучка «синтезированных» нитей (волокон)	Среднее значение $K\epsilon_{10}$, 1/%		Среднее значение $a\epsilon_{п}$, 1/%		Величина достоверности модели R^2	
	Нормальное	Вейбулла	нормальное	Вейбулла	нормальное	Вейбулла
Вариация по абсолютному разрывному удлинению нитей (волокон) пучка Cl_p	4,41	4,66	0,05	0,11	0,968	0,957
Вариация по степени разнодлинности нитей (волокон) пучка Cl	2,26	1,37	-0,18	-0,13	0,985	0,962
Вариация по абсолютному разрывному удлинению Cl_p и степени разнодлинности Cl нитей (волокон) пучка	4,43	4,74	0,03	0,13	0,971	0,954

Следовательно, математическая модель совместного влияния параметров продольной и поперечной вариаций механических свойств и структуры на среднее значение полного относительного разрывного удлинения (разрывное удлинение последней из разорвавшихся нитей или волокон пучка) имеет следующий вид:

$$\bar{\varepsilon}_{\text{рп}}(C_j, \delta_{\text{пр}}) = \bar{\varepsilon}_{\text{п0}} \cdot \exp \left[(K_{\varepsilon_{10}} + a_{\varepsilon_{\text{п}}} \cdot \delta_{\text{пр}}) \cdot C_j - b_{\varepsilon_{\text{п}}} \cdot \delta_{\text{пр}} \right]. \quad (3.52)$$

Таким образом, в результате комплекса аналитических исследований произведено научное обоснование и введение обобщенного безразмерного показателя продольной вариации показателей механических свойств и строения $\delta_{\text{пр}}$ и разработаны обобщенные математические модели совместного влияния параметров продольной и поперечной вариаций механических свойств и структуры на среднее значение разрывной нагрузки текстильной нити, на среднее значение относительного разрывного удлинения первой и последней разорвавшейся нити пучка.

РЕЗЮМЕ

По результатам проведенных исследований, основанных на имитационном моделировании процесса испытания:

1. разработаны алгоритмы статистической имитации процесса деформирования и разрушения текстильной нити, обладающей различного вида неравномерностью показателей механических свойств и структуры
2. установлена закономерность влияния показателей продольной и поперечной гетерогенности строения и механических свойств текстильных нитей (волокон) пучка на характеристики кривой растяжения в координатах «нагрузка – удлинение»; произведена количественная оценка с разработкой соответствующих моделей прогноза влияния продольных и поперечных вариаций показателей структуры и механических свойств на прочностные характеристики нити. С увеличением степени указанной неравномерности закономерно снижаются прочностные показатели текстильных нитей (волокон);
3. установлено, что наибольшее влияние на прочностные характеристики текстильных материалов оказывают продольные вариации по линейной плотности, условному пределу упрочнения и пластичности, а также поперечные гетерогенности степени разностроенности нитей (волокон) пучка и абсолютного разрывного удлинения; произведен анализ слу-

чайного совместного влияния различных продольных и поперечных вариаций (строения, механических свойств нити) на форму и параметры кривой растяжения, а также на прочностные характеристики текстильных материалов.

4. проведено теоретическое обоснование подхода к вопросу оценки показателей поперечной гетерогенности показателей структуры и механических свойств текстильных нитей в зависимости от формы и параметров кривой растяжения; научно обоснованы и разработаны математические модели оценки показателей поперечной гетерогенности степени неоднородности и абсолютного разрывного удлинения пучка нитей (волокон) по результатам полуциклового испытания на растяжение, применение которых позволит без использования дополнительного специального оборудования значительно расширить диапазон полученных сведений, и позволит более объективно и всесторонне оценить качество волокон и нитей;
5. проведены исследования совместного влияния продольной и поперечной гетерогенности показателей структуры и механических свойств на прочностные характеристики текстильных материалов. Произведена оценка совместного влияния поперечных и продольных вариаций показателей структуры и механических свойств на прочностные характеристики текстильных нитей не только на качественном, но и на количественном уровне с разработкой соответствующих моделей прогноза. Произведен анализ случайного совместного влияния различных поперечных и продольных вариаций (строения, механических свойств нити) на форму и параметры кривой растяжения, а также на прочностные характеристики текстильных материалов;

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНЫХ СВОЙСТВ ТЕКСТИЛЬНЫХ НИТЕЙ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.

4.1. Общие положения об усталостных характеристиках и методах их оценки при многократном растяжении текстильных материалов.

Текстильные материалы в процессах переработки и эксплуатации постоянно подвергаются действию небольших по величине многократных переменных напряжений, в результате чего свойства материала ухудшаются до тех пор, пока не произойдет его разрушение. Данный процесс разрушения текстильного материала получил название усталостного. Знание закономерностей разрушения нитей от усталости позволяет уточнить условия их переработки, разработать научные основы получения текстильного материала с заданными свойствами и может быть учтено при выборе конструкции изделий.

Среди усталостных характеристик текстильных материалов обычно различают [8, 9]:

выносливость – число циклов растяжения, которое выдерживает материал до своего разрушения, цикл;

долговечность – время, в течение которого производилось испытание на многократное растяжение образца;

предел выносливости – наибольшая заданная циклическая деформация, при которой материал выдерживает, не разрушаясь, очень большое число циклов (сотню тысяч и более), %.

остаточная циклическая деформация – величина деформации, накопившейся за некоторое число циклов и не исчезающей в процессе непрерывного приложения этих циклов, %.

Наиболее распространенной из вышеперечисленных характеристик является выносливость.

Анализ работ, посвященных вопросам оценки и прогнозирования показателей усталостных свойств текстильных нитей, позволяет отметить, что данные исследования в основном направлены на решение следующих задач:

- установлению взаимосвязи показателей усталостных свойств текстиль-

ных нитей и условий их дальнейшей переработки в процессе ткачества [62–76];

- исследованию влияния условий проведения испытаний на показатели усталостных свойств текстильных нитей [77–86].

4.1.1. Влияние усталостных свойств текстильных нитей на процессы их переработки

Систематические исследования в области изучения усталости текстильных материалов начались с конца 1940-х годов под руководством проф. Кукина Г.Н. в Московском текстильном институте.

Возникновение явления усталости в процессах переработки впервые было отмечено Б.П. Поздняковым, который установил, что в процессе ткачества утомление основной хлопчатобумажной пряжи происходит более интенсивно, нежели уточной [62].

Актуальность изучения усталостных свойств текстильных материалов для наиболее полной оценки его поведения при переработке и дальнейшего использования подтверждается целым рядом работ отечественных и зарубежных исследователей [63–65].

Например, большое значение изучению усталостных свойств текстильных материалов придавал М.С.Бородовский [8, 9, 66, 67]. Им было установлено, что выносливость хлопчатобумажной и шерстяной пряжи коррелирует с практическими данными переработки ее в ткачестве. Автор отмечает, что несмотря на то, что “величина напряжения основы значительно меньше временного сопротивления разрыву самого слабого места пряжи, последняя все-таки обрывается”. Причиной этого, с точки зрения автора, является проявление усталости и износа текстильных нитей в процессе переработки.

Большой объем работ по исследованию возможности использования показателей, полученных в результате проведения испытания на многократное растяжение, для прогнозирования поведения текстильных нитей в процессе переработки был произведен Н.Н.Миловидовым [68–71]. Обобщая результаты исследований (на примере хлопчатобумажной пряжи) автором было установлено, что выносливость является наиболее объективной характеристикой, позволяющей прогнозировать поведение основных нитей в процессе ткачества. Автором впервые произведен количественный анализ взаимосвязи обрывности с прочностными и усталостными характеристиками в виде коэффициентов корреляции. Коэффициент корреляции

между числом обрывов основы на ткацких станках и выносливостью на пульсаторе составил $-0,89$. В то же время, с показателями разрывной нагрузки и удлинения корреляции обнаружить не удалось.

В исследованиях, опубликованных в работе [72], тоже подчеркивается отсутствие взаимосвязи между выносливостью пряжи при многократном растяжении и прочностью её на разрыв при однократном растяжении.

Исследования кинетики разрушения пряжи и волокон при утомлении [73] показали, что при многократном растяжении волокна в пряже разрушаются с образованием трещин, а характер повреждения поверхности волокон соответствует характеру их повреждения в процессе носки. При этом изменения в ориентации структурных элементов волокон обнаружено не было.

В исследованиях, проведенными Т.В. Кулейкиной под руководством Г.Н.Кукина [74], установлено, что в процессе утомления основной пряжи, прошедшей ткачество, две трети приходится на долю усталости от многократного растяжения и лишь одна треть на долю истирания.

Результаты экспериментальных исследований, проведенных Б.Я. Хаимовым [75], целью которых являлась оценка взаимосвязи обрывности ацетатных комплексных нитей и их механических свойств, также указывают на тот факт, что увеличение разрывной нагрузки в исследуемых образцах нитей не приводит к уменьшению обрывности в процессе переработки. Однако, отмечается хорошее согласование роста обрывности основы в ткачестве с уменьшением показателей выносливости этих нитей.

Изучению показателей усталостных свойств полушерстяной пряжи и оценке их взаимосвязи с обрывностью в ткачестве посвящены исследования, проведенные сотрудниками Латвийского НИИЛП [76]. В результате была установлена высокая степень корреляции между выносливостью и обрывностью в ткачестве (значение коэффициента корреляции составляло $-0,85$).

Таким образом, можно отметить, что наиболее чувствительной характеристикой для оценки поведения текстильных нитей в процессе переработки и эксплуатации является их выносливость при многократном растяжении. Данный показатель наиболее объективно отражает условия, в которых нити находятся при переработке и дальнейшем их использовании. Это доказывается целым рядом вышеприведенных работ по количественной оценке взаимосвязи обрывности в ткачестве различных видов нитей с характеристиками, полученными в условиях многократного и однократного их растяжения в виде коэффициентов корреляции.

4.1.2. Влияние условий проведения испытаний на показатели усталостных свойств текстильных нитей при их многократном растяжении.

Известно [8,9, 77], что при изучении усталостных свойств нитей на результаты испытаний существенное влияние оказывают условия их проведения, к которым обычно относят: заданную циклическую деформацию, статическую нагрузку, зажимную длину, частоту растяжения, температуру и влажность воздуха.

Влияние заданной циклической деформации.

Величина деформации, задаваемая в каждом цикле растяжения (или амплитуда растяжения), является фактором, наиболее резко влияющим на показатели усталостных свойств.

Во многих работах, посвященных исследованию процесса усталости текстильных нитей, отмечается, что увеличение заданной циклической деформации приводит к закономерному снижению выносливости нитей. Для хлопчатобумажной и шерстяной пряжи данная зависимость носит явно выраженный гиперболический характер [77].

Работы, проведенные М.С.Бородовским, М.П. Носовым и другими исследователями [8, 66, 67, 77–79] показали, что для нитей хорошей структуры можно установить предел выносливости. Их кривые выносливости асимптотически приближаются к прямым, параллельным оси ординат. Для нитей плохой структуры, например, шерстяной аппаратной пряжи, предел выносливости установить не удастся, так как соответствующие им кривые выносливости подходят к оси ординат не асимптотически, а наклонно.

Экспериментальные исследования, проведенные Н.П.Воеводиной [63] на примере хлопковых волокон, показали, что с ростом заданной циклической деформации значение остаточной циклической деформации также увеличивается.

Результаты исследований влияния заданной циклической деформации на выносливость полиамидных и полиэфирных комплексных нитей представлены в монографии М.П. Носова [77, 79]. Автором отмечается, что кривые нарастания остаточной циклической деформации в зависимости от количества циклов нагружения представляют собой семейство кривых, выражаемых математической моделью гиперболического типа следующего вида:

$$\varepsilon_{o.ц} = \frac{b \cdot n}{n - a}, \quad (4.1)$$

где $\varepsilon_{o.ц}$ – остаточная циклическая деформация, %;

n – число циклов нагружения, цикл;

a, b – некоторые постоянные экспериментально определяемые коэффициенты.

Сравнительный анализ кривых остаточной деформации для разных нитей позволил автору установить, что с увеличением разрывного удлинения нить обладает способностью работать при все более высоких значениях циклической деформации. Повышение разрывного удлинения нитей обуславливает увеличение остаточной циклической деформаций разрыва при одних и тех же значениях заданных деформаций.

Влияние рассматриваемого параметра на выносливость при многократном растяжении хлопчатобумажной пряжи изучалось Н.Н.Миловиловым. Автором установлено, что увеличение заданной циклической деформации с 0,75% до 2,0% привело к уменьшению выносливости с 4425 до 90 циклов [71].

В диссертационной работе С.Ф. Литовченко для прогнозирования значения показателя выносливости в зависимости от заданной циклической деформации предлагается использовать математическую модель следующего вида [81]:

$$n_p = \frac{a}{\varepsilon_{з.ц} - b} - c, \quad (4.2)$$

где $\varepsilon_{з.ц}$ – заданная циклическая деформация, %;

a, b, c – некоторые экспериментально определяемые параметры модели.

Вопрос об изменении остаточной циклической деформации при различных заданных деформациях довольно подробно исследован в работах Г.Алишаускяйте. Автором было показано, что при увеличении заданной циклической деформации увеличивается начальная скорость возрастания остаточной деформации. Данный факт, по мнению автора, определяет разницу абсолютной величины остаточной циклической деформации при различных деформациях в цикле растяжения [65, 80].

Исследования, опубликованные в работах [76, 82], показали, что для полушерстяной аппаратной пряжи характерна нелинейная зависимость выносливости от величины заданной циклической деформации. Полученные результаты автор объясняет тем, что “при малых деформациях, при

ближающихся к пределу выносливости, процесс утомления протекает по трем фазам, когда “полезные” свойства пряжи проявляют свою устойчивость. Наоборот, при больших деформациях растяжения (от 1,6% до 2,0%) процесс разрушения начинается сразу с третьей фазы, и полезные свойства пряжи расходуются очень быстро”.

Влияние статической нагрузки.

Как известно [81], статическая нагрузка на нить при испытаниях на пульсаторах обеспечивает выборку деформации, нарастающей в процессе многократного растяжения, и создает натяжение нити.

Исследованию влияния статической нагрузки на долговечность посвящены работы ряда зарубежных исследователей. Так, В.Бюссе, Р.Уоллером, С.Тасикавой показано [81], что для элементарных нитей логарифм долговечности есть линейная функция статической нагрузки:

$$\ln t_p = a - m \cdot P, \quad (4.3)$$

где t_p – долговечность образца, час;

P – значение статической нагрузки, Н;

a, m – постоянные коэффициенты.

В исследованиях, проведенных Н.Н.Миловидовым [71], показано влияние статической нагрузки на выносливость хлопчатобумажной пряжи. Автор отмечает, что с увеличением статической нагрузки у пряжи с более высокой круткой обнаружено более интенсивное падение выносливости. Это, по мнению автора, можно объяснить тем, что при увеличении натяжения происходит в первую очередь разрушение наружных участков волокон, “уже находившихся на предельном натяжении критической крутки”. Н.Н.Миловидов подчеркивает, что повышенное статическое натяжение способствует интенсивному смещению (растаскиванию) волокон в местах с разрыхленной структурой.

Влияние постоянной статической нагрузки на выносливость синтетических кордных нитей было изучено М.П.Носовым [77,78]. В работе установлено, что зависимость между пределом выносливости и постоянной статической нагрузкой для синтетических кордных нитей выражается следующей экспоненциальной зависимостью:

$$\varepsilon_b = C \cdot e^{-kP}, \quad (4.4)$$

где ε_p – предел выносливости, %;

P – величина статической нагрузки, Н;

C, k – коэффициенты.

М.П.Носовым отмечается, что сильно ориентированные нити при малых статических нагрузках менее выносливы, нежели слабо ориентированные, с повышением статической нагрузки происходит инверсия выносливости.

Хаимов Б.Я. для прогнозирования изменения выносливости ацетатных нитей при изменении статической нагрузки предлагает использовать математическую модель следующего вида [75]:

$$n_p = b \cdot P^{-a}, \quad (4.5)$$

где n_p – выносливость, цикл;

a, b – постоянные коэффициенты.

Литовченко С.Ф. установлено [81], что зависимость выносливости от статической нагрузки имеет такой же характер, как от заданной циклической деформации, и выражается следующей математической моделью:

$$n_p = \frac{a}{P - b} - c, \quad (4.6)$$

где a, b, c – некоторые экспериментально определяемые параметры модели.

В работе Г.Алишаускайте [80] изучалось влияние относительной статической нагрузки на нарастание остаточной циклической деформации для вязкоупругих, ацетатных, капроновых и лавсановых комплексных нитей. Для большинства из них получена прямолинейная зависимость, показывающая большой рост остаточной деформации при увеличении нагрузки на нить (кроме ацетатной нити, для которой автор отмечает наличие значительной зоны текучести, искажающей прямолинейную зависимость).

Исследования, проведенные под руководством С.И.Юркевичюса [83, 84], посвящены изучению зависимости между выносливостью комплексных нитей и статической нагрузкой при разных заданных циклических деформациях. Установлено, что характер зависимости между статической нагрузкой и логарифмом выносливости выражается в виде прямой линии.

В работе [83], предлагается эмпирическая зависимость взаимосвязи выносливости нитей n_p и средней статической нагрузки P следующего вида:

$$\lg(n_p + 1) = P_0 - b \cdot P, \quad (4.7)$$

где P_0 – нагрузка, соответствующая нулевой выносливости, т.е. p_p , Н;
 b – коэффициент пропорциональности.

Целью, проведенных исследований, опубликованных в работе [84], являлось определение зависимости между выносливостью комплексных нитей при разных заданных циклических деформациях и статической нагрузкой или силовым режимом испытания. В результате авторами была предложена математическая модель взаимосвязи динамической выносливости n_p , статической нагрузки P и заданной циклической деформации $\epsilon_{з.ц.}$ следующего вида:

$$\lg n_p = \frac{(P_0 - P)}{a \cdot \epsilon_{з.ц.}} + G_c, \quad (4.8)$$

где $\epsilon_{з.ц.}$ – заданная циклическая деформация;

G_c – статическая долговечность образца;

a – угловой коэффициент прямой градиента выносливости.

Влияние зажимной длины.

Поскольку текстильные материалы при переработке деформируются на отрезках различной длины, то научно обоснованный выбор зажимной длины при испытании на усталость, а также прогнозирование значений показателей усталостных свойств при изменении исследуемой длины образца нити является весьма актуальной задачей.

Довольно подробно этот вопрос рассмотрен в работах М.П.Носова на примере капроновых кордных нитей. Автор исследовал [77,78] влияние зажимной длины на выносливость и остаточную циклическую деформацию двумя способами:

- при постоянном отношении величины амплитуды растяжения к зажимной длине,
- при постоянном значении амплитуды на различных зажимных длинах.

При испытании по первому методу автором установлено, что с уменьшением зажимной длины выносливость увеличивается, причем характер зависимости различен.

Для прогнозирования изменения выносливости в зависимости от длины испытываемой нити автором предложено использовать следующие математические модели:

- при заданных циклических деформациях близких к пределу выносливо-

сти

$$n_p = a \cdot L^{-b}, \quad (4.9)$$

– при заданных циклических деформациях значительно больших предела выносливости

$$n_p = a \cdot e^{-bL}, \quad (4.10)$$

где n_p – выносливость, цикл;

e – основание натурального логарифма;

a, b – экспериментально определяемые параметры модели.

Увеличение выносливости при уменьшении зажимной длины, с точки зрения автора, объясняется различным темпом нарастания остаточной циклической деформации в образцах различной длины, а также уменьшением числа слабых, утоненных участков нитей и мест с нарушенной структурой при меньших зажимных длинах.

Интенсивность нарастания остаточной циклической деформации с увеличением зажимной длины, по данным М.П.Носова, повышается.

Чем меньше зажимная длина, тем длиннее прямолинейный участок кривой $\epsilon_{0,ц} = f(n)$, где нить работает как упругое тело и выдерживает большое число циклов, не разрушаясь. Основную причину увеличения выносливости нитей на малых зажимных длинах автор видит в уменьшении вероятности попадания в зажимную длину участков нити с какими-либо дефектами структуры.

При испытании по второму методу, то есть в постоянной абсолютной амплитудой деформации на разных зажимных длинах, М.П.Носов обнаружил увеличение выносливости с ростом зажимной длины. Оно слабее на малых зажимных длинах и более резко выражено на больших длинах.

В работах [75, 81] установлено, что характер зависимости выносливости от зажимной длины для различных видов нитей идентичен и для прогнозирования выносливости от зажимной длины предлагается использовать математическую модель (4.9).

Влияние частоты растяжения.

При испытании на многократное растяжение используются приборы, конструктивные особенности которых позволяют изменять частоту нагружения. При усталостных испытаниях текстильных нитей, переработка которых осуществляется в условиях ткачества, обычно применяются относительно небольшие частоты 1–10 герц. При исследовании корда используются частоты на порядок выше. Вследствие разнообразия значений ис-

пользуемых частот, применяемых при проведении испытаний на многократное растяжение, исследование влияния данного фактора на показателей усталостных характеристик является актуальным.

Р.Уоллер и В.Розевёр одними из первых исследовали взаимосвязь между долговечностью и частотой нагружения [81]. Для хлопчатобумажного и вискозного корда ими была предложена математическая модель следующего вида:

$$t_p = a \cdot \omega^{-b}, \quad (4.11)$$

где t_p — долговечность, сек;

ω — частота, Гц;

a, b — экспериментально определяемые параметры модели.

Учитывая взаимосвязь между долговечностью и выносливостью $n_p = t_p \cdot \omega$, математическая модель (4.11) может быть представлена в следующем виде

$$n_p = a \cdot \omega^{1-b}, \quad (4.12)$$

Литовченко С.Ф. для прогнозирования изменения выносливости текстильных нитей при изменении частоты нагружения предлагает использовать математическую модель вида [81]:

$$n_p = m \cdot \omega + k, \quad (4.13)$$

где m, k — экспериментально определяемые параметры модели.

В результате проведенных исследований усталостных свойств хлопчатобумажной пряжи Г.Н. Кукиным [8] установлен нелинейный характер изменения выносливости при увеличении частоты нагружения. Полученные результаты автор объясняет тем, что с ростом частоты эластический и пластический компоненты деформации успевают развиться в меньшей мере, так как время нахождения образца в растянутом состоянии в каждом цикле сокращается, и нить в основном деформируется за счет быстро обратимых компонентов деформации, нарушения структуры идут медленнее и выносливость растёт.

Е.В.Тихомировой [85] при исследовании свойств льняной пряжи установлено, что при увеличении частоты растяжения с 5,8 до 10 Гц выносливость пряжи растёт, дальнейшее увеличение частоты (до 30 Гц) приводит к падению выносливости.

Г.Алишаускайте [65] были проведены исследования по выявлению зависимости выносливости и остаточной циклической деформации от частоты растяжения для лавсановых, вязкозных и ацетатных нитей. Испытания проводились при условии постоянства амплитуды абсолютной деформации и среднего напряжения нити в каждом цикле растяжения. Значения частоты варьировались в диапазоне 3,3 – 50,0 Гц. В работе установлено, что кривые зависимости выносливости от частоты циклов не дают возможности установить отчетливо выраженную закономерность между этими величинами. Характерно, что максимальное значение выносливости для всех нитей получено не при экстремальных циклических частотах, а в середине исследуемого интервала. Поэтому предполагается, что именно там находится область оптимальных циклических частот, при которых образец выдерживает наибольшее число многократных растягивающих воздействий.

В результате исследования выносливости хлопчатобумажной пряжи при повышенной частоте растяжения проф. П.Т. Букаевым установлено [86], что зависимость выносливости от частоты растяжения имеет немонотонный характер, то есть существуют точки перегиба, в которых наблюдается снижение выносливости при увеличении частоты нагружения. Это явление автор объясняет тем, что при повышении частоты циклов нагружения до определенного предела действует один механизм, а именно: структура пряжи делается более компактной, и всё больше волокон участвуют в деформировании, поэтому элементарная нагрузка на отдельные волокна сравнительно небольшая. При дальнейшем повышении частоты циклов нагружения начинает действовать другой механизм. Время воздействия на пряжу сокращается, поэтому деформация не успевает распространяться по всей пряже, некоторая её часть полностью не деформируется, зато отдельные участки, особенно напряженные, деформируются больше, и при многократных воздействиях начинаются усталостные явления и происходит разрушение.

Подводя итог всему вышесказанному можно отметить, что на показатели усталостных свойств текстильных нитей большое влияние оказывают условия проведения испытаний. Чаще всего исследования проводились либо на качественном уровне, либо устанавливались эмпирические зависимости выносливости от одного из условий проведения испытания (заданной циклической деформации, статической нагрузки, зажимной длины или частоты нагружения). Эти зависимости имеют, как правило, неоднозначный характер для нитей различной структуры и волокнистого состава, а обилие экспериментально определяемых постоянных коэффициентов

затрудняет их использование. Следует отметить, что введенные параметры математических моделей довольно часто не имеют строго определенного физического смысла, а являются абстрактными коэффициентами влияния. До сих пор отсутствует обобщенная математическая модель взаимосвязи показателей усталостных свойств текстильных нитей и условий проведения испытания на многократное растяжение. Такая математическая модель позволила бы прогнозировать значения показателей усталостных свойств нитей не только в условиях проведения эксперимента, но и в процессе дальнейшей переработки в условиях ткачества.

4.1.3. Методы оценки и прогнозирования показателей усталостных свойств текстильных нитей.

Особенностью проведения испытаний на многократное растяжение текстильных нитей является большой разброс показателей усталостных свойств. Это обстоятельство является следствием природы усталостного разрушения текстильного материала и результатом неоднородности его структуры [81]. Даже при самом строгом соблюдении режимов проведения усталостных испытаний, полученные значения показателей усталостных свойств при одних и тех же выборках существенно отличаются друг от друга. Различные авторы в своих исследованиях предлагали несколько путей решения данной проблемы. Большинство исследователей предлагалось для выражения итоговой оценки выносливости применять среднее арифметическое значение из ряда выносливостей, полученных при определенном режиме испытания и вычислений среднеквадратических отклонений, коэффициентов вариаций. Однако, полученные при этом отдельные статистические характеристики высоки (например, значение среднеквадратического отклонения соизмеримо со средним значением выносливости). Увеличение объема выборки (увеличение количества испытуемых образцов нитей), увеличивая временные затраты на проведение испытаний, не приводит к гарантируемому снижению ошибки оценки показателей усталостных свойств.

Вследствие этого возникает задача изучения статистического характера распределения значений выносливости по отдельным пробам партий образцов. В работах [2, 74, 87–89] показано наличие у кривых распределения выносливостей резкой правой асимметрии и отмечается, что показатели усталостных свойств, за исключением остаточной циклической деформации, по характеру распределения отличаются от нормального (Гаусса)

распределения. Однако следует отметить двойственный характер суждений по выбору наиболее предпочтительного закона распределения усталостных характеристик [74, 87–91].

Так, в последние годы многие исследователи использовали третье асимметрическое распределение – так называемое распределение Вейбулла. Рассмотрев основные положения теории третьего асимптотического распределения, А.Барелла пришел к выводу [81], что это распределение можно применять при всех явлениях усталости материалов. В работе [90] установлено, что при испытании на многократное растяжение смешанной пряжи в условиях близких к ткачеству, результаты наблюдений хорошо подчиняются третьему асимптотическому распределению Вейбулла.

В работе [91] автор, отдавая предпочтение функции распределения Вейбулла, отмечает, что практически ни одна из функций распределения не является универсальной, и выбор распределения определяется характером проведенных измерений. Несмотря на широкое применение распределения Вейбулла к анализу результатов усталостных испытаний, многие авторы отказываются от этого метода.

Так, в работах Л.Г.Кусаковой [87, 88] для оценки выносливости пряжи применяется логарифмически – нормальное распределение. Автором изучена возможность применения различных законов распределения случайных величин для оценки выносливости шерстяной пряжи. В результате исследований установлено, что для шерстяной пряжи нет строгого соответствия распределения экспериментальных данных по выносливости какому-либо одному из теоретических законов. Однако, по ее наблюдению, наибольшее число опытов соответствует функции распределения логарифмически – нормального закона.

Однако, Р.Писсиотто [90], указывая на универсальность применения распределения Вейбулла, считает, что логарифмически–нормальное распределение справедливо только в центральной, узкой области исследования. В работе [89] Н.Е.Шутовой показано, что результаты усталостных испытаний при истирания лучше согласуются, например, с гамма распределением, чем с логарифмически – нормальным.

Таким образом, можно отметить значительную неоднородность результатов оценки усталостных свойств текстильных материалов, а также отсутствие строгого соответствия распределения экспериментальных данных по выносливости какому-либо одному из теоретических законов.

4.2. Оценка выносливости текстильных нитей методами математического моделирования.

Текстильные материалы в процессах переработки и эксплуатации постоянно подвергаются действию небольших по величине растягивающих усилий. При длительном воздействии таких усилий постепенно изменяется структура материала, его свойства, то есть материал "устает" и, в конечном счете, разрушается. Вследствие этого, изучение усталостных характеристик, полученных в условиях многократного растяжения текстильных материалов, представляет интерес для большого числа исследователей. Однако проведение усталостных испытаний сопровождается значительными временными затратами.

Известно [8, 9], что одним из показателей, значение которого изменяется в процессе проведения усталостных испытаний текстильных нитей является относительная остаточная циклическая деформация $\varepsilon_{o.u.}$ (в дальнейшем остаточная деформация) – величина деформации, накопившейся за некоторое определенное число циклов нагружения и не исчезающая в процессе непрерывного приложения этих циклов[4]:

$$\varepsilon_{o.u.} = \frac{L_n - L_0}{L_0} \cdot 100\%, \quad (4.14)$$

где L_n – длина образца нити, измеренная после n циклов нагружения, м.

L_0 – зажимная (испытуемая) длина образца нити, м

Профессором Кукиным Г.Н. и профессором Соловьевым А.Н. отмечается, что характер изменения остаточной деформации при циклическом нагружении позволяет произвести анализ структуры нити (рис.4.1). Сущность параметрического подхода при оценке усталостных свойств текстильных нитей заключается в том, что вместо данных о разрушении текстильной нити при многоцикловом испытании проводятся кратковременные эксперименты с наблюдением за изменением контролируемого параметра (показателя). И по результатам кратковременных экспериментов осуществляется прогноз минимального числа циклов которое может выдержать нить не разрушаясь с заданной долей вероятности.

На основании анализа результатов предварительных исследований анализа типовых кривых представленных на рис 4.1 для математического описания зависимости относительного остаточного удлинения от количества циклов нагружения предлагается математическая модель следующего

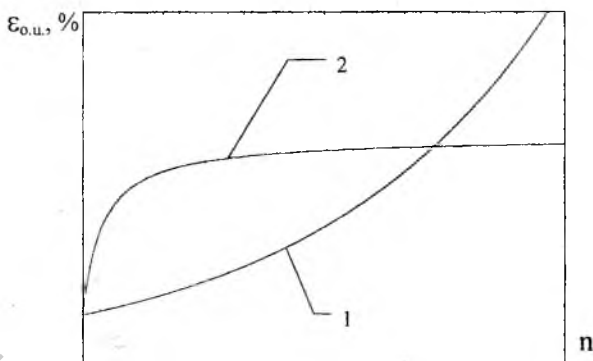


Рис.4.1. Типовые кривые зависимости остаточной деформации $\epsilon_{o.ц}$ от числа циклов нагружения n [9] 1-нити плохой структуры 2-нити хорошей структуры

вида:

$$\epsilon_{o.ц}(n) = \frac{n}{a_0 + a_1 \cdot n} + a_2, \quad (4.15)$$

где $\epsilon_{o.ц}$ – относительное остаточное удлинение нити, возникающее после n циклов нагружения, %

n – число циклов нагружения нити, цикл

a_0, a_1, a_2 – параметры модели.

Анализ соотношения (4.15) указывает на то, что параметр a_2 имеет размерность идентичную размерности относительного остаточного удлинения (%) и характеризует относительное удлинение нити ϵ_0 , вызываемое действием статической нагрузки P :

$$a_2 = \epsilon_{o.ц}(n \rightarrow 0) = \epsilon_0 \quad (4.16)$$

Для определения физического смысла параметра a_1 преобразуем модель (4.15):

$$\epsilon_{o.ц}(n) = \frac{1}{\frac{a_0}{n} + a_1} + a_2. \quad (4.17)$$

Очевидно, что при значительном количестве циклов нагружения нити значение остаточной циклической деформации достигает своего предельного значения (разрывного удлинения ϵ_p) (рис.4.2):

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{o.u.} (n \rightarrow \infty) = \frac{1}{a_1} + a_2 = \frac{1}{a_1} + \varepsilon_0$$

$$\frac{1}{a_1} = \varepsilon_p - \varepsilon_0. \quad (4.18)$$

Таким образом, параметр a_1 модели (4.15) имеет размерность $(\%)^{-1}$ и характеризует предельно возможное изменение остаточного удлинения $\varepsilon_{o.u.}$ нити при проведении усталостных испытаний на многократное растяжение:

$$a_1 = \frac{1}{\varepsilon_p - \varepsilon_0} \quad (4.19)$$

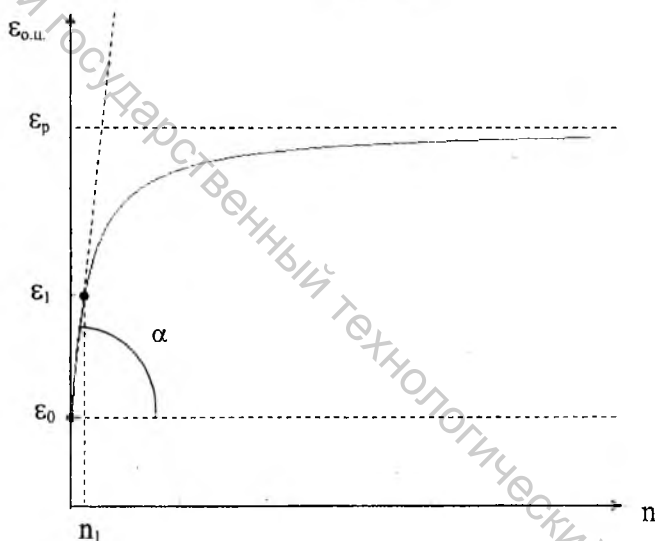


Рис.4.2. Схематическое представление зависимости остаточной циклической деформации $\varepsilon_{o.u.}$ от количества циклов нагружения n при испытании на многократное растяжение.

Для определения физического смысла параметра a_0 продифференцируем соотношение (4.15) по n и устремим n к нулю:

$$\frac{d\varepsilon_{o.u.}}{dn} = \frac{1}{(a_0 + a_1 \cdot n)} - \frac{n \cdot a_0}{(a_0 + a_1 \cdot n)^2}.$$

$$\frac{d\varepsilon_{o.u.}}{dn} (n \rightarrow 0) = \frac{1}{a_0} \quad (4.20)$$

С другой стороны, из геометрических соображений (рис.4.2), следует

$$\frac{d\varepsilon_{0,н}}{dn}(n \rightarrow 0) = \operatorname{tg} \alpha, \text{ следовательно,}$$
$$\frac{1}{a_0} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (4.21)$$

где α – угол наклона касательной, проведенной из точки $[\varepsilon_0, 0]$ к кривой $\varepsilon_{0,н}(n)$ к оси абсцисс.

Следовательно, параметр a_0 модели (4.15) является безразмерной величиной и является темповым показателем, определяющий темп нарастания относительного удлинения нити на начальном этапе циклического нагружения в процессе усталостного испытания.

Оценку параметров модели (4.15) рекомендуется производить либо посредством введения масштабной линеаризирующей функции $u(n)$, такой, чтобы в координатах $(\varepsilon_{0,н}, u)$ зависимость $\varepsilon_{0,н}(u)$ имела линейный вид, либо используя современные средства вычислительной техники, например, математический статистический пакет «Statistica for Windows».

Таким образом, на основании проведенных исследований разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать значение остаточной деформации при циклическом нагружении. Отличительной особенностью данной модели является тот факт, что ее параметры имеют строго определенный физический смысл, а не являются абстрактными коэффициентами влияния.

4.3. Экспериментальные исследования усталостных свойств текстильных нитей различного сырьевого состава.

Целью проводимых экспериментальных исследований являлась разработка методики оценки усталостных свойств текстильных нитей по результатам кратковременных испытаний.

При изучении усталостных свойств текстильных нитей были поставлены следующие задачи:

- проведение комплекса исследований усталостных свойств текстильных нитей различного сырьевого состава и способа формирования с целью анализа возможности их оценки по результатам кратковременных испытаний;
- проведение анализа влияния количества циклов нагружения на среднее значение остаточного удлинения текстильной нити;

- разработка обобщенной математической модели взаимосвязи среднего значения остаточного удлинения и числа циклов нагружения при проведении усталостных испытаний и экспериментальная проверка ее адекватности результатам эксперимента;
- исследование влияния условий проведения испытаний на параметры математической модели.

Экспериментальные исследования усталостных свойств текстильных нитей проводились на пульсаторе ПН-5 в условиях аккредитованной лаборатории при ВГТУ.

При проведении экспериментальных исследований усталостных свойств нитей в качестве объекта исследований были использованы следующие виды пряжи:

- хлопчатобумажная крученая пряжа линейной плотности 200текс.;
- хлопчатобумажная крученая пряжа линейной плотности 25текс×2;
- нитроновая пряжа линейной плотности 100 текс;
- полиэфирная пряжа линейной плотности 100 текс;
- шерстяная пряжа линейной плотности 220 текс;
- шерстяная пряжа линейной плотности 240 текс;
- смешанная пряжа (лён– 35%, полиэфир–65%) линейной плотности 100 текс;
- смешанная пряжа (лён– 50%, полиэфир–50%) линейной плотности 52 текс;

Отбор проб осуществлялся согласно ГОСТ 6611.0-73. Груз предварительного натяжения устанавливался согласно ГОСТ 6611.0-73 в зависимости от линейной плотности исследуемых нитей. Значение статической нагрузки было принято равным 25% от разрывной нагрузки, определяемой по ГОСТ 6611.2-73. Выделение промахов производилось на основе критериальной оценки [31].

Результаты экспериментальных исследований прочностных и усталостных характеристик текстильных нитей различного сырьевого состава сведены в таблицах 4.1.–4.4. и графически представлены на рисунках 4.3–4.10.

Анализ результатов экспериментальных исследований позволяет отметить закономерный характер изменения остаточного удлинения текстильных нитей в зависимости от количества циклов ее нагружения и позволяет сформулировать следующие предварительные выводы:

- увеличение значения заданной циклической деформации приводит к увеличению темпа нарастания остаточного удлинения, что объясняет снижение выносливости хлопчатобумажной пряжи;

Наименование исследуемых образцов пряжи	Среднее значение разрывной нагрузки $\bar{P}_p, \text{сН}$	Среднее значение относительного разрывного удлинения $\bar{\epsilon}_p, \%$	Коэффициент вариации по		Среднее значение выносливости нити при заданном значении циклической деформации (п, цикл), при		
			разрывной нагрузке $C_{P_p}, \%$	разрывному удлинению $C_{\epsilon_p}, \%$	$\epsilon_{3, \text{ц}} = 1,0 \%$	$\epsilon_{3, \text{ц}} = 2,0 \%$	$\epsilon_{3, \text{ц}} = 3,0 \%$
Нитроновая пряжа 100 текс	1100,49	15,7	5,4	10,2	141200	710	37
Полиэфирная пряжа 100 текс	1775,49	20,4	7,3	12,4	28720	1568	187

Таблица 4.2

Результаты экспериментальных исследований усталостных свойств хлопчатобумажной пряжи

Наименование исследуемых образцов пряжи	Среднее значение разрывной нагрузки $\bar{P}_p, \text{сН}$	Среднее значение относительного разрывного удлинения $\bar{\epsilon}_p, \%$	Коэффициент вариации по		Среднее значение выносливости нити при заданном значении циклической деформации (п, цикл), при		
			разрывной нагрузке $C_{P_p}, \%$	разрывному удлинению $C_{\epsilon_p}, \%$	$\epsilon_{3, \text{ц}} = 1,6 \%$	$\epsilon_{3, \text{ц}} = 2,0 \%$	$\epsilon_{3, \text{ц}} = 2,4 \%$
Хлопчатобумажная пряжа 200 текс	2745,8	7,5	5,9	10,2	38600	1820	186
Хлопчатобумажная пряжа 25 текс × 2	584,5	7,0	6,8	9,4	1936	365	46

Таблица 4.3

Результаты экспериментальных исследований усталостных свойств шерстяной пряжи

Наименование исследуемых образцов пряжи	Среднее значение разрывной нагрузки R_p, cH	Среднее значение относительного разрывного удлинения $\epsilon_p, \%$	Коэффициент вариации по		Среднее значение выносливости нити при заданном значении циклической деформации (n , цикл), при		
			разрывной нагрузке $C_{R_p}, \%$	разрывному удлинению $C_{\epsilon_p}, \%$	$\epsilon_{3,ц} = 1,6 \%$	$\epsilon_{3,ц} = 1,2 \%$	$\epsilon_{3,ц} = 0,8 \%$
Шерстяная пряжа 220 текс	2774,51	11,6	11,8	16,7	330	1180	2830
Шерстяная пряжа 240 текс	1078,43	6,3	10,5	15,4	210	1350	7200

Таблица 4.4

Результаты экспериментальных исследований усталостных свойств смешанной пряжи

Наименование исследуемых образцов пряжи	Среднее значение разрывной нагрузки R_p, cH	Среднее значение относительного разрывного удлинения $\epsilon_p, \%$	Коэффициент вариации по		Среднее значение выносливости нити при заданном значении циклической деформации (n , цикл), при		
			разрывной нагрузке $C_{R_p}, \%$	разрывному удлинению $C_{\epsilon_p}, \%$	$\epsilon_{3,ц} = 2,0 \%$	$\epsilon_{3,ц} = 3,0 \%$	$\epsilon_{3,ц} = 4,0 \%$
Смешанная пряжа (лён – 35%, полиэфир – 65%) пряжа 100 текс	1459,80	19,2	12,87	14,75	27	700	20050
					$\epsilon_{3,ц} = 1,0 \%$	$\epsilon_{3,ц} = 2,0 \%$	$\epsilon_{3,ц} = 3,0 \%$
Смешанная пряжа (лён – 50%, полиэфир – 50%) пряжа 52 текс	865,68	16,8	10,12	12,57	125	6420	42250

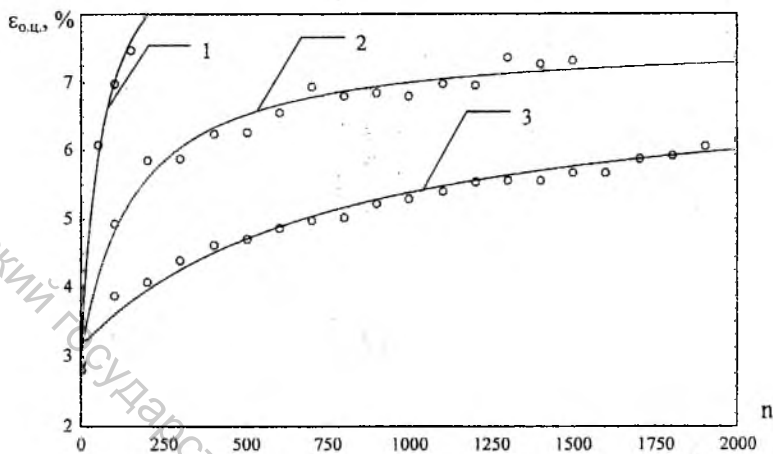


Рис. 4.3. Зависимость остаточного циклического удлинения $\epsilon_{o,ц}$ хлопчатобумажной пряжи 200 текс от количества циклов нагружения n при различных значениях заданной циклической деформации $\epsilon_{з,ц}$.

1— $\epsilon_{з,ц}=2,4\%$; 2— $\epsilon_{з,ц}=2,0\%$; 3— $\epsilon_{з,ц}=1,6\%$;

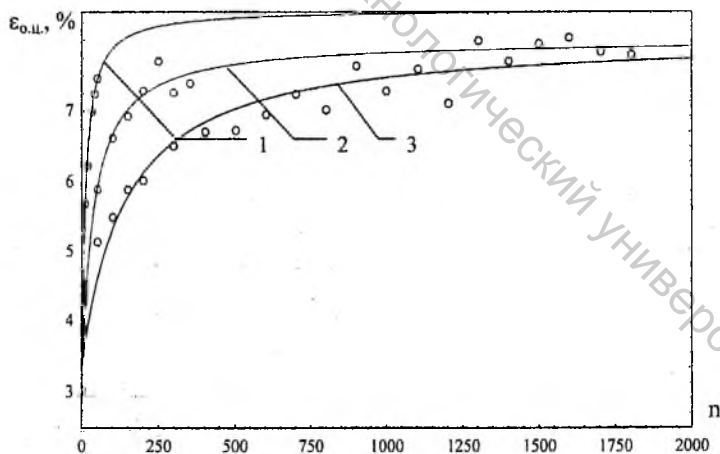


Рис. 4.4. Зависимость остаточного циклического удлинения $\epsilon_{o,ц}$ хлопчатобумажной пряжи 25 текс x 2 от количества циклов нагружения n при различных значениях заданной циклической деформации $\epsilon_{з,ц}$.

1— $\epsilon_{з,ц}=2,4\%$; 2— $\epsilon_{з,ц}=2,0\%$; 3— $\epsilon_{з,ц}=1,6\%$;

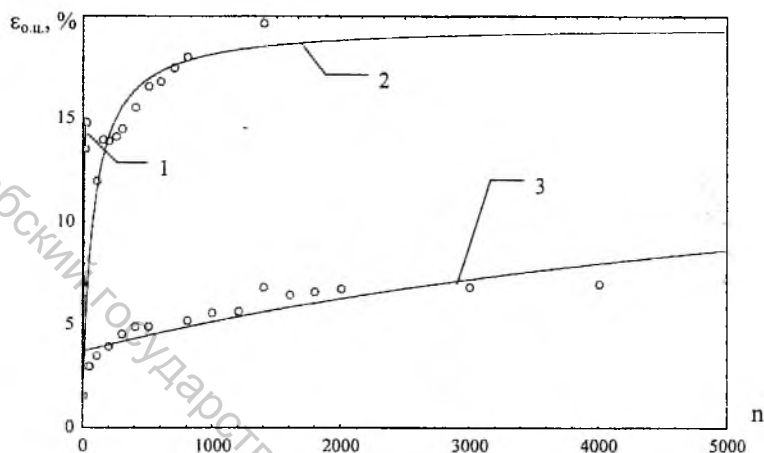


Рис.4.5. Зависимость остаточного циклического удлинения $\varepsilon_{0,ц}$ нитроновой пряжи 100 текс от количества циклов нагружения n при различных значениях заданной циклической деформации $\varepsilon_{з,ц}$.

1- $\varepsilon_{з,ц} = 3,0\%$; 2- $\varepsilon_{з,ц} = 2,0\%$; 3- $\varepsilon_{з,ц} = 1,0\%$;

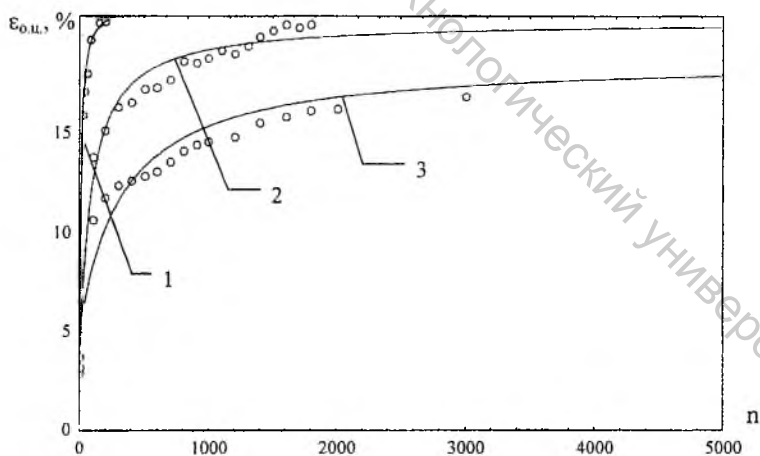


Рис.4.6. Зависимость остаточного циклического удлинения $\varepsilon_{0,ц}$ полиэфирной пряжи 100 текс от количества циклов нагружения n при различных значениях заданной циклической деформации $\varepsilon_{з,ц}$.

1- $\varepsilon_{з,ц} = 3,0\%$; 2- $\varepsilon_{з,ц} = 2,0\%$; 3- $\varepsilon_{з,ц} = 1,0\%$;

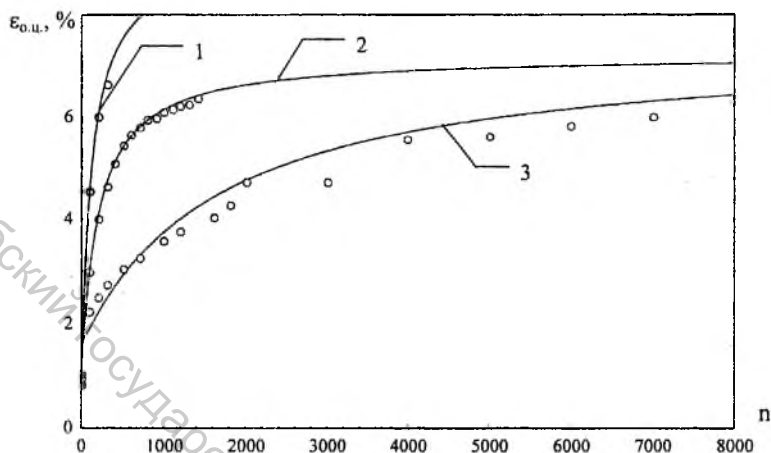


Рис. 4.7. Зависимость остаточного циклического удлинения $\epsilon_{0,ц}$ шерстяной пряжи 240 текс от количества циклов нагружения n при различных значениях заданной циклической деформации $\epsilon_{3,ц}$.

1- $\epsilon_{3,ц} = 1,6\%$; 2- $\epsilon_{3,ц} = 1,2\%$; 3- $\epsilon_{3,ц} = 0,8\%$;

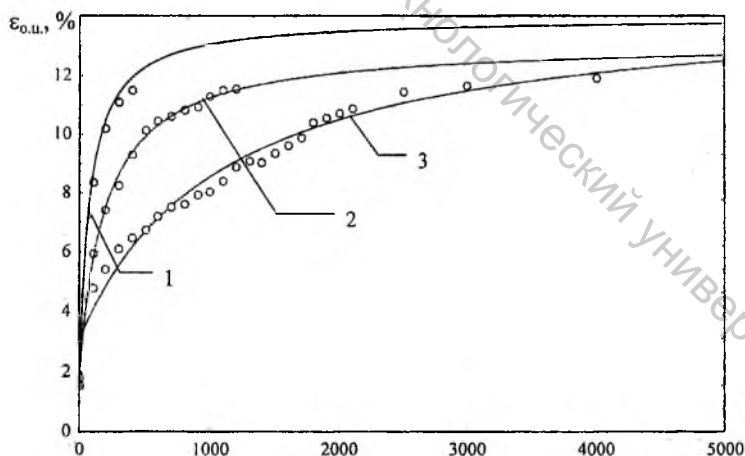


Рис. 4.8. Зависимость относительного остаточного удлинения $\epsilon_{0,ц}$ шерстяной пряжи 220 текс от количества циклов нагружения n при различных значениях заданной циклической деформации $\epsilon_{3,ц}$.

1- $\epsilon_{3,ц} = 1,6\%$; 2- $\epsilon_{3,ц} = 1,2\%$; 3- $\epsilon_{3,ц} = 0,8\%$;

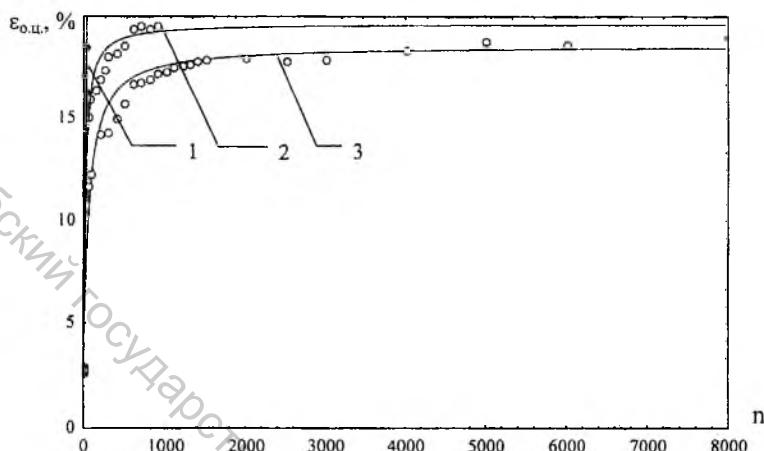


Рис. 4.9. Зависимость остаточного циклического удлинения $\epsilon_{0,ц}$ смешанной пряжи (лён-35%, полиэфир-65%) 100 текс от количества циклов нагружения n при различных значениях заданной циклической деформации $\epsilon_{3,ц}$.

1- $\epsilon_{3,ц} = 4.0\%$; 2- $\epsilon_{3,ц} = 3.0\%$; 3- $\epsilon_{3,ц} = 2.0\%$;

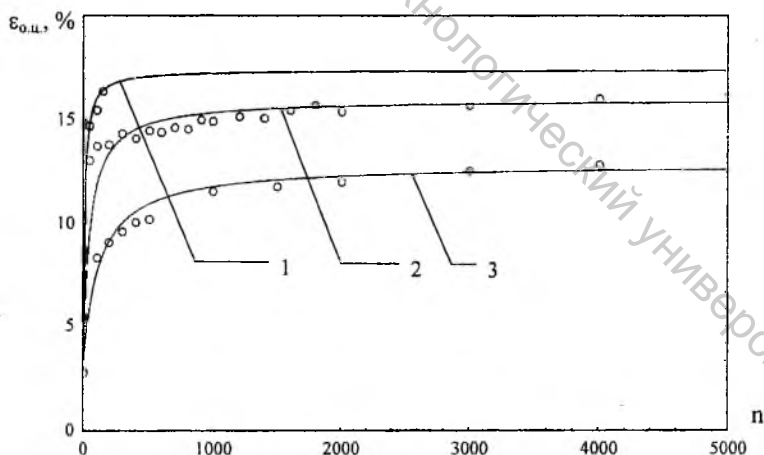


Рис. 4.10. Зависимость остаточного циклического удлинения $\epsilon_{0,ц}$ смешанной пряжи (лён-50%, полиэфир-50%) 52 текс от количества циклов нагружения n при различных значениях заданной циклической деформации $\epsilon_{3,ц}$.

1- $\epsilon_{3,ц} = 3.0\%$; 2- $\epsilon_{3,ц} = 2.0\%$; 3- $\epsilon_{3,ц} = 1.0\%$;

- значение удлинения текстильных нитей, вызванное действием статической нагрузки не зависит от частоты нагружения, значения заданной циклической деформации, а определяется ее деформационными свойствами и значением статической нагрузки;
- разрушение текстильной нити происходит при достижении остаточного удлинения некоторого критического значения (в предположении разрывного удлинения), а значительную вариацию выносливости можно объяснить вариацией не только остаточного удлинения, но и критического значения удлинения текстильной нити различного сырьевого состава.

4.4. Экспериментальные исследования усталостных свойств текстильных нитей методами математического моделирования

Целью проводимых экспериментальных исследований усталостных свойств текстильных нитей являлось исследование влияния условий проведения испытаний на параметры модели (4.15), а также оценка возможности прогнозирования усталостных свойств текстильных нитей по результатам кратковременных испытаний.

Работа основывалась на результатах экспериментальных исследований усталостных свойств текстильных нитей различного сырьевого состава, представленных в п.4.3.

Довольно часто отсутствует возможность использования средств вычислительной техники в производственных условиях и как следствие для практического использования вышепредложенных моделей возникает необходимость в определении параметров модели на основе кратковременных испытаний.

Для оценки параметра a_0 модели (4.15) рекомендуется произвести измерение относительного удлинения нити ϵ_1 после определенного числа циклов нагружения n_1 , но не более 50. На основании модели (4.21) можно записать

$$a_0 = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{1}{\operatorname{tg} \left[\frac{\epsilon_1}{n_1} \right]}. \quad (4.22)$$

На основании анализа результатов экспериментальных исследований, представленных в п.4.3. (рис.4.3–4.10) можно отметить, что разрушение текстильных нитей происходит при достижении остаточного удлине-

ния некоторого критического значения (в предположении разрывного удлинения), а значительную вариацию выносливости можно объяснить вариацией не только остаточного удлинения, но и критического значения удлинения нити (разрывного удлинения). Следовательно, на основании модели (4.19) можно записать:

$$a_1 = \frac{1}{\varepsilon_p - \varepsilon_0}, \quad (4.23)$$

и произвести оценку параметра модели a_1 модели (4.15)

Таким образом, использование математических моделей (4.16), (4.22) и (4.23) позволяет произвести оценку параметров модели (4.15) по результатам кратковременных испытаний.

На основании результатов экспериментальных исследований, представленных в таблицах 4.1–4.4, рис.4.3.–4.10 произведена численная оценка параметров модели (4.15) для текстильных нитей различного сырьевого состава. Обработка результатов экспериментальных исследований производилась с использованием математического статистического пакета «Statistica for Windows». Численные значения параметров математической модели (4.15) для различных текстильных нитей в таблицах 4.5–4.8 и графически представлены на рис.4.3–4.10. Проверка адекватности математических моделей производилась на основании критерия Фишера (для всех моделей наблюдаемое значение критерия меньше критического), что указывает на адекватность математической модели (4.15) результатам эксперимента с доверительной вероятностью 0,95, что также подтверждается значением достоверности модели R^2 .

На основании анализа результатов математического моделирования можно сделать следующие выводы:

- при проведении экспериментальных исследований установлено, что параметры a_1 , a_2 модели (4.15) остаются неизменными. Некоторый разброс данных показателей объясняется систематическими и случайными погрешностями при проведении экспериментальных исследований. Параметр a_2 зависит только от значения статической нагрузки при проведении испытания (увеличение статической нагрузки приводит к увеличению значения данного параметра);
- безразмерный темповой параметр a_0 модели (4.15) определяющий темп нарастания относительного циклического удлинения нити на начальном этапе циклического нагружения в процессе усталостного испытания определяется величиной заданной циклической деформации (увеличение заданной циклической деформации приводит к уменьшению значения данного параметра);

Таблица 4.5

Параметры математической модели (4.15) взаимосвязи остаточного циклического удлинения и количества циклов нагружения для хлопчатобумажной пряжи

Наименование исследуемых образцов пряжи	Значение заданной циклической деформации $\varepsilon_{ц.д.}, \%$	Параметры математической модели (4.15)			Величина достоверности R^2
		a_0 , цикл/°	a_1 , 1/°	a_2 , %	
Хлопчатобумажная пряжа 200 текс	1,6	192,61	0,25	3,13	0,982
	2,0	33,65	0,21	2,99	0,990
	2,4	7,34	0,17	2,92	0,999
Хлопчатобумажная пряжа 25текс × 2	1,6	28,06	0,21	3,33	0,952
	2,0	7,42	0,20	3,04	0,987
	2,4	2,13	0,19	3,05	0,994

Таблица 4.6

Параметры математической модели (4.15) взаимосвязи остаточного циклического удлинения и количества циклов нагружения для пряжи из химических волокон

Наименование исследуемых образцов пряжи	Значение заданной циклической деформации $\varepsilon_{ц.д.}, \%$	Параметры математической модели (5.2)			Величина достоверности R^2
		a_0 , цикл/°	a_1 , 1/°	a_2 , %	
Нитроновая пряжа 100 текс	1,0	0,16	0,067	1,57	0,999
	2,0	4,89	0,056	1,73	0,988
	3,0	613,47	0,079	3,7	0,958
Полиэфирная пряжа 100 текс	1,0	0,60	0,056	3,8	0,996
	2,0	2,78	0,061	3,79	0,975
	3,0	34,31	0,073	5,87	0,995

Таблица 4.7

Параметры математической модели (4.15) взаимосвязи остаточного циклического удлинения и количества циклов нагружения для шерстяной пряжи

Наименование исследуемых образцов пряжи	Значение заданной циклической деформации $\epsilon_{з.ц.}, \%$	Параметры математической модели (4.15)			Величина достоверности R^2
		a_0 , цикл/%	a_1 , 1/%	a_2 , %	
Шерстяная пряжа 220 текс	0,8	95,47	0,087	3,08	0,985
	1,2	17,73	0,089	1,88	0,998
	1,6	6,26	0,081	1,59	0,999
Шерстяная пряжа 240 текс	0,8	292,54	0,17	1,6	0,989
	1,2	32,32	0,16	0,96	0,999
	1,6	14,49	0,12	0,84	0,999

Таблица 4.8

Параметры математической модели (4.15) взаимосвязи остаточного циклического удлинения и количества циклов нагружения смешанной пряжи

Наименование исследуемых образцов пряжи	Значение заданной циклической деформации $\epsilon_{з.ц.}, \%$	Параметры математической модели (4.15)			Величина достоверности R^2
		a_0 , цикл/%	a_1 , 1/%	a_2 , %	
Смешанная пряжа (лён–35%, полиэфир–65%) 100 текс	2,0	4,47	0,067	3,2	0,982
	3,0	1,28	0,059	2,7	0,992
	4,0	0,25	0,051	2,9	1,000
Смешанная пряжа (лён–50%, полиэфир–50%) 52 текс	1,0	65,61	0,081	2,78	0,988
	2,0	3,65	0,076	2,8	0,999
	3,0	0,75	0,069	2,9	0,999
Смешанная пряжа (шерсть–50%, полиэфир–50%) 100 текс.	1,2	217,13	0,120	2,47	0,991
	1,6	140,52	0,075	2,36	0,985
	2,0	11,25	0,099	1,38	0,994
	2,4	8,49	0,017	1,17	0,998

4.5. Имитационное моделирование процессов усталостного разрушения текстильных нитей при испытании на многократное растяжение

При разработке имитационной модели усталостного разрушения текстильных нитей при испытании на многократное растяжение была выдвинута гипотеза о том, что разрушение нити происходит при достижении остаточной циклической деформации некоторого критического значения, и предположении относительного разрывного удлинения. При этом каждый i -тый образец испытуемой нити имеет различные параметры модели a_{0i} , a_{1i} , a_{2i} (4.15), которые имеют определенный и сформулированный выше физический смысл и характеризуют механические свойства нити.

В соответствии с моделью (4.15) для i -той испытуемой нити можно записать:

$$\varepsilon_{o.u.}(n_j) = \frac{n_j}{a_{0i} + a_{1i}n_j} + a_{2i}; \quad (4.24)$$

$$a_{0i} = \frac{1}{\operatorname{tg}\left(\frac{\varepsilon_{1i}}{n_1}\right)}; \quad a_{1i} = \frac{1}{\varepsilon_{pi} - \varepsilon_{0i}}; \quad a_{2i} = \varepsilon_{0i}; \quad (4.25)$$

где $\varepsilon_{o.u.}(n_j)$ – текущее значение остаточного циклического удлинения нити после n_j циклов нагружения, %;

ε_{pi} – относительное разрывное удлинение i -той испытуемой нити, %;

ε_{0i} – относительное удлинение, вызванное действием статической нагрузки i -той испытуемой нити, %;

ε_{1i} – относительное удлинение i -той испытуемой нити, измеренное после n_1 циклов нагружения, %.

Переменными случайными величинами для каждого i -той нити будут являться значения ε_{0i} , ε_{1i} и ε_{pi} .

На начальном этапе имитационного моделирования генератор случайных чисел, в соответствии с задаваемым, экспериментально определяемым законом распределения, генерирует k (по числу испытуемых нитей) случайных значений ε_{0i} , ε_{1i} и ε_{pi} . Затем определяются параметры математической модели (4.25) a_{0i} , a_{1i} , и a_{2i} .

Имитационное моделирование эксперимента состоит в том, что пульсатор на каждом j -том этапе последовательно сообщает нити переменное напряжение, что вызывает возникновение остаточной циклической

деформации $\varepsilon_{0,и}$. Тогда число циклов нагружения n_j будет соответствовать j -тому этапу моделирования. На каждом j -том шаге для каждой i -той нити вычисляется остаточная циклическая деформация $\varepsilon_{0,и,i}(n_j)$ (4.24).

При выполнении условия $\varepsilon_{0,и,i}(n_j) \geq \varepsilon_{рi}$ соответствующая i -я нить считается разорванной, и выносливость данной нити соответствует значению n_j ($n_{pi}=n_j$).

Результаты имитационного моделирования представляются в виде массива значений выносливостей, анализ которого позволяет определить не только сводные статистические характеристики, но и также представить результаты моделирования в виде гистограммы распределения выносливости.

Разработанная имитационная модель процесса усталостного разрушения текстильных нитей при испытании на многократное растяжение позволяет на основе кратковременного эксперимента по определению параметров ε_0 , ε_1 и ε_p произвести оценку их усталостных свойств с учётом вариации данных показателей. А также произвести исследование влияния законов распределения и неравномерности механических свойств, определяемых параметрами ε_0 , ε_1 и ε_p , на показатели усталостных свойств текстильных нитей.

Схема алгоритма имитационной модели представлена на рис.4.11.

Произведем пример функционирования имитационной модели для оценки выносливости хлопчатобумажной пряжи 50 текс. Отбор проб осуществлялся согласно ГОСТ 6611.0-73. Груз предварительного натяжения устанавливался согласно ГОСТ 6611.0-73 в зависимости от линейной плотности исследуемых нитей. Значение статической нагрузки принималось равной 25% от разрывной нагрузки, определяемой по ГОСТ 6611.2-73. Выделение промахов производилось на основе критериальной оценки [31].

В результате проведения предварительного эксперимента произведена численная оценка значений:

- относительного разрывного удлинения $\varepsilon_p=7,21\%$, $C_{\varepsilon_p}=6,38\%$;
- относительного удлинения нити, вызванного действием статической нагрузки $\varepsilon_0=2,48\%$, $C_{\varepsilon_0}=8,12\%$;
- относительного удлинения нити, после 50 циклов нагружения $\varepsilon_1=4,84\%$, $C_{\varepsilon_1}=6,43\%$;

Экспериментальные гистограммы распределений значений вышеопределённых параметров представлены на рис.4.12–4.14.

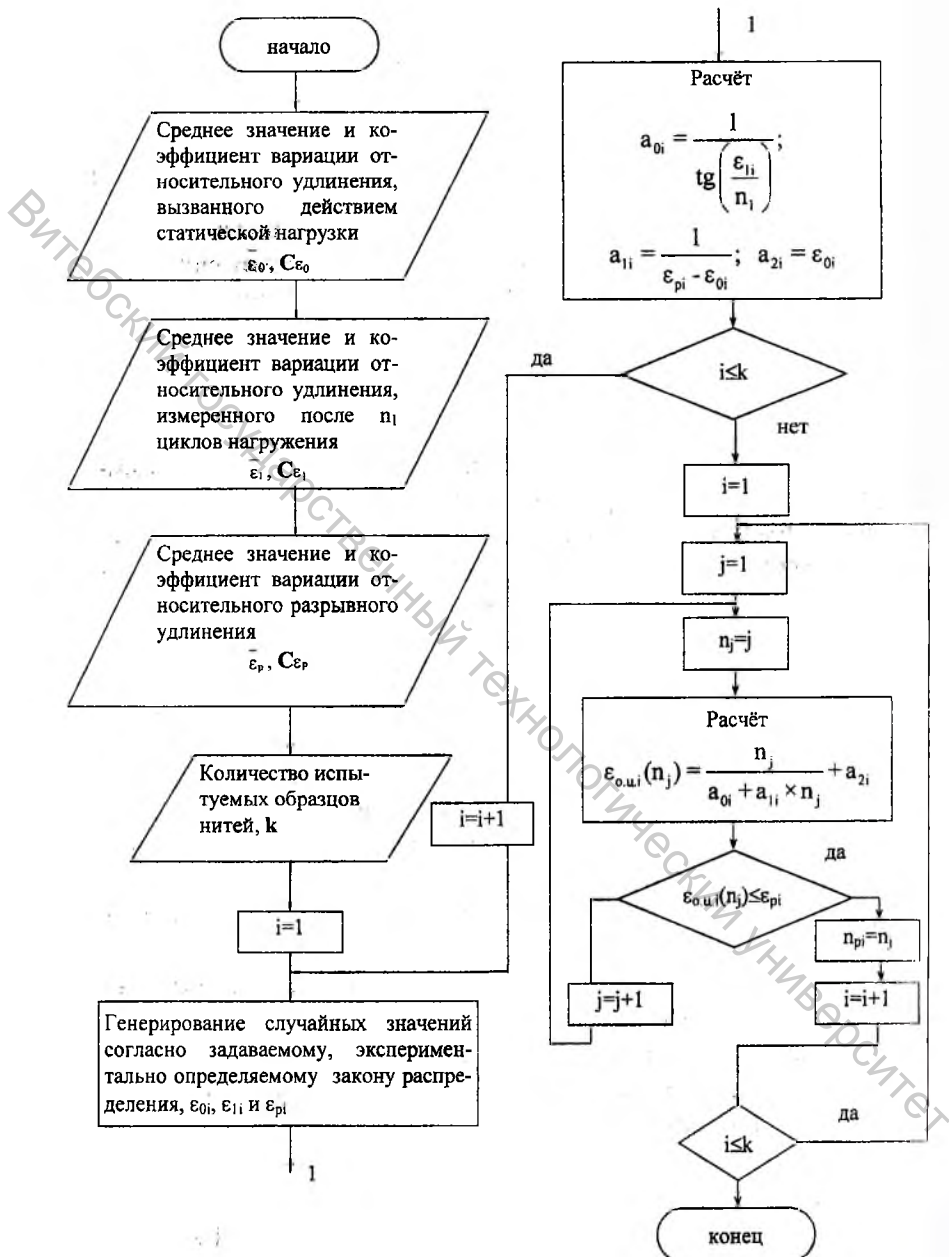


Рис.4.11. Схема алгоритма имитационной модели усталостного разрушения текстильной нитей при испытании на многократное растяжение

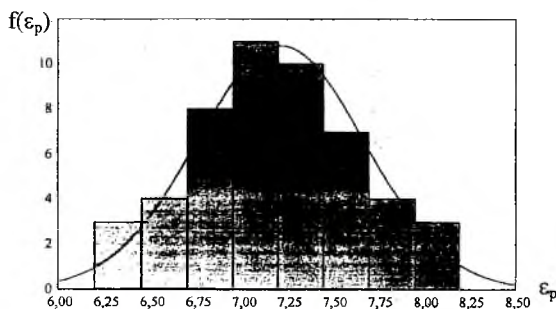


Рис. 4.12. Гистограмма распределения и функция плотности вероятности значений относительного разрывного удлинения ϵ_p для хлопчатобумажной пряжи 50 текс.

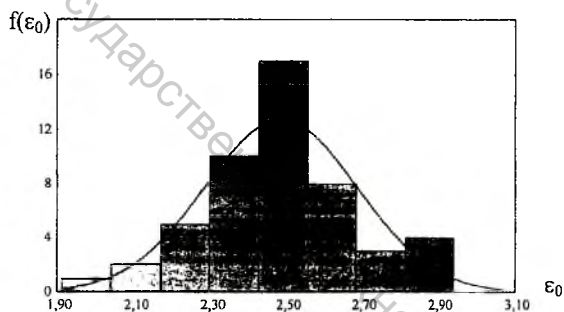


Рис. 4.13. Гистограмма распределения и функция плотности вероятности значений относительного удлинения нити, вызванного действием статической нагрузки ϵ_0 для хлопчатобумажной пряжи 50 текс.

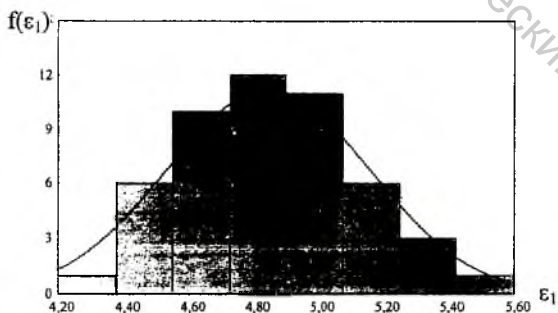


Рис. 4.14. Гистограмма распределения и функция плотности вероятности значений относительного удлинения нити, возникающего после 50 циклов нагружения ϵ_1 для хлопчатобумажной пряжи 50 текс.

По результатам критериальной оценки законов распределения значений параметров ϵ_0 , ϵ_1 и ϵ_p имитационной модели [31] закон распределения данных показателей был выбран нормальным с 95% доверительной вероятностью. Данный факт нормального распределения значений вышеуказанных параметров хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований по оценке остаточного циклического удлинения текстильных нитей различного сырьевого состава [80].

Результаты проведенного имитационного моделирования процесса испытания на многократное растяжение хлопчатобумажной пряжи 50 текс представлены на рис. 4.16. Для сравнительного анализа на рис. 4.15 представлена гистограмма распределений и функция плотности вероятности значений выносливости n_p для хлопчатобумажной пряжи 50 текс, полученные в ходе проведения эксперимента.

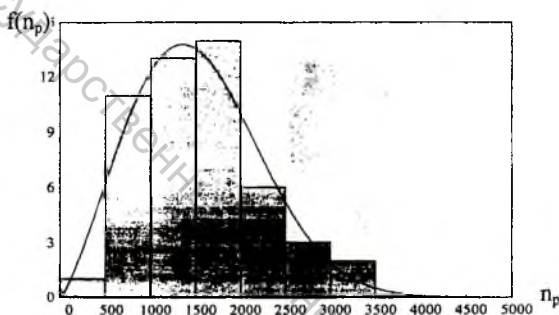


Рис. 4.15. Гистограмма распределения и функция плотности вероятности значений выносливости n_p для хлопчатобумажной пряжи 50 текс (экспериментальная)

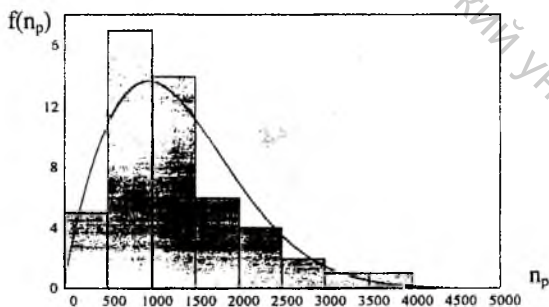


Рис. 4.16. Гистограмма распределения и функция плотности вероятности значений выносливости n_p для хлопчатобумажной пряжи 50 текс, полученная в результате имитационного моделирования процесса испытания

По результатам исследований были получены следующие численные значения показателей усталостных свойств хлопчатобумажной пряжи 50 текс:

- $\bar{n}_p = 1551$ цикл, $\sigma_n = 749$ цикл, $C_n = 48,3\%$ – в результате экспериментальной оценки;
- $\bar{n}_p = 1418$ цикл, $\sigma_n = 764$ цикл, $C_n = 53,9\%$ – в результате проведенного имитационного моделирования процесса усталостного разрушения.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии возможности оценки выносливости хлопчатобумажной пряжи по результатам кратковременных испытаний.

Следует отметить, что дальнейшие исследования усталостных свойств текстильных нитей основанных на имитационном моделировании процесса испытания могут быть направлены на:

- исследование возможности экспресс оценки выносливости текстильных нитей различного сырьевого состава и способа формирования с разработкой соответствующей методики;
- исследование взаимосвязи выносливости текстильных нитей и условий проведения испытаний (частоты нагружения, предварительного натяжения и заданной циклической деформации) с разработкой соответствующей обобщенной математической модели;
- исследование влияния показателей гетерогенности структуры и механических свойств на усталостные свойства текстильных нитей различного сырьевого состава;
- научное обоснование количества испытываемых образцов при проведении испытания на многократное растяжение текстильных нитей.

4.6. Апостериорное моделирование усталостного разрушения текстильных нитей при многократном испытании на растяжение

По определению процесс Пуассона является моделью эксперимента (испытания), при котором определятся либо число определенных событий, которые имеют место в течение определенного периода времени t , либо изменение состояния наблюдаемого объекта [92]. При этом состояние объекта может изменяться дискретно или непрерывно.

В данном случае событием считается, например, разрушение какого либо элемента из b параллельных элементов, функционирующих в системе. После отказа одного элемента его функция передается оставшимся элементам системы, и нагрузка распределяется между ними.

Изменение состояния объекта происходит путем появления и развития местных (локальных) повреждений. В данном случае под повреждением можно понимать трещины, изнашивание режущих элементов инструмента и т.д.

Процесс Пуассона может быть **стационарным**, при условии, что вероятность появления одного события на достаточно малом интервале времени Δt пропорциональна продолжительности этого интервала, и не зависит от расположения интервала на оси времени:

$$P_1(\Delta t) = \lambda \cdot \Delta t$$

где $P_1(\Delta t)$ – вероятность появления одного события за время Δt ;

λ – коэффициент пропорциональности.

При этом число событий зависит только от продолжительности этого интервала, и не зависит от его положения. Кроме того, вероятность появления двух и более событий за время Δt пренебрежительно мала.

Тогда

$$P_0(t) = \exp[-\lambda \cdot t]; \quad P_1(t) = (\lambda \cdot t) \cdot \exp[-\lambda \cdot t]$$

$$P_i(t) = \frac{(\lambda \cdot t)^i}{i!} \cdot \exp[-\lambda \cdot t]$$

где $P_i(t)$ – вероятность того, что за время t произойдет i событий.

Следовательно, для функции распределения $F(t)$ в случае стационарности процесса Пуассона можно записать:

$$F(t) = 1 - P_0(t) = 1 - \exp(-\lambda \cdot t).$$

Процесс Пуассона будет считаться **нестационарным**, если вероятность появления одного события в интервале $(t, t+\Delta t)$ будет зависеть от выбора расположения интервала на оси времени и определяться уравнением:

$$P_1(t, t+\Delta t) = \frac{c}{b} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^{c-1}$$

Если $c=1$, то процесс Пуассона – стационарный.

Тогда

$$P_0(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{b}\right)^c\right] \quad P_1(t) = \left(\frac{t}{b}\right)^c \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{b}\right)^c\right]$$

$$P_i(t) = \frac{\left(\frac{t}{b}\right)^{c \cdot i}}{i!} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{b}\right)^c\right]$$

Тогда интегральная функция распределения нестационарного процесса Пуассона будет характеризовать вероятность того, что одно событие произойдет до времени x :

$$F(t) = 1 - P_0(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{b}\right)^c\right]. \quad (4.26)$$

Накопление повреждений в процессе Пуассона довольно часто представляется графически в виде зависимости функции накопления повреждений Θ от времени t . Наиболее распространенные случаи накопления повреждений в процессе Пуассона представлены на рис.4.17.

Разброс уровня повреждений, при котором наступает отказ (или прекращение процесса), является следствием: погрешностей оценки уровня повреждений, наличием интервала значений повреждений, внутри которого процесс считается плохим, старением объекта за время испытания [93].

Следует учитывать, что экспериментальная (либо теоретическая) функция распределения $F(t)$ времени до отказа не определяет эволюционного накопления повреждений во времени.

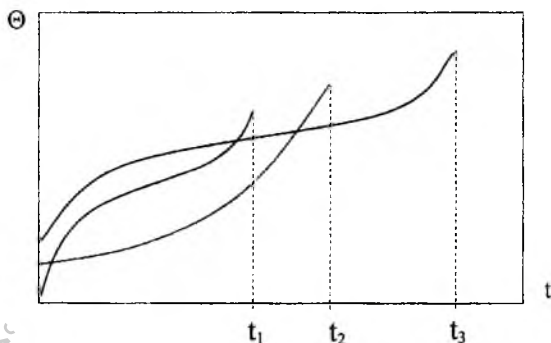


Рис.4.17. Типовые кривые изменения уровня повреждений Θ в процессе Пуассона

На основании вышеизложенного можно предположить, что процесс накопления остаточной циклической деформации при проведении испытаний на многократное растяжение идентичен процессу накопления уровня повреждений в процессе Пуассона.

Тогда применительно к остаточной циклической деформации по аналогии с соотношением (4.26) можно записать

$$\frac{\varepsilon_{\text{о.ц.}}(t) - \varepsilon_0}{\varepsilon_p - \varepsilon_0} = F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{b} \right)^c \right]. \quad (4.27)$$

Так как время нагружения пропорционально числу циклов, то модель (4.27) удобно переписать в следующем виде

$$\frac{\varepsilon_{\text{о.ц.}}(n) - \varepsilon_0}{\varepsilon_p - \varepsilon_0} = F(n) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n}{b} \right)^c \right], \quad (4.28)$$

где $F(n)$ – интегральная функция распределения, характеризующая вероятность того, что усталостное разрушение текстильной нити произойдет до числа циклов N ;

Введя обозначение

$$\frac{1}{b^c} = M^c,$$

математическую модель (4.28) удобно представить в виде:

$$\frac{\varepsilon_{\text{о.ц.}}(n) - \varepsilon_0}{\varepsilon_p - \varepsilon_0} = 1 - \exp[-M^c n^c]$$

или

$$\varepsilon_{\text{о.ц.}}(n) = \varepsilon_p - (\varepsilon_p - \varepsilon_0) \cdot \exp[-M^c n^c] \quad (4.29)$$

Для определения физического смысла параметра M модели (4.29), предположим, что существует такое число циклов нагружения $n_{\text{ср}}$, при котором текущее значение остаточной циклической деформации нити численно равна среднему арифметическому значению параметров ε_0 и ε_p модели (4.27):

$$\varepsilon_{\text{о.ц.}}(n_{\text{ср}}) = \frac{1}{2}(\varepsilon_0 + \varepsilon_p) \quad (4.30)$$

Тогда, подставив соотношение (4.30) в модель (4.29), получим

$$\frac{1}{2} \cdot (\varepsilon_p + \varepsilon_0) = \varepsilon_p - (\varepsilon_p - \varepsilon_0) \cdot \exp[-M^c n_{\text{ср}}^c] \quad (4.31)$$

После преобразований модель (4.29) приводится к виду:

$$\frac{1}{2} = \exp[-M^c n_{\text{ср}}^c] \Rightarrow M^c = \frac{\ln 2}{n_{\text{ср}}^c} \quad (4.32)$$

Следовательно, параметр модели M в данном случае определяет количество циклов нагружения $n_{\text{ср}}$, необходимое для выполнения условия (4.30).

Подставив соотношение (4.32) в модель (4.28) и положив $m = n/n_{\text{ср}}$, получим

$$\varepsilon_{\text{о.ц.}}(m) = \varepsilon_p - (\varepsilon_p - \varepsilon_0) \cdot \exp[-G \cdot m^c], \quad (4.33)$$

где m – безразмерное число циклов нагружения текстильной нити при про-

ведении усталостного испытания;

G – постоянная модели, имеющая постоянное значение $G = \ln 2 = 0,693$.

Обозначив

$$Z(m) = \frac{\varepsilon_{ост}(m)}{\varepsilon_p}; \quad Z_0 = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_p} \quad (4.34)$$

математическая модель (4.33) представляется в безразмерной форме:

$$Z(m) = 1 - (1 - Z_0) \cdot \exp[-G \cdot m^c]. \quad (4.35)$$

где Z_0 – параметр модели, определяющий долю деформации, относительно критической, вызываемой действием статической нагрузки;

$Z(m)$ – параметр модели, характеризующий долю накопившейся остаточной циклической деформации после m циклов нагружения, относительно критического (разрывного) удлинения

Совершенно очевидно, что при $m \rightarrow 0$ значение $Z(m) \rightarrow Z_0$, а при $m \rightarrow \infty$ – $Z(m) \rightarrow 1$.

Представление математической модели (4.29) в безразмерной форме (4.35), позволяет заменить семейство моделей, обладающих различными значениями темпового показателя M (рис.4.2).

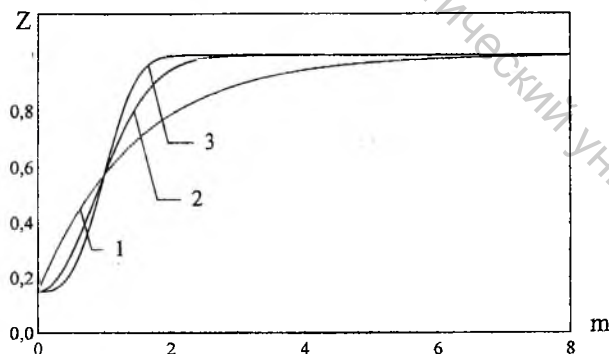


Рис.4.18. Зависимости Z от относительного числа циклов нагружения m при $Z_0=0,15$, построенные по модели (4.10) при условии 1–при $c=1$; 2–при $c=2$; 3–при $c=3$;

Таким образом, на основании анализа процесса накопления остаточной циклической деформации при проведении усталостных испытаний на многократное испытание, представленных на рис.4.3.–4.10 и интерпретации этих результатов с вероятностной точки зрения, разработана математическая модель взаимосвязи остаточной циклической деформации и количества циклов нагружения при испытании. Применение данной модели позволит осуществлять прогноз значений остаточной циклической деформации при проведении испытаний на многократное растяжение.

На основании анализа процесса накопления остаточной циклической деформации $\varepsilon_{o.ц.}$ при проведении испытаний на многократное растяжение (рис.4.3. – 4.10) и основного физического принципа теории надежности, сформулированном Н.М. Седякиным [93], можно выдвинуть гипотезу:

скорость изменения остаточной циклической деформации $d\varepsilon_{o.ц.}/dn$ не зависит от того, как и за какое время (количество циклов нагружения) она изменилась от некоторого начального значения ε_0 до текущего $\varepsilon_{o.ц.}$ в рассматриваемый момент времени, а зависит от условий проведения испытания и механических свойств текстильной нити.

Запись этого принципа в дифференциальной форме с учётом высказанной гипотезы имеет следующий вид:

$$\frac{d\varepsilon_{o.ц.}}{dn} = -M \cdot (\varepsilon_{o.ц.} - \varepsilon_p)^k, \quad (4.36)$$

где M – параметр модели, отражающий темп изменения остаточной циклической деформации;

k – параметр модели, принимающий значение 1, 2, ...

Решение дифференциального уравнения (4.36) при условии $k=1$ имеет следующий вид:

$$\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_{o.ц.}} \frac{d\varepsilon_{o.ц.}}{(\varepsilon_{o.ц.} - \varepsilon_p)} = -M \cdot \int_0^n dn \Rightarrow \ln \left| \frac{\varepsilon_{o.ц.} - \varepsilon_p}{\varepsilon_0 - \varepsilon_p} \right| = -M \cdot n,$$

$$\varepsilon_{o.ц.}(n) = \varepsilon_p + (\varepsilon_0 - \varepsilon_p) \cdot \exp[-M \cdot n] \quad (4.37)$$

Совершенно очевидно, что при $n \rightarrow 0$ значение остаточной циклической деформации $\varepsilon_{o.ц.} \rightarrow \varepsilon_0$, а при $n \rightarrow \infty$ – $\varepsilon_{o.ц.} \rightarrow \varepsilon_p$.

Определение физического смысла параметра M модели (4.37), осу-

существляется на основе предположения сформулированного выше и определяемого соотношением (4.30). После подстановки соотношения (4.30) в модель (4.37), и осуществления простейших преобразования, получено, что

$$M = \frac{\ln 2}{n_{cp}}. \quad (4.38)$$

Следовательно, параметр M модели (4.37) имеет смысл аналогичный соответствующему параметру модели (4.29) при условии, что $c=1$.

Подставив соотношение (4.38) в модель (4.37) и обозначив $m=n/n_{cp}$, получим

$$\varepsilon_{o.u.}(m) = \varepsilon_p + (\varepsilon_0 - \varepsilon_p) \cdot \exp[-G \cdot m], \quad (4.39)$$

где m – безразмерное число циклов нагружения текстильной нити при проведении усталостного испытания;

G – постоянная модели, имеющая постоянное значение $G=\ln 2=0,693$.

Математическая модель (4.39) в безразмерной форме с учётом обозначений (4.34) имеет следующий вид:

$$Z(m) = 1 + (Z_0 - 1) \cdot \exp[-G \cdot m] \quad (4.40)$$

Решение дифференциального уравнения (4.36) при условии $k=2$ примет следующий вид:

$$\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_{o.u.}} \frac{d\varepsilon_{o.u.}}{(\varepsilon_{o.u.} - \varepsilon_p)^2} = -M \cdot \int_0^n dn \Rightarrow \frac{(\varepsilon_{o.u.} - \varepsilon_0)}{(\varepsilon_{o.u.} - \varepsilon_p)} \cdot \frac{1}{(\varepsilon_0 - \varepsilon_p)} = -M \cdot n,$$

$$\varepsilon_{o.u.}(n) = \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_p) \cdot \varepsilon_p \cdot M \cdot n + \varepsilon_0}{1 + (\varepsilon_0 - \varepsilon_p) \cdot M \cdot n} \quad (4.41)$$

Определение физического смысла параметра M модели (4.41), осуществляется на основе предположения сформулированного выше и определяемого соотношением (4.30)

После подстановки условия (4.30) в модель (4.41) и преобразований темповой параметр M модели (4.41) определяется следующим соотношением:

$$M = \frac{1}{n_{\text{ср}} \cdot (\varepsilon_0 - \varepsilon_p)} \quad (4.42)$$

Подставив значение M в модель (4.41) и обозначив $m=n/n_{\text{ср}}$, окончательно получим

$$\varepsilon_{\text{о.н.}}(m) = \frac{\varepsilon_p \cdot m + \varepsilon_0}{1 + m}, \quad (4.43)$$

или в безразмерной форме данную математическую модель можно представить в следующем виде:

$$Z(m) = \frac{m + Z_0}{1 + m}, \quad (4.44)$$

При этом смысл $Z(m)$, Z_0 определяется соотношением (4.32).

Представление математических моделей (4.37), (4.41) в безразмерной форме (4.40) и (4.44) соответственно, позволяет заменить семейство моделей, обладающих различными значениями темпового показателя M (рис.4.19).

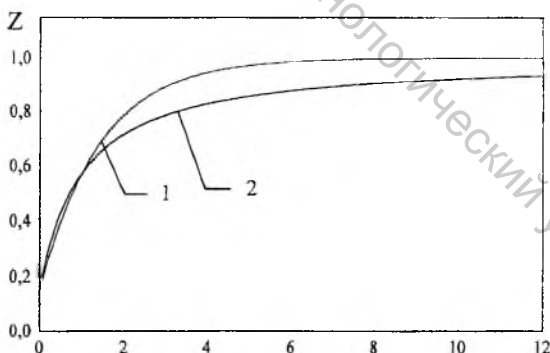


Рис.4.19. Зависимость Z от относительного числа циклов нагружения m при $Z_0=0,15$.

1— кривая, построенная по модели (4.40)

2— кривая, построенная по модели (4.44)

Следует отметить ограниченное применение математических моделей, полученных при $k>2$, согласно [93], вследствие этого примеры реализации принципа (4.36) при $k>2$ в данной работе не рассматривались.

Таким образом, в результате апостериорного моделирование усталостного разрушения текстильных нитей при многократном испытании на растяжение получены математические модели взаимосвязи остаточного циклического удлинения нитей и количества циклов нагружения, применение которых позволит осуществить прогноз показателей усталостных свойств текстильных нитей по результатам кратковременных испытаний с разработкой соответствующей методики. Можно отметить идентичный вид математических моделей (4.35) и (4.40), полученных различными способами, что свидетельствует о правомерности выдвинутых при этом гипотез и предположений.

РЕЗЮМЕ

1. В результате проведенных экспериментальных исследований усталостных свойств текстильных нитей различного сырьевого состава и способа формирования произведен анализ возможности оценки выносливости текстильных нитей по результатам кратковременных испытаний.
2. Произведен анализ влияния условий проведения многоциклового испытания на многократное растяжение (статическая нагрузка, заданная циклическая деформация) на характер изменения относительного остаточного удлинения текстильной нити при проведении испытаний на многократное растяжение.
3. На основе проведенного комплекса экспериментальных исследований разработана математическая модель взаимосвязи среднего значения остаточного циклического удлинения и числа циклов нагружения при проведении усталостных испытаний. Отличительной особенностью разработанной модели является тот факт, что параметры модели имеют строго определенный физический смысл. Произведен анализ влияния условий проведения испытаний на параметры разработанной математической модели, а также определены численные значения параметров математической модели взаимосвязи остаточного циклического удлинения и числа циклов нагружения для текстильных нитей различного сырьевого состава и способа формирования.
4. Методами имитационного моделирования процессов усталостного разрушения текстильных нитей при испытании на многократное растяжение показана возможность прогнозирования показателей выносливости текстильных нитей по результатам кратковременных результатов. Определены основные предполагаемые направления дальнейших исследований усталостных свойств текстильных нитей основанных на имитационном моделировании процесса испытания.
5. В результате апостериорного моделирования усталостного разрушения текстильных нитей при многократном испытании на растяжение получены математические модели взаимосвязи остаточного циклического удлинения нитей и количества циклов нагружения, применение которых позволит осуществить прогноз показателей усталостных свойств текстильных нитей по результатам кратковременных испытаний.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ТЕКСТИЛЬНЫХ НИТЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИСПЫТАНИЯ

При проведении имитационного моделирования испытаний было отмечено, что на реализацию значения исследуемого показателя качества существенное влияние оказывают не только исходные параметры модели, но и факторы, характеризующие условия проведения исследований. К таким факторам следует отнести следующие: вид сеанса моделирования (единичный или групповой), количество разбиений одиночной нити, значение приращения растягивающей силы и т.д. Результатом воздействия является значительный разброс реализации исследуемого показателя качества.

На рис.3.27 представлены реализации предела прочности $\sigma_p(C_{оп})$ при изменении вариации условного предела пластичности при отсутствии нестабильностей по другим свойствам для различных значений числа q разбиений одиночной нити. Проведенный анализ реализации $\sigma_p(C_{оп})$, представленной на рис.3.27, позволяет отметить, что при увеличении количества разбиений одиночной нити уменьшается разброс результатов имитационного моделирования. На рис.3.28 представлены реализации предела прочности $\sigma_p(C_{оп})$ при изменении вариации условного предела пластичности для различных сеансов моделирования (единичного или группового). Групповое моделирование заключается в многократном повторении ($m=50$) единичного. Результатом в таком случае является усредненное по m значение исследуемого параметра.

Вследствие этого, исследуемый при моделировании показатель качества (например, предел прочности) можно рассматривать, как некоторую случайную функцию $^{(s)}X(C)$ от вариации по выбранному физико-механическому свойству C .

Это позволит произвести количественную оценку влияния различных вариаций по физико-механическим свойствам нити на результат моделирования, а также уменьшить разброс реализации исследуемого показателя качества одиночной нити.

Такое представление исследуемого параметра широко применимо в параметрическом подходе прогнозирования надежности сложных систем [94]. В соответствии с теорией параметрической надежности контролируе-

мый (исследуемый) параметр можно представить в следующем структурном виде:

$$^{(s)}X(C) = X_0 + ^{(s)}\eta(C) + ^{(s)}\psi(C), \quad (5.1)$$

где X_0 – значение исследуемого параметра при отсутствии вариации ($C \rightarrow 0$);

$^{(s)}\eta(C)$ – функция тренда параметра;

$^{(s)}\psi(C)$ – флуктуации параметра; (знак (s) указывает на случайный характер составляющей).

Для выявления общих закономерностей изменения исследуемого показателя качества от нестабильностей по физико-механическим свойствам одиночной нити необходимо решить задачу анализа реализации и выделения тренда параметра $^{(s)}\eta(C)$ [94].

Выделение тренда параметра может осуществляться либо на основе применения полной системы ортогональных функций (полиномов) [94, 95], либо представлением тренда параметра в виде простейших функций (линейной, степенной, экспоненциальной и т.д.) [31, 95].

При применении полной системы ортогональных функций, функция тренда параметра $^{(s)}\eta(C)$ представлялась в следующем виде:

$$^{(s)}\eta(C_j) = \sum_i a_i \cdot \varphi_i(C_j), \quad (5.2)$$

где $\varphi_1(C_j), \varphi_2(C_j), \dots$ – полная система ортогональных функций (полиномов);

$\varphi_i(C_j)$ – полином i -той степени по C_j ;

$a_1, a_2, \dots$ – полиномиальные коэффициенты.

Ортогональность полиномов $\varphi(C_j)$, с весом равным 1, означает выполнение следующих условий:

$$\sum_{j=1}^n \varphi_i(C_j) \varphi_k(C_j) = \delta_{ik}; \quad (5.3)$$

$$\delta_{ik} = \begin{cases} 1, i = k \\ 0, i \neq k \end{cases}, \quad (5.4)$$

где j – номер дискретного измерения в сеансе моделирования;

n – общее количество наблюдений в сеансе моделирования.

Общий подход выделения функции тренда $^{(s)}\eta(C)$ на основании применения полной системы ортогональных полиномов подробно изложен в

[95]. Но данный подход не может ответить на вопрос об оптимальности степени полинома m с точки зрения физических процессов, протекающих в системе. Из анализа физических явлений, протекающих при деформировании и разрыве одиночной нити, следует логическое предположение о том, что функцию тренда параметра $^{(s)}\eta(C)$ можно считать кусочно-монотонной. Естественно также предположение о том, что скорость функции тренда $d\eta(C_j)/dC_j$, как на участке наблюдения, так на участке прогнозирования, при условии существования данной задачи, должна быть знакоопределенной. Этот факт учитывается при выборе максимальной степени полинома. Несмотря на случайность функции (5.1), как правило, существуют такие значения вариации, в которых значения функции тренда $^{(s)}\eta(C)$ (или скорости функции тренда $d\eta(C_j)/dC_j$) доподлинно известно или заданно. Такие точки C_p на графике будем называть реперными точками. Задача нахождения функции тренда $^{(s)}\eta(C_j)$, с учетом вышеизложенного, сводится к минимизации среднеквадратического отклонения σ_x (СКО) при условии, что функция тренда параметра проходит через реперные точки. Для учета реперных точек использовался метод неопределенных множителей Лагранжа [99].

Функция S представлялась в следующем виде:

$$S = \sum_{j=1}^n (X(C_j) - \sum_{i=0}^m a_i \varphi_i(C_j))^2 + \sum_{k=1}^L \lambda_k \left(\sum_{i=0}^m a_i \varphi_i(C_{pk}) \right). \quad (5.5)$$

Минимизируя S по $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ и учитывая условия (5.3), (5.4), были получены выражения для полиномиальных коэффициентов:

$$a_i = \frac{2 \sum_{j=1}^n X(C_j) \varphi_i(C_j) - \sum_{k=1}^L \lambda_k \varphi_i(C_{pk})}{2 \sum_{j=1}^n \varphi_i^2(C_j)}, \quad (5.6)$$

где $X(C_j)$ – реализация случайного значения исследуемого параметра;

L – общее количество реперных точек;

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_L$ – неопределенные множители Лагранжа;

$\varphi_i(C_j)$ – полином i -той степени по C_j ;

n – количество измерений в сеансе моделирования.

Для нахождения неопределенных множителей Лагранжа, подставляя (5.6) в (5.5), получаем систему линейных уравнений размерностью $[LXL]$:

$$\left. \begin{aligned} \eta(C_{p1}) &= \sum_{i=0}^m \frac{\left[2 \cdot \sum_{j=1}^n X(C_j) \cdot \varphi_i(C_j) - \sum_{k=1}^L \lambda_k \cdot \varphi_i(C_{pk}) \right] \cdot \varphi_i(C_{p1})}{2 \sum_{j=1}^n \varphi_i^2(C_j)} \\ \eta(C_{p2}) &= \sum_{i=0}^m \frac{\left[2 \cdot \sum_{j=1}^n X(C_j) \cdot \varphi_i(C_j) - \sum_{k=1}^L \lambda_k \cdot \varphi_i(C_{pk}) \right] \cdot \varphi_i(C_{p2})}{2 \sum_{j=1}^n \varphi_i^2(C_j)} \\ &\dots \\ \eta(C_{pL}) &= \sum_{i=0}^m \frac{\left[2 \cdot \sum_{j=1}^n X(C_j) \cdot \varphi_i(C_j) - \sum_{k=1}^L \lambda_k \cdot \varphi_i(C_{pk}) \right] \cdot \varphi_i(C_{pL})}{2 \sum_{j=1}^n \varphi_i^2(C_j)} \end{aligned} \right\} \quad (5.7)$$

Решая данную систему уравнений совместно, можно определить численные значения неопределенных множителей Лагранжа и, как следствие, значения полиномиальных коэффициентов a_i .

При выделении функции тренда параметра на основе математической модели (5.1)–(5.7) аналитическое представление полиномиальных коэффициентов a_i для случая привязки функции тренда к одной реперной точке по значению имеет следующий вид:

$$a_i = \frac{\sum_{j=1}^n X(C_j) \cdot \varphi_i(C_j) + R_i}{\sum_{j=1}^n \varphi_i^2(C_j)}, \quad (5.8)$$

где

$$R_i = \varphi_i(C_{p1}) \cdot \left[\frac{\eta(C_{p1}) - \sum_{i=0}^m \frac{\varphi_i(C_{p1}) \sum_{j=1}^n X(C_j) \cdot \varphi_i(C_j)}{\sum_{j=1}^n \varphi_i^2(C_j)}}{\sum_{i=0}^m \frac{\varphi_i^2(C_{p1})}{\sum_{j=1}^n \varphi_i^2(C_j)}} \right].$$

Для решения задачи сопоставимости эффективности предложенного подхода и общеизвестных вариантов выделения функции тренда параметра проведение практического эксперимента для получения реализации $^{(s)}X_p(C_j)$ требует значительных материальных и временных затрат. Для их сокращения разработаны математические модели, реализованные в программной системе Maple V, с конкретно задаваемыми параметрами законов распределения и тренда. Разработанные модели дают возможность при незначительных материальных и временных затратах оценить эффективность различных методик анализа реализации случайного значения исследуемого параметра $^{(i)}X(C_j)$ и выделения функции тренда $^{(s)}\eta(C_j)$ [96]. Предложенный подход выделения функции тренда параметра был применен для решения задачи обеспечения и прогнозирования надежности парокompрессионных и теплонагревательных установок [97–98]. Но дальнейшие исследования в данной области указывают на то, что, наряду с высокой точностью оценки функции тренда параметра, данный подход имеет довольно существенный недостаток. Он заключается в том, что полиномиальные коэффициенты a_i не обладают информацией о физической сущности физических процессов, которые возникают при испытании. Также отсутствует возможность количественной сопоставимости влияния различных нестабильностей по физико-механическим свойствам нити на исследуемый показатель качества.

Вследствие этого, выделение функции тренда параметра $^{(s)}\eta(C)$ на основе применения полной системы ортогональных функций (полиномов) рекомендуется производить для выявления общих закономерностей изменения исследуемого показателя в случаях ограниченной выборки, а также для уменьшения материальных и временных затрат в ходе проведения эксперимента.

Дальнейшие исследования возможности применения параметрического принципа для оценки показателей качества текстильных материалов, с точки зрения авторов, могут быть направлены:

- на исследование влияния количества реперных точек на достоверность оценки исследуемого показателя качества;
- на разработку соответствующих рекомендаций по обоснованию выбору реперных точек на диапазоне наблюдения;
- на исследования влияния законов распределения исследуемого показателя качества на достоверность его оценки параметрическим методом;
- на разработку обобщенной методики параметрического принципа оценки исследуемого показателя качества текстильного материала;

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель влияния зажимной длины на разрывную нагрузку текстильных нитей различного сырьевого состава, отличительной особенностью которой является тот факт, что её параметры имеют строго определенный физический смысл. Обоснован ряд дополнительных показателей характеризующих неравномерность прочности по длине текстильных нитей и разработана методика их оценки по результатам кратковременных испытаний, позволяющая повысить информативность полуволнового испытания на растяжение. Произведена экспериментальная оценка показателей, характеризующих неравномерность прочности по длине текстильных нитей различного сырьевого состава. Установлено, что относительный показатель неравномерности прочности ψ_d является характеристикой, зависящей от изменения волокнистого состава, способа переработки и структуры нитей.
2. Обоснован и введен ряд дополнительных показателей, характеризующих деформационные свойства текстильных нитей при растяжении: условный предел упругости σ_y , условный предел пластичности σ_n и условный предел упрочнения $\Delta\sigma_{упр}$. Разработана методика оценки показателей деформационных свойств текстильных нитей по результатам кратковременных испытаний. Проведенные экспериментальные исследования процесса растяжения текстильных волокон и нитей различного сырьевого состава подтвердили достоверность предложенной методики не только с математической точки зрения, но и с точки зрения физики процессов, протекающих при деформировании и разрушении текстильных материалов.
3. Разработаны алгоритмы статистической имитации процесса деформирования и разрушения текстильной нити, обладающей различного вида неравномерностью показателей механических свойств и структуры. Установлена закономерность влияния показателей продольной и поперечной гетерогенности строения и механических свойств текстильных нитей (волокон) пучка на характеристики кривой растяжения в координатах «нагрузка – удлинение»; произведена количественная оценка с разработкой соответствующих моделей прогноза влияния продольных и поперечных вариаций показателей структуры и механических свойств на прочностные характеристики нити. С увеличением степени указанной неравномерности закономерно снижаются прочностные показатели текстильных нитей (волокон). Ус-

тановлено, что наибольшее влияние на прочностные характеристики текстильных материалов оказывают продольные вариации по линейной плотности, условному пределу упрочнения и пластичности, а также поперечные гетерогенности степени разнотолщинности нитей (волокон) пучка и абсолютного разрывного удлинения; произведен анализ случайного совместного влияния различных продольных и поперечных вариаций (строения, механических свойств нити) на форму и параметры кривой растяжения, а также на прочностные характеристики текстильных материалов. Проведено теоретическое обоснование подхода к вопросу оценки показателей поперечной гетерогенности показателей структуры и механических свойств текстильных нитей в зависимости от формы и параметров кривой растяжения. Научно обоснованы и разработаны математические модели оценки показателей поперечной гетерогенности степени разнотолщинности и абсолютного разрывного удлинения пучка нитей (волокон) по результатам полуциклового испытания на растяжение, применение которых позволит без использования дополнительного специального оборудования значительно расширить диапазон полученных сведений, и позволит более объективно и всесторонне оценить качество волокон и нитей. Проведены исследования совместного влияния продольной и поперечной гетерогенности показателей структуры и механических свойств на прочностные характеристики текстильных материалов. Произведена оценка совместного влияния поперечных и продольных вариаций показателей структуры и механических свойств на прочностные характеристики текстильных нитей не только на качественном, но и на количественном уровне с разработкой соответствующих моделей прогноза. Произведен анализ случайного совместного влияния различных поперечных и продольных вариаций (строения, механических свойств нити) на форму и параметры кривой растяжения, а также на прочностные характеристики текстильных материалов.

4. Произведен анализ возможности оценки выносливости текстильных нитей по результатам кратковременных испытаний и влияния условий проведения многоциклового испытания на многократное растяжение (статическая нагрузка, заданная циклическая деформация) на характер изменения относительного остаточного удлинения текстильной нити при проведении испытаний на многократное растяжение. Разработана математическая модель взаимосвязи среднего значения остаточного циклического удлинения и числа циклов нагружения при проведении усталостных испытаний. Отличительной

особенностью разработанной модели является тот факт, что параметры модели имеют строго определенный физический смысл. Произведен анализ влияния условий проведения испытаний на параметры разработанной математической модели, а также определены численные значения параметров математической модели взаимосвязи остаточного циклического удлинения и числа циклов нагружения для текстильных нитей различного сырьевого состава и способа формирования. Методами имитационного моделирования процессов усталостного разрушения текстильных нитей при испытании на многократное растяжение показана возможность прогнозирования показателей выносливости текстильных нитей по результатам кратковременных испытаний. В результате апостериорного моделирования усталостного разрушения текстильных нитей при многократном испытании на растяжение получены математические модели взаимосвязи остаточного циклического удлинения нитей и количества циклов нагружения, применение которых позволит осуществить прогноз показателей усталостных свойств текстильных нитей по результатам кратковременных испытаний.

5. Разработан параметрический принцип оценки показателей качества текстильных материалов, применение которого рекомендуется производить для выявления общих закономерностей изменения исследуемого показателя в случаях ограниченной выборки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кирюхин, С.М.** Обрыв нити / С.М.Кирюхин //Текстил. пром-сть, – 1999.– №9-10. – С.30-31.
2. **Соловьев, А.В.** Оценка и прогнозирование качества текстильных материалов / А.Н. Соловьев, С.М. Кирюхин – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 181 с.
3. **Кирюхин, С.М.** Контроль и управление качеством текстильных материалов. / А.Н. Соловьев, С.М. Кирюхин – М.: Легкая индустрия, 1977.- 311 с.
4. **Гост 6611.2–73** Нити текстильные. Методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве.
5. **Гост 28890–90** Нити текстильные. Методы определения компонентов полного удлинения при растяжении нитей нагрузкой, меньше разрывной.
6. **Гост 28447.2–90** Нити текстурированные. Методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве.
7. **Гост 28447.0–90** Нити пневмотекстурированные. Методы определения нестабильности структуры и неустойчивости силы растяжения.
8. **Кукин, Г.К.** Текстильное материаловедение (волокна и нити) / Г.К. Кукин, А.Н. Соловьев, А.И. Кобляков – М.: Легпромбытиздат, 1989. – 271 с.
9. **Кукин, Г.К.** Текстильное материаловедение. Ч.2 / Г.К. Кукин, А.Н. Соловьев – М.: Легкая индустрия, 1964. – 378 с.
10. **Перепелкин, К.Е.** Дефектность и технологическая работоспособность нитей – основные факторы стабильности процессов их получения и переработки / К.Е. Перепелкин //Вестник МГТА. – 1994. Вып.1.– С.139-151.
11. **Мортон, В.Е.** Механические свойства текстильных волокон: Пер. с англ./ В.Е. Мортон, О.В. Хёрл. – М.: Легкая индустрия, 1971.–181 с.
12. **Перепелкин, К.Е.** Косвенный метод оценки скрытой дефектности текстильных нитей / К.Е. Перепелкин, М.Н. Иванов, И.В. Крутько // Изв. вузов. Технол. текстил. пром-сти. – 1996.– № 6, – С.9-12.
13. **Перепелкин К.Е.** Масштабный эффект разрывных характеристик и его применение для оценки качества волокон и нитей // Надежность, экономичность и качество текстильных материалов: Тез. докл. 12 Всесоюз. науч. конф. по текстильному материаловедению, 19–21 окт. 1988 г. Т.2 / КТИЛПИ. – Киев. – 1988. – С.52-53.

14. **Махаринский, Е.И.** Основы теории проектирования технических систем: Учебное пособие / Е.И. Махаринский, Ю.Е. Махаринский, В.И. Ольшанский; ВГТУ. – Витебск, 1998–236 с.
15. Определение дефектности нитей по масштабному эффекту разрывных характеристик / К.Е. Перепелкин, Г.Г. Лебедева, С.А. Баранова и др. // Сб. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. по текстил. материаловедению “Перспективы развития производства и применения крученых, текстурированных нитей и пряжи из химических волокон”/ МТИ им. А.Н. Косыгина. – М., 1988. – С.136-137.
16. **Васильева, О.В.** Исследование масштабного эффекта элементарных и скрученных нитей / О.В. Васильева, А.С. Андреев, В.И. Кучер // Сб. докл. XI Всесоюз. науч. конф. по текстил. материаловедению “Совершенствование методов и приборов, улучшающих оценку качества текстильных материалов”/ МТИ им. А.Н. Косыгина. – М., 1984. – С.136-137.
17. **Иванцова, Т.М.** Прямые и косвенные методы оценки дефектности и неравномерности свойств химических волокон / Т.М. Иванцова, Н.И. Бруско, Е.А. Федотова // Надежность, экономичность и качество текстильных материалов: Тез. докл. 12 Всесоюз. науч. конф. по текстильному материаловедению, 19–21 окт. 1988 г.: т.2 / КТИЛП. – Киев. – 1988. – С.30–31.
18. **Перепелкин, К.Е.** Оценка изменения дефектности целлюлозных и ацетатных нитей при термостарении по масштабной зависимости механических свойств / К.Е. Перепелкин, С.А. Баранова, Т.А. Матвиенко // Хим. Волокна –1996.– № 6.– С.34-38.
19. Зависимость прочности пряжи от длины образца. Weak link effect tensile properties of cotton yarns // Text. Technol. Dig.–1995.–52.– № 7.– С.37.
20. **Нарисова, И.** Прочность полимерных материалов / И. Нарисова – М.: Химия, 1987.–400 с.
21. **Белицын, М.Н.** Синтетические нити (структура, свойства, методы расчёта) / М.Н. Белицын – М.: Легкая индустрия, 1970.–192 с.
22. **Макаров, В.Г.** Масштабный эффект прочности углеродных волокон / В.Г. Макаров, И.А. Скоробогатов, А.П. Устимова // Хим. волокна.– 1994.– №2.–С.45-47.
23. **Скуланова, Н.С.** О построении новой модели разрушения и расчете прочности пряжи / Н.С. Скуланова // Изв. вузов. Технол. текстил. пром-сти.–1994. – №1.– С.5-10.

24. Модель прогнозирования обрывности пряжи. Predicting end breakage rates in worsted spinning. A new model for end break prediction // Text. Technol. Dig.-1995.-52, №3.-С.21.
25. **Поздняков, Б.П.** Выборочный контроль качества текстильной продукции / Б.П. Поздняков – М.: Легкая индустрия, 1969. – 440 с.
26. **Кузнецов, А.А.** Исследование влияния условий проведения испытаний на прочностные характеристики текстильных материалов / А.А. Кузнецов, В.И. Ольшанский, Е.И. Махаринский // Физика процессов деформации и разрушения и прогнозирования механического поведения материалов.: Тр. XXXVI Междунар. семинара “Актуальные проблемы прочности”, 26–29 сент. 2000 г.: В 2-х ч. / ВГТУ. – Витебск, 2000. – Ч.2. – С.639–644.
27. **Махаринский, Е.И.** Исследование масштабного эффекта прочностных характеристик текстильных материалов методом имитационного моделирования полуциклового испытания на растяжение / Е.И. Махаринский, В.И. Ольшанский, А.А. Кузнецов // Матер. Междунар. научн.-техн. конф. “Метрологическое обеспечение качества – 2000”. – Мн.: БНТУ, 2000. – С.153–159.
28. **Ольшанский, В.И.** Методика оценки показателей неравномерности прочности текстильных нитей по длине / В.И. Ольшанский, А.А. Кузнецов / ВГТУ – Витебск, 2001 – 20 с.
29. **Кузнецов, А.А.** Оценка неравномерности прочности текстильных нитей / А.А. Кузнецов, П.А. Синкевич // Сб. ст. VII Респ. науч. конф. студ. и аспирантов Беларуси (НИРС–2002)/ УО «ВГТУ». – Витебск, 2002. –С. 385–387
30. **Ольшанский, В.И.** Методы оценки показателей качества текстильных материалов по результатам полуциклового испытания на растяжение / В.И. Ольшанский, А.А. Кузнецов // Матер. Междунар. научн.-техн. конф. “Метрологическое обеспечение качества – 2002”. – Мн.: БНТУ, 2002. – С.32–37.
31. **Ящерицын, П.И.** Планирование эксперимента в машиностроении / П.И. Ящерицын, Е.И. Махаринский. – Мн.: Выш. шк., 1985. - 286 с.
32. **Корицкий, К.И.** Инженерное проектирование текстильных материалов / К.Е. Корицкий. – М.: Легкая индустрия, 1971. – 352 с.
33. **Мазов, Ю.А.** Упругие свойства высокообъемных эластичных нитей / Ю.А. Мазов // Мех. свойства и износостойкость текстил. матер.: Сб. докл. VII Всесоюз. науч. конф. по текстил. материаловедению.– Вильнюс–Каунас, 1971.–С.81-84.
34. **Аскадский, А.А.** Деформация полимеров /А.А. Аскадский. – М.: Химия, 1973.-448с.

35. **Калиновски, Е.** Химические волокна (исследования и свойства) / Е. Калиновски, Г.В. Урбанчик – М.: Легкая индустрия, 1971.-319 с.
36. **Бартенев, Г.М.** Механика полимеров / Г.М. Бартенев, А.М. Кучеровский. – М.: Наука, 1970.-544 с.
37. **Бартенев, Г.М.** Физика полимеров / Г.М. Бартенев. – М.: Наука, 1979. – 344 с.
38. **Харченкова, Г.И.** Прогнозирование относительной разрывной нагрузки пряжи / Г.И. Харченкова, Н.Г. Шульгина, В.Н. Никольская // Текстиль. пром-сть – 1997. – №1. – С.31-32.
39. **Варжа, В.В.** Исследование характеристик растяжения смешанной (шерсто-лавсановой) в зависимости от сырьевого состава и крутки / В.В. Варжа, А.В. Матуконис // Текстиль. материаловедение: Межвуз. сб. науч. тр. – М., 1998. – С.46-51.
40. **Серебрицкий, А.В.** Проектирование разрывной нагрузки хлопкозластиковой комбинированной пряжи пневматического способа пряжедения/ А.В. Серебрицкий, Е.Ф. Березин.// Надежность, экономичность и качество текстильных материалов: Тез. докл. 12 Всесоюз. науч. конф. по текстильному материаловедению, 19–21 окт. 1988 г. Т.2 / КТИЛП. – Киев. – 1988. – С.56-57.
41. Прогнозирование прочности пряжи. Estimation of skein strength from HVI (High Volume Instrument) data//Text. Technol. Dig. – 1994.– №10.– С.86.
42. Соотношение между разрывной нагрузкой одиночных нитей и их пучков. Relationship between single fibre strength and bundle fibre strength of manmade fibres//Text. Technol. Dig.-1995.-№6.–С.93.
43. Производство комбинированных нитей аэродинамическим способом / А.Г. Коган, Е.Ф. Березин, Е.А. Калмыкова, и др. – М.: Легпромбытиздат, 1988. – 176 с.
44. **Коган, А.Г.** Производство комбинированной пряжи/ А.Г. Коган. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 143 с.
45. **Тихомиров, В.Б.** Планирование и анализ эксперимента/ В.Б. Тихомиров – М.: Легпромбытиздат, 1974.– 173 с.
46. **Адлер, Ю.П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976.–280 с.
47. Исследование прочности пучка параллельных нитей / Gn Bohong, Wang Shanyan, Liu Vinebn, Hou Renii // Zhonggikofangzhi daxue xuebao = J. China Text. Univ.–1996.–22, №3.–С.9-14.

48. Моделирование механических свойств пряжи = Simulating the mechanical properties of a yarn based on the properties and arrangement of its fibers. Pt2.Results of simulations // Van Langenhove Lieva./Text. Res. J. – 1997.-67, №5.–С.342–347.
49. **Сорокин, Е.И.** Исследования по неравномерности химических волокон / Е.И. Сорокин, К.Е.Перепелкин // Докл. VII Всесоюз. науч. конф. по текстильному материаловедению.– Вильнюс-Каунас,1971.–С.98-103.
50. Прогнозирование прочностных свойств пряжи = Analysis of the modeling methodologies for predicting the strength of air-jet spun yarns / Rajamanic Kam Rangaswamy, Hansen Steven M., Jayaraman Sundaresan // Text. Res. J. –1997.–67, №1.– С.39–44.
51. **Монкрифф, Р. У.** Химические волокна / Р. У. Монкрифф – М.: Легкая индустрия, 1964. – 606 с.
52. **Кузнецов, А.А.** Исследование механических свойств текстильных материалов на основе математического моделирования процесса растяжения / А.А.Кузнецов, Е.И. Махаринский, В.И.Ольшанский // Междунар. науч.–техн. конф. «Современ. наукоемкие технологии и перспективные матер. текстильной и легкой пром–сти» (ПРОГРЕСС-2000), 17–19 мая 2000 г.: Тез. докл. / ИШТА. – Иваново, 2000.– С.175–176.
53. **Кузнецов, А.А.** Оценка механических свойств текстильных материалов с учетом влияния их гетерогенности / А.А. Кузнецов, В.И. Ольшанский, Е.И. Махаринский // Физика процессов деформации и разрушения и прогнозирования механического поведения материалов.: Тр. XXXVI Междунар. семинара “Актуальные проблемы прочности”, 26–29 сент. 2000 г.: В 2–х ч. / ВГТУ. – Витебск, 2000. – ч.2. – С.633–638.
54. **Коган, А.Г.** Оценка и прогнозирование механических свойств пневмотекстурированных химических нитей/ А.Г. Коган, А.А. Кузнецов, В.И.Ольшанский // Сб. докл. Междунар. науч. конф. “Новое в технике и технологии текстильной и легкой пром–сти”, 22–23 нояб. 2000 г./ ВГТУ. – Витебск, 2000. – С.61–64.
55. **Кузнецов, А.А.** Оценка и прогнозирование механических свойств комбинированных нитей / А.А. Кузнецов, В.И. Ольшанский, Н.Н. Ясинская// Матер. юбил. науч.–техн. конф., 23–24 нояб. 2000 г.: В 3-х ч./ СПГУТД. – СПб., 2000. – Ч.3. – С.86–88.
56. **Ольшанский, В.И.** Методика оценки показателей деформационных свойств текстильных нитей по результатам полуциклового испытания на растяжение / В.И. Ольшанский, Е.И. Махаринский, А.А. Кузнецов / ВГТУ. – Витебск, 2001 – 19 с.

57. **Ивахненко, А.Г.** Моделирование сложных систем по экспериментальным данным/ А.Г. Ивахненко, Ю.П. Юрачковский. – М.: Радио, 1986. –123 с.
58. **Махаринский, Е.И.** Исследование базовых показателей качества текстильных материалов на основе имитационного моделирования процесса испытания / Е.И. Махаринский, В.И. Олшанский, А.А. Кузнецов // Матер. Междунар. научн.–техн. конф. “Метрологическое обеспечение качества – 2000”. – Мн.: БНТУ, 2000. – С.159–165.
59. **Кузнецов А.А.** Исследование влияния продольной гетерогенности механических свойств одиночной нити на прочностные характеристики / А.А.Кузнецов // Междунар. науч.–техн. конф. «Современ. наукоемкие технологии и перспективные матер. текстильной и легкой пром–сти» (ПРОГРЕСС-2000), 17–19 мая 2000 г.: Тез. докл. / ИГТА. – Иваново, 2000.– С.177–178.
60. Имитационное моделирование полудиклового испытания на растяжение пучка волокон / А.Г. Коган, А.А. Кузнецов, Е.И. Махаринский и др. // Сб. докл. Междунар. науч. конф. “Новое в технике и технологии текстильной и легкой пром–сти”, 22–23 нояб. 2000 г./ ВГТУ. – Витебск, 2000. – С.85–88.
61. **Панкратова, М.А.** Текстильные волокна / М.А.Панкратова, В.П. Гапонова. – М.: Легпромбытиздат, 1986.–270 с.
62. **Поздняков, Б.П.** Усталость тканей и расчёт их прочности на растяжение / Б.П.Поздняков // Легкая пром–сть. – 1936.–№5.– С.12–15.
63. **Воеводина, Н.П.** Усталость волокон и пряжи при многократном растяжении: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.П. Воеводина.– М., 1956. – 23 с.
64. **Березина, О.Я.** Зависимость свойств тонкогребенной шерстяной пряжи от её номера и крутки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / О.Я. Березина.– М., 1958. – 21 с.
65. **Алишаускайте, Г.** Оценка усталости нитей при многократном растяжении: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г. Алишаускайте.– Каунас, 1966 – 26 с.
66. **Бородовский, М.С.** К вопросу о сопротивлении текстильных материалов/ М.С. Бородовский // Текстиль. пром–сть. – 1951.– №12.– С.34–37.
67. **Бородовский, М.С.** Сопротивление текстильных материалов/ М.С. Бородовский // Текстиль. пром–сть. – 1952.– №2.– С.31–35.

68. **Миловидов, Н.Н.** Усталость пряжи как один из факторов, влияющих на обрывность в прядении / Н.Н. Миловидов // Изв. вузов. Технология текстил. пром-сти. – 1962. – №3. – С.58–63.
69. **Миловидов, Н.Н.** Выносливость пряжи при многократном растяжении и её связь с обрывностью в процессе ткачества/ Н.Н. Миловидов // Изв. вузов. Технология текстил. пром-сти. – 1964. – №2. – С.77–82.
70. **Миловидов, Н.Н.** Практическая ценность показателя выносливости / Н.Н. Миловидов // Текстиль. пром-сть. – 1965. – №9. – С.65–68.
71. **Миловидов, Н.Н.** Усталость хлопчатобумажной пряжи после многократного растяжения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.Н. Миловидов. – М., 1964. – 23 с.
72. **Алексеева, Н.С.** Выносливость пряжи при многократном растяжении и её связь с прочностью на разрыв/ Н.С. Алексеева // Изв. Вузов. Технология текстил. пром-сти. – 1970. – №3. – С.13–15.
73. **Макеева, Т.В.** Исследование кинетики разрушения пряжи и волокон при многократном растяжении и истирании/ Т.В. Макеева, Г.Н. Кукин // Изв. вузов. Технология текстиль. пром-сти. – 1974. – №1. – С.15–19.
74. **Кулейкина, Т.В.** Исследования процесса разрушения пряжи при многократном растяжении и износе от истирания: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Т.В. Кулейкина. – М., 1974. – 22 с.
75. **Хаймов, Б.Я.** Исследование усталостных характеристик ацетатного шелка при многократном растяжении: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Б.Я.Хаймов. – Ташкент, 1966 – 22 с.
76. **Кусакова, Л.Г.** К вопросу исследования усталостных характеристик при многократном растяжении аппаратной пряжи и их связь с обрывностью в ткачестве / Л.Г. Кусакова, А.С. Бирюлина, В.Г.Огурцова //Науч.-исслед. тр. Лат. НИИЛП. Т.VII. – Рига: Звайгзне, 1972. – С.76–87.
77. **Носов, М.Н.** Усталость нитей (Методы испытаний и приборы) / М.Н. Носов, С.С. Теплицкий. – Киев: Техніка, 1975. – 176 с.
78. **Носов, М.Н.** Разработка методов исследования усталости синтетических кордных нитей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.Н. Носов. – М., 1959. – 28 с.
79. **Дружинина, Т.В.** Механические свойства волокон из полиэтилена и сополимеров этилена с пропиленом/ Т.В. Дружинина // Текстиль. пром-сть. – 1965. – №5. – С.18–21.
80. **Алишаускайте, Г.** Оценка усталости нитей по остаточной циклической деформации / Г. Алишаускайте, А. Пиктис // Изв. вузов. Технология текстил. пром-сти. – 1966. – №2. – С.20–26.

81. **Литовченко, С.Ф.** Совершенствование метода испытания нитей на многократное растяжение: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.Ф.Литовченко.– М., 1976. – 25 с.
82. **Кусакова, Л.Г.** Изучение усталостных свойств аппаратной пряжи/ Л.Г. Кусакова, А.С. Бирюлина, В.Г. Огурцова // Мех. свойства и износостойкость текстил. матер.: Сб. докл. VII Всесоюз. науч. конф. по текстил. материаловедению.– Вильнюс–Каунас, 1971.– С.136–137.
83. **Юркевичус, С.И.** Исследования выносливости комплексных нитей / С.И. Юркевичус, А.А. Янкунас, Ю.П. Индрюнас // Изв. вузов, Технология текстил. пром–сти.– 1971.– №4.– С.30–33.
84. **Юркевичус, С.И.** Прогнозирование выносливости комплексных нитей в зависимости от силового режима утомления / С.И. Юркевичус // Изв. Вузов. Технология текстил. пром–сти.– 1976.– №1.– С.32–33.
85. **Тихомирова, Е.В.** Исследование влияния температуры и времени сушки на свойства льняной пряжи / Е.В. Тихомирова // Изв. вузов. Технология текстил. пром–сти.– 1964.– №3.– С.12–15.
86. **Букаев, П.Т** Исследование выносливости хлопчатобумажной пряжи при повышенной частоте нагружения / П.Т. Букаев // Сб. науч. тр. «Исследования в области ткачества и материаловедения» / ЦНИИ-ТЭИлегпром. – М., 1972. – С.47–54.
87. **Кусакова, Л.Г.** О методах оценки усталостных характеристик пряжи при многократном растяжении / Л.Г. Кусакова // Науч.–исслед. тр. Лат. НИИЛП. Т.III.– Рига: Звайгзне, 1968. – С.87–98.
88. **Кусакова, Л.Г.** Применение 3–го асимптотического распределения к оценке выносливости пряжи при многократном растяжении/ Л.Г. Кусакова, А.С. Бирюлина // Науч.–исслед. тр. Лат. НИИЛП. Т.IV.– Рига: Звайгзне, 1969. – С.112–118.
89. **Шутова, Н.Е.** О характере распределения выносливости хлопчатобумажной пряжи при истирании/ Н.Е. Шутова // Сб. науч. тр. VIII Всесоюз. конф. по текстильному материаловедению. – Л., 1974.– Ч.1.– С.220–224.
90. **R.Picciotto and S.Hersh**, The Tensile Fatigue Behavior of a Warp Yarn its Influence on Weaving Performance, “Textile Res. J.”, №9, 1972.– С.42.
91. **Sippel A., Heim E.** “Chemiefasern”, №11, v.116, 1961
92. **Богдановф, Дж.** Вероятностные модели накопления повреждений/ Дж. Богдановф, Ф.Козин.– М.: Мир, 1989.– 245 с.
93. **Седякин, Н.М.** Об одном физическом принципе теории надёжности/ Н.М. Седякин // Изв. АН СССР, Техническая кибернетика.– 1966.– №3.– С.80–87.

94. Методические рекомендации по выбору показателей параметрической надежности. – М.: Ин-т машиноведения и госстандарт, 1987. –122 с.
95. **Джонсон, Н.** Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Т.2: Методы обработки данных / Н. Джонсон, Ф. Лион.– М.: Мир,1980.–610 с.
96. **Ольшанский, В.И.** Математическое моделирование при решении некоторых задач теории параметрической надежности / В.И. Ольшанский, И.Е. Андрушкевич, А.А. Кузнецов // Тез. докл. XXX науч.–техн. конф. преп. и студ ВГТУ/ ВГТУ. – Витебск, 1998.–С.17.
97. Обеспечение надежности и экологической безопасности пароконпрессионных установок / В.И.Ольшанский, А.И. Ольшанский, А.А. Кузнецов и др. // Сб. ст. Междунар. науч.–техн. конф. “Новые ресурсосберегающие технологии и улучшение экологической обстановки в легкой пром–сти и машиностроении”/ ВГТУ. – Витебск,1999. –С.107-111.
98. Обеспечение экологической безопасности теплонагревательных установок при эксплуатации / В.И. Ольшанский, А.И. Ольшанский, А.А. Кузнецов и др. // Сб. докл. Междунар. науч.–техн. конф. “Новые ресурсосберегающие технологии и улучшение экологической обстановки в легкой пром–сти и машиностроении”/ ВГТУ. – Витебск,1998. – С.142-144.
99. **Кузнецов, А.А.** Параметрический принцип оценки показателей качества текстильных материалов/ А.А. Кузнецов // Сб. науч. ст. аспирантов ВГТУ. / ВГТУ. –Витебск, 2000. – С.68–72.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

Массивы координат кривых растяжения текстильных волокон [66]

Текущее значение относительного удлинения волокна ϵ , %	Текущие значения напряжения σ , ($\cdot 10^7$) Па			
	хлопковое	льняное (э.в.)	тонкая шерсть	шелк (коконная нить)
0	0	0	0	0
1	6	14	3	8,5
2	13	38	5	13
3	18	75	7	15,5
4	24		8,5	18
5	36		9,2	22,5
6			9,5	24,5
7			10	26
8			10	27,8
9			10,2	30
10			10,2	32,5
11			10,8	35
12			11,2	37
13			11,6	38
14			12	39,5
15			12,2	40,7
16			12,2	
17			12,4	
18			12,4	
19			12,6	
20			12,8	
21			12,8	
22			13	
23			13,1	
24			13,2	
25			13,4	
26			13,8	
27			13,8	
28			14,4	
29			14,6	
30			14,8	
31			15	
32			15	
33			15,2	
34			15,4	
35			16	
36			16,4	
37			17,2	
38			17,8	
39			19	
40			21	
41			24	

Таблица П.2

Массивы координат кривых растяжения текстильных волокон [66]

Текущее значение относительного удлинения волокна ϵ , %	Текущие значения напряжения σ , ($\cdot 10^7$) Па			
	вискозное уп- рочненное (э.н.)	вискозное обыкновенное (э.н.)	ацетатное	лавсановое
0	0	0	0	0
1	12	3	3,5	9
2	17	5	6	13,8
3	21	7	8	16,1
4	24	9,5	10,5	19,6
5	26	12	12	23,1
6	28	14	13,7	27,7
7	30	16	15	32,3
8	33	17,5	16	35,7
9	36,5	18,5	17	38,6
10	39	20,5	17,5	41,5
11	44	21,7	18	43,8
12	48 ($\epsilon_p = 11,8\%$)	23,4	18,5	45,5
13		24,7	19	47,2
14		26	19,2	48,4
15		27	19,5	49,6
16			20	50,2
17			20	50,7
18			20	52,1
19			20	53,2
20			20,2	54,4
21			20,2	55
22			20,2	
23			20,2	
24			20,2	

Таблица П.3

Массивы координат кривых растяжения для текстильных нитей [66]

Текущее значение относительного удлинения нити ϵ , %	Текущие значения напряжения σ , ($\cdot 10^7$) Па						
	хлопчатобумажная кардная пряжа 25 текс	льняная пряжа 70 текс сухого прядения	шерстяная гребенная пряжа 40 текс	шелк-сырец 2.5 текс	вискозная обыкновенная нить 25 текс	вискозная упороченная нить 9 текс	ацетатная комплексная нить 11 текс
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1,2	6,2	2,5	16	6	9,5	2,69
2	2,6	13,2	4	22	9	12,5	4,68
3	4,5		5	25,3	12	15	6,08
4	6,8		5,8	27,5	13,2	16	7,02
5	9,8		6,3	29,2	14,2	17,5	7,48
6	14,8		6,5	30,8	15	20,7	7,72
7			6,7	32,5	15,4	24	7,95
8				34	15,8	27,5	8,07
9				35	16,2	30	8,19
10				35,8	16,6	33,5	8,31
11				36,6	16,8		8,42
12				37,4	17		8,54
13				38,2	17,2		8,65
14				39	17,4		8,77
15				39,8	17,6		8,89
16				40,4	17,8		9,01
18							9,13
19							9,24
20							9,36

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	5

1.МАСШТАБНЫЙ ЭФФЕКТ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕКСТИЛЬНЫХ НИТЕЙ

7

1.1.Общие сведения о масштабном эффекте прочностных характеристик текстильных материалов	7
1.1.1. Эмпирические методы оценки масштабного эффекта прочност- ных характеристик текстильных материалов	8
1.1.2.Теоретические методы оценки масштабного эффекта прочност- ных характеристик текстильных материалов	12
1.2.Имитационное моделирование масштабного эффекта прочностных характеристик текстильных нитей	19
1.3.Оценка показателей неравномерности прочности по длине текстильной нити	28
1.4.Методика оценки показателей неравномерности прочности текстиль- ных нитей по длине	29
1.5.Типовой расчёт показателей неравномерности прочности тскстильных нитей по длине	31
1.6.Экспериментальная оценка неравномерности прочностных характери- стик текстильных нитей различного сырьевого состава	32

2.ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТЕК- СТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОЛУЦИКЛО- ВОГО ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ

37

2.1.Математическая модель процесса растяжения текстильных материалов ..	44
2.2.Методика оценки параметров математической модели процесса растя- жения по результатам полуциклового испытания на растяжение	50
2.3.Оценка показателей деформационных свойств текстильных материалов по результатам полуциклового испытания на растяжение	53
2.4.Методика оценки показателей деформационных свойств текстильных нитей по результатам полуциклового испытания на растяжение	62
2.5.Типовой расчёт показателей деформационных свойств текстильных нитей	63

3.ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

66

3.1.Обоснование методики исследования показателей, характеризующих механические свойства текстильных материалов	66
3.2.Исследование влияния продольной гетерогенности структуры и меха- нических свойств на прочностные характеристики текстильных мате-	

риалов	68
3.2.1.Имитационная модель процесса деформирования и разрушения одиночной нити (волокна) при полуцикловом испытании на рас- тяжение	68
3.2.2.Исследование влияния продольной гетерогенности механических свойств и структуры на прочностные характеристики одиночной нити	80
3.3.Исследование влияния поперечной гетерогенности структуры и меха- нических свойств на показатели механических свойств текстильных материалов	97
3.3.1.Имитационное моделирование процессов деформирования и раз- рушения пучка нитей при полуцикловом испытании на растяже- ние	97
3.3.2.Исследование влияния поперечной вариации показателей строе- ния и механических свойств на прочностные характеристики пучка нитей (волокон)	107
3.3.3.Оценка степени извитости пучка текстильных нитей (волокон) по результатам полуциклового испытания на растяжение	117
3.3.4.Оценка степени поперечной гетерогенности абсолютного раз- рывного удлинения текстильных нитей (волокон) по результа- там полуциклового испытания на растяжение	122
3.4.Исследование совместного влияния продольной и поперечной гетеро- генности структуры и механических свойств на прочностные характе- ристики текстильных материалов	131
3.4.1.Совмещенная имитационная модель процесса деформирования и разрушения текстильной нити при полуцикловом испытании на растяжение	131
3.4.2.Исследование совместного влияния продольной и поперечной ва- риации показателей структуры и механических свойств на проч- ностные характеристики пучка текстильных нитей (волокон)	138
4.ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ УСТАЛОСТНЫХ СВОЙСТВ ТЕК- СТИЛЬНЫХ НИТЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ	160
4.1.Общие положения о усталостных свойствах текстильных нитей	160
4.1.1.Влияние усталостных свойств текстильных нитей на процессы их переработки	161
4.1.2.Влияние условий проведения испытаний на показатели усталост- ных свойств текстильных нитей	163
4.1.3.Методы оценки и прогнозирования показателей усталостных свойств текстильных нитей	171
4.2.Оценка выносливости текстильных нитей методами математического моделирования	173
4.3.Экспериментальные исследования усталостных свойств текстильных	

нитей различного сырьевого состава	176
4.4.Экспериментальные исследования усталостных свойств текстильных нитей методами математического моделирования	184
4.5.Имитационное моделирование процессов усталостного разрушения текстильных нитей при испытании на многократное растяжение	188
4.6.Апостериорное моделирование усталостного разрушения текстильных нитей при многократном испытании на растяжение	194
5.ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ТЕКСТИЛЬНЫХ НИТЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИСПЫТАНИЯ	204
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	209
ЛИТЕРАТУРА	212
ПРИЛОЖЕНИЕ	221
СОДЕРЖАНИЕ	224

Научное издание

*Кузнецов Андрей Александрович
Ольшанский Валерий Иосифович*

**ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ ТЕКСТИЛЬНЫХ НИТЕЙ**

Редактор Махаринский Е.И.
Технический редактор Калмыкова Е.А.
Корректор Покатович Т.К.

Подписано к печати 1.04.2004. Формат 60×84/16. Уч.–изд. Лист 14,25
Печать ризографическая. Тираж 100. Заказ № 145

Отпечатано на ризографе УО «ВГТУ». Лицензия ЛП № 89 от 18 декабря 2002 г.
210035, Витебск, Московский пр–т, 72