

УДК 677.017

## **СТРУКТУРНАЯ ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ НЕКОТОРЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*А.К. ИЗГОРОДИН, А.П. СЕМИКИН*

*(Ивановская государственная текстильная академия, Краснодарское ЗАО «Югтекс»)*

Большинство характеристик волокон, определяющих их технологичность и эксплуатационные достоинства, обусловлены особенностями структурной организации последних на молекулярном, надмолекулярном, микро- и макромолекулярном уровнях. Это относится к таким свойствам, как прочностные, фрикционные, резистометрические, диэлектрические, сорбционные.

В предлагаемой работе рассмотрены отдельные фрагменты взаимосвязи, особенностей структуры и свойств волокнистых материалов (внимание акцентировано на надмолекулярной организации), а также новые волокна и роль каждого уровня структурной особенности волокон в формировании технологических и эксплуатационных свойств волокнистых материалов\*.

---

\* Данная публикация основана на содержании докладов авторов, заслушанных на III Международном научно-практическом семинаре «Физика волокон и текстильная технология», состоявшемся в Ивановской государственной текстильной академии/май 2000 г.

В [1,2] обоснованно утверждается, что в XXI веке синтетические волокна займут доминирующее положение. По отношению к волокнистым материалам, используемым для технических целей, это утверждение, видимо, правомерно, однако удовлетворение нужд человека в волокнах все-таки будет в значительной мере обеспечено путем использования натуральных волокон.

Хлопок [3], являющийся стратегическим сырьем, по объемам производства сейчас не уступает химическим волокнам; и он, и химические волокна составляют основу волокнистой массы, используемой человечеством.

В настоящее время наиболее изучены структурные особенности и свойства химических волокон. При их получении в процессе разработки соответствующих составов и технологических процессов, удалось научиться управлять и структурой, и, как следствие, их свойствами [4]. Наряду с совершенствованием волокон широкого спектра применения (волокна второго поколения) появились суперволокна (третье поколение) и ведутся разработки волокон со специфичными функциональными свойствами (четвертое поколение). Для суперволокон (кевлар, дайнема, армос, вектран, СВМ и других) характерны очень высокая прочность (до 2 ГПа) и сверхвысокий модуль (до 100 ГПа). Структура этих волокон отличается значительной степенью кристалличности – около 80%. Высокая степень вытяжки, спонтанное упорядочение структурных элементов, в том числе в жидкокристаллическом состоянии, отличает сверхтонкие (до 0,001 текс) волокна и волокна с микрокапсулами термотропных жидких кристаллов. Получаемые из таких волокон ткани изменяют цвет при разном освещении и температуре,

обладают повышенными комфортными свойствами.

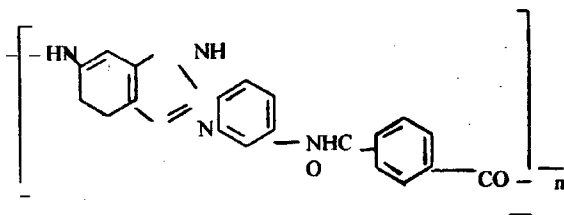


Рис. 1

Волокна, содержащие пленкоподобные структурные элементы и воронкообразные поры, создают в ткани глубокие и яркие тона. Ряд специфичных свойств: огнезащитных, резистометрических, сорбционных, оптических, термостабильных и даже сверхпроводящих можно придать волокнам путем физического модифицирования. Например, в ВНИИПВ (г.Мытищи) и МГТУ им. А.Н. Косыгина (г.Москва) получены хорошие результаты при изменении структуры волокон на основе гетероциклического полиамида (ПАБИ), имеющих элементарное звено, изображенное на рис. 1 [5,6]. Основным условием получения специфичных свойств, в том числе сверхпроводимости, при введении в волокна наполнителей, как это установлено в [5,6], был соответствующий уровень ориентации надмолекулярных структурных элементов и упорядоченности водородных связей. Структурные изменения, протекающие при наполнении и вытяжке волокон, обуславливают существенные изменения их характеристик прочности (табл. 1 – прочность ПАБИ нитей при зажимной длине 30 мм [5,6]).

Виды наполнителя	Содержание наполнителя, %	Показатели исходных нитей		Прочность нитей после деформирования, МПа			
		прочность, МПа	удлинение, %	0	50%	100%	120%
Оксиды редкоземельных металлов	0	2800...2850	3.8				
	6.0	1720...1780	3.2				
	18.0	1210...1320	2.7				
	29.0	1300	2.5				
	48.0	900...1100	2.3				
	88.0	150...250	1.3				
Керамика, обладающая высокотемпературной проводимостью	0			300	750	805	1100
	66			-	500	580	-
	90			150	280	300	360

Как видно из табл. 1, структурные изменения, связанные с введением в нити мелкодисперсного порошка до 88 %, обуславливают снижение прочности и деформационных способностей нитей в 14 и 3 раза соответственно. При этом изменяется механизм разрушения. Как следует из фрактографических исследований, исходные волокна разрушаются в такой последовательности: смещение микрофибрилл и фибрилл друг относительно друга; разрушение расщепленных микрофибрилл и фибрилл. Такой ход процесса разрушения является естественным, так как межмолекулярные и межфибриллярные связи менее прочны в сравнении с внутримолекулярными: энергия активации разрыва межмолекулярных связей составляет 4...40 кДж/моль, а внутримолекулярных 190...320 кДж/моль [7].

В случае введения в волокно большого количества наполнителя, [5,6] частички наполнителя образуют «жаркас», соприкасаясь друг с другом. Силы взаимодействия между атомами матрицы и атомами введенных в волокно частиц наполнителя для рассмотренных в табл.1 нитей оказались ниже сил как внутри, так и межмолекулярного взаимодействия полимера. Так, проч-

ность наполненных нитей ПАБИ снижается почти в 20 раз при увеличении доли наполнителя до 88% (табл. 1). Приведенная интерпретация закономерности разрушения наполненных нитей ПАБИ не противоречит исследованиям [8,9].

При вытягивании волокон, как известно, наиболее существенные изменения происходят в надмолекулярных образованиях. При этом, как следует из табл. 1, нити, наполненные частичками высокотемпературного сверхпроводника, становятся более прочными. Так, если ввести в нить ПАБИ 90% частичек керамики, обладающих высокотемпературной сверхпроводимостью, и растянуть эту нить на 120%, то прочность нити возрастает со 150 до 360 МПа (табл. 1), то есть прочность наполненной на 90% и растянутой нити оказывается выше прочности нити без наполнителя (300 МПа, табл. 1), которая не была подвержена вытягиванию.

Интересная зависимость прочности волокон от кристаллографической анизотропии выявлена в [10], где прочность разных по природе волокон сопоставлена с показателем удельной магнитной анизотропии  $\Delta\chi$  (табл.2).

Волокна	Показатель удельной магнитной анизотропии $\Delta\chi=(\chi_{\parallel}-\chi_{\perp})\cdot 10^6 \text{ см}^3/\text{г}$	Удельная разрывная нагрузка, сН/текс
Хлопок	0,94	18,3
Вискоза	1,6	25,1
Шелк-сырец	1,66	29,1
Полиэфир	1,70	53,8
Параполиамидное с гетероциклами (СВМ)	5,94	214,6

Приведенные в табл.2 значения удельной магнитной анизотропии определяются кристаллографической анизотропией. Величина  $\Delta\chi$ , в частности, взаимосвязана со значением функции ориентации; рост значения  $\Delta\chi$  сопровождается увеличением удельной разрывной нагрузки волокон. Если считать, что удельная магнитная анизотропия определяется в основном кристаллографической анизотропией, то действием этого фактора нельзя объяснить изменение прочности волокон. Их прочность определяется, главным образом, аморфными зонами, являющимися более слабым звеном. Возможно, что существенные изменения диамагнитной восприимчивости вдоль макромолекул и перпендикулярно их хребту связаны с изменением электронной плотности и частоты прецессии электронных орбит в указанных направлениях. Если это предположение верно, то внешними магнитными полями можно существенно влиять на прочностные характеристики волокон.

В работах СПбГУТД (г. Санкт-Петербург) [11...14] найдены пути управления структурной организацией различных видов волокон и посредством этого изменения соответствующим образом свойств этих волокон. Полученные результаты положены в основу оптимизации технологических процессов переработки волокнистых полуфабрикатов. Изменений структуры волокон в [11...14] достигали с помощью использования термических и

радиационных воздействий, а также электромагнитных волн в виде лазерного излучения. При исследовании указанных выше воздействий в [11...14] установлены механизмы видоизменения структуры различных групп волокон. Получив возможность управлять структурой волокон, авторы разработали технологические процессы модификации терлон и ПАН волокон, а также ПКА пленок. Модифицированные волокна оказались более прочными, обладающими повышенной устойчивостью к различным воздействиям, например термическим. Повышение интенсивности технологических процессов обработки волокон позволило сократить их длительность, а некоторые технологические переходы удалось совместить.

В работах ИГХТУ (г. Иваново) [15...16] исследовались волокна хлопчатника. При использовании рентгеновского дифрактометра определено фазовое состояние и параметры кристаллитов целлюлозы разных модификаций: целлюлозы I, целлюлозы II и целлюлозы III.

В табл. 3 приведены результаты исследований [15...16] при мерсеризации и обработке в жидком аммиаке хлопка. Видно, что оптимальный состав гидроксида натрия (15%) позволяет обеспечить реализацию процесса мерсеризации и при этом добиться повышения прочности нитей на 6...10%.

Вид и условия обработки		Содержание модификаций, %		Степень кристалличности, %	Прочность нитей, ткани, %
		целлюлоза I	целлюлоза II целлюлоза III		
Исходное состояние		100	0/0	74.5	100
Мерсеризация	15 %	56,2	<u>43,8</u> 0	66,5	106-110
Водный раствор	18 %	29,4	<u>70,6</u> 0	63,4	-
гидроксида натрия концентрацией:	20 %	18,1	<u>81,9</u> 0	61,9	-
Обработка в жидком аммиаке длительностью:	1с	9,3	<u>0</u> 90,7	53,4	-
	3с	0	<u>0</u> 100	50,7	-

В [17...20] при изучении особенностей надмолекулярной структуры и микроструктуры льна сформулированы условия, при которых хорошо реализуются процессы прядения и сушки льняного волокна. В частности, льноволокно обладает хорошими прядомыми свойствами, если в нем содержание гемицеллюлозы превышает 9%, содержание лигнина составляет 2,5...3%, а

одревеснение срединных пластинок равно не более 20%. В названных работах представлены температурная и масштабная зависимости прочности и относительной деформации льноволокна (рис. 2), используемые при разработке процессов механической технологии и сушки льноволокна.

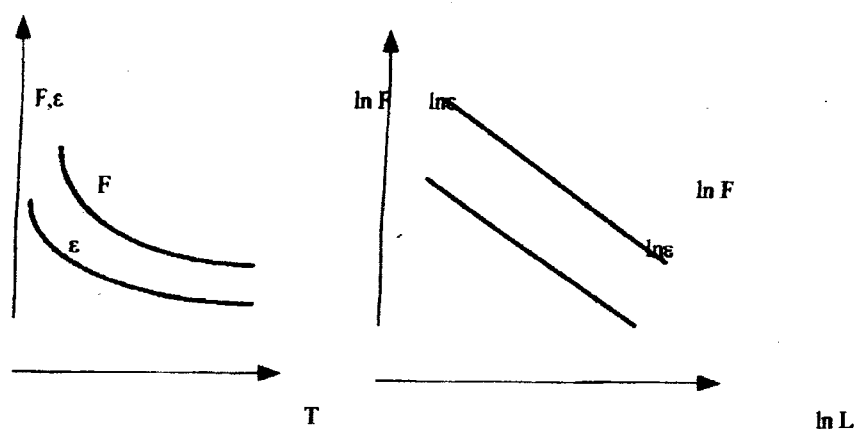


Рис. 2

В исследованиях, проведенных в ИГТА (г. Иваново) и ЗАО «Югтекс» (г. Краснодар) на основе анализа особенностей характеристик структур молекулярного и надмолекулярного уровней с использованием инфракрасной (ИК) спектроскопии, рентгеноструктурного анализа, оптических

методов исследования и комплекса методов определения физических свойств проведен анализ волокон кубанского и узбекского хлопчатников. Выявлены их особенности с точки зрения технологичности волокон и изменения, происходящие в результате различных внешних воздействий.

Таблица 4

Вид хлопка и состояние		Параметры полос								Отношение интенсивностей полос	
		3640...3000		3000...2760		1460		1430		$\frac{1320}{1370}$	$\frac{1430}{900}$
		интенсивность 1.%	полуширина $\Delta, \text{см}^{-1}$	I	$\Delta$	I	$\Delta$	I	$\Delta$		
Кубанский	исходный	37	410	16,5	100	2,5	15	4,5	15	0,78	1,8
	из пряжи	29,5	400	15	110	7,0	30	7,5	18	0,92	2,1
Узбекский	исходный	27	380	13,0	120	9,0	30	7,5	20	0,87	1,98

В табл. 4 представлены некоторые результаты обработки ИК-спектров, полученных на спектрофотометре Specard-M80. Анализ характеристических полос проведен в соответствии с рекомендациями, полученными в [21...23]. Из табл. 4 следует, что в высокочастотной области  $3640...3000 \text{ см}^{-1}$  и  $3000...2760 \text{ см}^{-1}$  интенсивность полос поглощения у кубанского хлопка значительно выше, чем у узбекского. Отношение интенсивностей полос  $3640-3000 \text{ см}^{-1}$  кубанского и узбекского хлопка составляет почти 1,4, а полуширина обоих видов хлопка практически одинакова – отношение полуширин составляет 1,08. На частотах же  $3000-2760 \text{ см}^{-1}$  интенсивность пика у кубанского хлопка более высокая при меньшем значении полуширины.

Анализ табл. 4 показывает, что указанные выше отношения больше для узбекского хлопка, то есть в соответствии с [22,23] кристалличность, а значит и упорядоченность структурных элементов, должна быть выше у узбекского хлопка. Поскольку судить о степени кристалличности

по данным ИК-спектроскопии проблематично [22], а параметры надмолекулярных образований определить невозможно, для выяснения ситуации необходимо непосредственное измерение параметров надмолекулярной структуры. Единственным методом, позволяющим без какого-либо нарушения структуры волокон определить параметры кристаллитов, является рентгеновский.

Рентгеноструктурный анализ проведен на установке УРС-2,0, а также дифрактометре ДРОН-3. Источником излучения служила медная рентгеновская трубка, излучение  $K_{\alpha}$  выделяли никелевым фильтром. Волокна при съемке располагали перпендикулярно рентгеновским лучам. По рентгенограммам и дифрактограммам определены углы, соответствующие максимумам  $2\theta$ , полуширина пиков  $\beta$ , угол разориентировки  $\alpha$ , размер кристаллитов  $D$ , ориентация аморфных зон, функция ориентации  $f$ . Размер кристаллитов определяли по методу Дебая:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta},$$

где  $K$  – константа;  $\lambda$  – длина волны излучения.

Угол разориентации находили путем проведения съемки волокон под разными углами до снижения интенсивности, соответствующей рефлексу (040), до нуля. Функцию ориентации вычисляли по формуле

$$f = \frac{3(\cos^2 \alpha)_{\text{ср}} - 1}{2},$$

где  $\alpha$  – угол между соответствующим кристаллографическим направлением и осью волокна. Среднее значение квадрата косинуса угла  $\alpha$   $(\cos^2 \alpha)_{\text{ср}}$  находили из соотношения

$$\cos^2 \alpha = \frac{\int_0^{\pi/2} I(\alpha) \cos^2 \alpha \sin \alpha d\alpha}{\int_0^{\pi/2} I(\alpha) \sin \alpha d\alpha} =$$

$$= \frac{\sum_0^{\pi/2} I(\alpha)_i \cos^2 \alpha_i \sin \alpha_i}{\sum_0^{\pi/2} I(\alpha)_i \sin \alpha_i}.$$

Ориентация аморфных зон у кубанского хлопка оказалась более совершенной, так как нормированная интенсивность аморфного галло на дифрактограммах этого хлопка в 1,25 раз больше, чем у узбекского. В табл. 5 приведены отдельные характеристики дифракционных максимумов (040) и (002).

Таблица 5

Вид волокна и состояние		Параметры максимумов (002) и (040)				Функция ориентации	Угол разориентировки, град
		$2\theta_{002}^{\circ}$	$\beta_{002}^{\circ}$	$2\theta_{040}^{\circ}$	$\beta_{040}^{\circ}$		
Кубанский	исходный	22,72	1,93	34,65	1,38	0,661	32,8
	из пряжи	22,72	1,95	34,64	1,40	0,648	33,4
	запаривание 10с	22,69	1,93	34,63	1,38	0,657	-
	после плазмы	22,74	1,94	34,63	1,42	0,644	33,7
Узбекский	исходный	22,55	1,87	34,45	1,34	0,65	30,5
	из пряжи	22,55	1,91	34,50	1,40	0,66	32,5
	запаривание 10с	22,56	1,91	34,40	1,30	0,66	-

Как видно, значения углов  $2\theta$  для волокон с Кубани на  $0,2^{\circ}$  больше в меридиональном направлении и одинаково в экваториальном по сравнению с узбекскими волокнами. Полуширина пиков у кубанского хлопка выше в сравнении с узбекским на  $0,07^{\circ}$  для исходных (из кипы) волокон. Последний факт является следствием уменьшения размеров кристаллитов у волокон кубанского хлопчатника и (или) более высокой дефектности кристаллитов в этом хлопке. Кристаллиты кубанского

хлопка хуже сориентированы относительно оси волокна, поскольку им соответствует более высокое значение угла разориентировки – на  $2,3^{\circ}$  в исходном состоянии (табл.5).

При сопоставлении приведенных данных рентгеноструктурного анализа с результатами ИК-спектроскопии находит подтверждение предположение о более высокой упорядоченности аморфных зон в волокнах кубанского хлопка по сравнению с узбекским и о более низком совершенст-

ве кристаллитов в кубанском хлопке. При запаривании до 10с практически неизменными остаются все параметры надмолекулярной структуры. При увеличении времени запаривания до 30с наблюдается существенный рост кристаллитов и функции ориентации. После воздействия низкотемпературной плазмы рентгеновским методом обнаружено только возрастание угла разориентировки кристаллитов и соответственно снижение значения функции ориентации. Низкотемпературная плазма, как это следует из [24...26], при умеренных режимах обработки оказывает воздействие только на поверхность волокон.

Интегрально степень кристалличности и совершенство кристаллов, а также их ориентацию относительно оси волокон оценивали оптическим методом, путем определения показателя двулучепреломления [27...28]. В настоящей работе показатель двулучепреломления определен интерференционным и иммерсионным методами. Интерференционный метод позволяет оценивать структурную организацию внутри волокна, так как поверхностные зоны занимают очень маленький объем. Иммерсионной средой служила смесь ксилол +  $\alpha$ -бромнафталин. Показатели преломления иммерсионной среды изменяли с шагом 0,002 и определяли рефрактометрически.

Таблица 6

Вид волокна и состояние		Показатели преломления		Показатель двулучепреломления	
		$n_e$	$n_0$	интерференционный	иммерсионный
Кубанский	исходный	1.573	1.527	0,050	0,046
	из пряжи	1.573	1.529	0,049	0,044
	запаривание 10с	-	-	0,051	0,048
Узбекский	исходный	1.569	1.526	0,046	0,043
	из пряжи	1.567	1.528	0,043	0,039
	запаривание 10с	-	-	0,047	0,041

Результаты исследований оптическим методом представлены в табл. 6. Показатели преломления обыкновенного луча ( $n_0$ ) у сравниваемых волокон практически одинаковы. Величина показателя преломления необыкновенного луча ( $n_e$ ) на 0,04 больше у кубанского хлопка, что при меньшем совершенстве кристаллитов у этого вида хлопка, как видно из табл. 5, может быть следствием лучшей упорядоченности структурных элементов в аморфных зонах. Об этом же свидетельствует более высокое (на 0,003...0,006) значение показателя двулучепреломления для волокон хлопчатника с Кубани.

У обоих видов хлопка показатель двулучепреломления, определенный интерференционным методом, больше на 0,003...0,006 в сравнении с иммерсионным

методом (табл.6). После механической обработки волокон, то есть волокон, взятых из пряжи, показатель двулучепреломления снижается, причем у узбекских волокон это снижение значимо (табл.6). Снижение значения  $n_e - n_0$  после механической обработки согласуется с данными рентгеноструктурного анализа (табл.5) о возрастании разориентации кристаллитов в волокнах из пряжи в сравнении с волокнами из кипы. При запаривании волокон до 10с наблюдается тенденция роста показателя двулучепреломления (отличие  $n_e - n_0$  находится в пределах ошибки).



Вид волокна		Модуль упругости, ГПа	Прочность, сН	Удельное электрическое сопротивление, Ом·10 <sup>-6</sup>	Модуль деформирования, ГПа	Относительное удлинение, %	Коэффициент тангенциального сдвига
Кубанский	исходный	20,2	4,3	79	3,5	8,1	0,28
	запаривание 10с	-	4,9	1,26	2,5	9,1	0,37
	после плазмы	20,4	4,7	3,25	3,5	7,7	0,48
Узбекский	исходный	22,1	4,1	65	3,7	7,8	0,24
	запаривание 10с	-	4,6	1,38	2,7	10,5	0,36
	после плазмы	22,2	4,5	4,25	3,7	7,3	0,44

Представленные в табл. 7 отдельные данные о физико-механических свойствах волокон с Кубани и из Узбекистана иллюстрируют тот факт, что свойства волокон являются структурно обусловленными. Причем в ряде случаев нужно учитывать не только особенности надмолекулярных образований, но и структуры молекулярного уровня. Так, более высокое значение модуля упругости у узбекских волокон связано с повышенным совершенством у них кристаллитов. А большее значение прочности и удельного электрического сопротивления у волокон с Кубани связано с более высокой упорядоченностью в аморфных зонах различных групп атомов у этих волокон.

Повышенная прочность кубанского хлопка еще раз подтверждает тот факт, что эта характеристика волокон определяется в значительной мере аморфными зонами.

Данные о влиянии низкотемпературной плазмы на свойства волокон свидетельствуют о нескольких обстоятельствах: плазма существенно изменяет состояние поверхности; особенности поверхности волокон оказывают значительное влияние на многие их свойства; поверхностные зоны, на которые воздействует плазма, много меньше внутреннего объема волокна. Малостью приповерхностных слоев, изменяющихся под воздействием плазмы, объясняется неизменность структуры волокон в целом, выявленная рентгеновским мето-

дом. О существенном изменении свойств, зависящих от состояния поверхности, можно судить по изменению характеристик, представленных в табл.7, откуда следует, что после обработки в низкотемпературной плазме почти на 10% возрастает прочность волокон, в 25 раз снижается удельное поверхностное электрическое сопротивление, в 1,7 раза возрастает коэффициент тангенциального сдвига при движении волокна по волокну. Свойства же, определяемые всем объемом волокон, при этом остаются практически неизменными, например модули Юнга и деформирования (табл.7).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Hehn, Sajewicz J.* // Architectura Tekstyliow. – N 1, 2, 1999. S. 18...20.
2. *Кричевский Г.Е.* Основные тенденции в теории и практике отделочного производства // Текстильная химия. – 1995, № 1. С. 31...36.
3. *Касьяненко А.Г. и др.* Хлопководство России. – Краснодар: ЗАО «Югтекс», 1999.
4. *Tatsuya Hongu, Glun O. Phillips.* New Fibres. Cambridge, 1997.
5. *Щетинин А.М. и др.* // Химические волокна. – 1998, № 6. С. 3...14.
6. *Френкель Г.Г. и др.* // Химические волокна. – 1998, № 6. С. 14...18.
7. *Перепелкин К.Е.* Структура и свойства волокон. – М: Химия, 1985.
8. *Андреев А.С. и др.* Анизотропия свойств армирующих химических волокон и особенности их разрушения в комплексных материалах // Тез. докл. IV Всесоюз. конф. по механике полимерных и композиционных материалов. – Рига, 1980. С. 7.

9. Курземникс А.Х., Олдырев П.П., Тануж В.П. // Механика композиционных материалов. – 1981, № 5. С. 918.
10. Федотов С.И. // Химические волокна. – 1990, № 6. С. 23.
11. Тараканов Б.М. Термическая, лазерная и радиационная обработка волокон и нитей с целью модификации структуры и свойств: Дис... докт. техн. наук. – СПб., 1995.
12. Тараканов Б.М. // Химические волокна. – 1993, № 1. С. 22...24.
13. Платонова Н.В. и др. Структурные изменения в хлопке, подвергнутом гамма-облучению // Тез. докл. VII Всесоюз. конф. по физике и химии целлюлозы. – Минск: Изд-во института физики АНБССР, 1990. С. 155.
14. Тараканов Б.М., Андреева О.А. // Высоко-механические соединения. – 1990, № 10. Т.А.32. С. 2405...2411.
15. Завадский А.Е., Мельников Б.Н. // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 1983. Т. 29, вып. 9. С. 76...80.
16. Завадский А.Е., Мельников Б.Н. // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 1986. Т. 29, вып. 12. С. 79...82.
17. Перепелкин К.Е. и др. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1996, № 6. С. 17...22.
18. Перепелкин К.Е. // Химические волокна. – 1991, № 2. С. 44...56.
19. Иванов А.Н., Муравицкая Т.П. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1984, № 6. С. 17...20.
20. Иванов А.Н. и др. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1984, № 6. С. 17...20.
21. Жоговин З.А. Химия целлюлозы. – М.: Химия, 1972.
22. Жбанков Р.Г. и др. Спектроскопия хлопка. – М.: Наука, 1976.
23. O'Connor R.T. Du Pre ET Mitcham D. Text. Rest. – 1958, 28. 328.
24. Максимов А.И. Теория и практика плазмо-химической обработки тканей и пленок. – Иваново: Ивановская областная организация общества «Знание», 1990.
25. Максимов А.И., Гоберг Б.Л., Титов В.А. // Текстильная химия. – 1992, №1. С. 101...117.
26. Изгородин А.К. и др. Изменение структуры и свойств волокон кубанского хлопка при воздействии низкотемпературной плазмы // Тез. докл. II Междунар. конф: «Химия 99». Иваново: Институт химии растворов РАН. 1999. С. 206.
27. Мереди Р., Хирл Дж.В.С. Физические методы исследования материалов. – М.: Гизлегпром, 1963.
28. Шабнягин И.В. Оптические методы в химии и технологии получения волокон и изучения их свойств // Межвуз. сб. научн. тр. – М.: Текстильная академия, 1992. С. 3...10.

Рекомендована кафедрой физики ИГТА. Поступила 06.04.01.