

## **ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПАКЕТА МАТЕРИАЛОВ БОЕВОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНОГО К МНОГОЦИКЛОВОМУ ТЕПЛОВОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ**

***А.М. Гусаров, А.А. Кузнецов, Н.М. Дмитракович***

Боевая одежда пожарных (далее БОП) является основным и самым массовым по применяемости средством индивидуальной защиты пожарных. Она используется при тушении любых пожаров. Во время эксплуатации БОП испытывает различные внешние воздействия: тепловые и механические, воды и агрессивных сред, а также климатические воздействия, которые приводят к старению материала, то есть к необратимым изменениям структуры его волокон и ухудшению их свойств. Эти изменения обусловлены реакциями деструкции (разрывом химических связей, распадом полимерной цепи) и структурирования (сшиванием макромолекул, образованием поперечных химических связей между макромолекулами). Изменения структуры и свойств волокон непременно приводят к изменению физико-механических и теплофизических свойств материала [1, 2].

Нормативные требования к показателям теплофизических и физико-механических свойств пакета материалов и материала верха БОП [3] указаны для одноциклового воздействия. Однако в процессе эксплуатации БОП фактически сталкивается с многократно повторяющейся нагрузкой: тепловые и механические воздействия, действие воды и агрессивных сред, климатические воздействия и др. Таким образом, нормативные требования к показателям теплофизических и физико-механических свойств материалов БОП служат только мерой качества изготовления и не могут быть использованы для оценки эксплуатационных свойств.

Комплексный мониторинг изменений защитных свойств боевой одежды пожарных в процессе ее эксплуатации отсутствует. Согласно СТБ 1971 – 2009 [3] срок службы БОП – не менее двух лет от даты начала применения. В ходе эксплуатации после окончания аварийно-спасательных работ БОП подвергается внешнему осмотру и ремонту: БОП с незначительными повреждениями верхнего слоя (общей площадью до 0,8 дм<sup>2</sup>) ремонтируют в условиях пожарной части с использованием ремонтного комплекта, если БОП имеет значительные повреждения – дальнейшая ее эксплуатация запрещена.

Однако использование только визуального контроля неизбежно влечет за собой субъективность оценки показателей, определяющих качество материалов, и как следствие, невозможность достоверно и объективно оценить эффективный срок их эксплуатации. К. Slater в работе [4] отмечает, что уровень разрушения текстильного материала не может быть напрямую связан с визуальными индикаторами повреждения ткани. На рисунке 1 представлена схематическая зависимость любого показателя качества текстильного материала, например разрывной нагрузки или устойчивости к воздействию теплового потока, от времени эксплуатации [4].

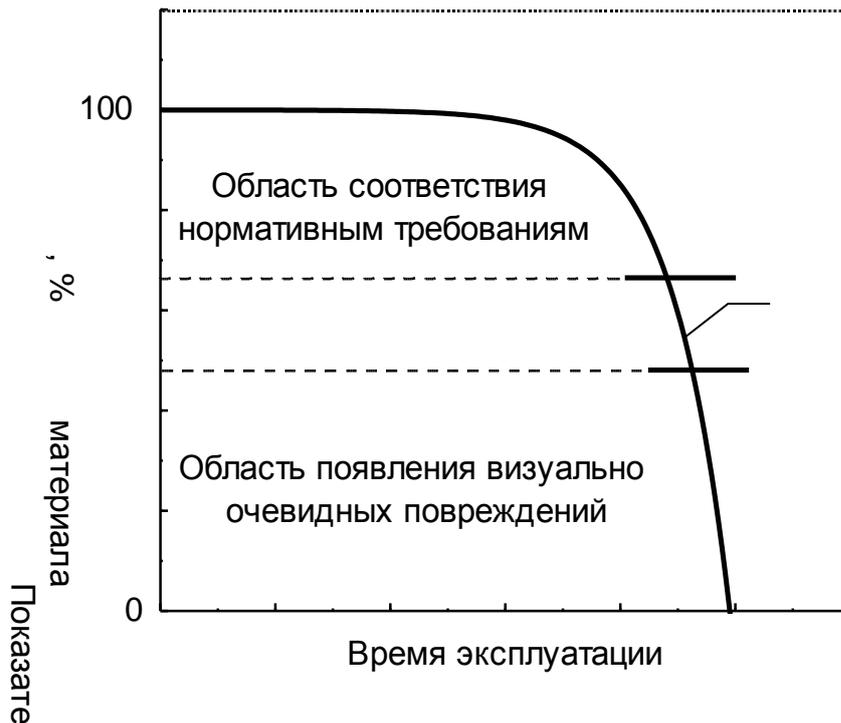


Рисунок 1 – Схематическая зависимость любого показателя качества текстильного материала от времени его использования [4]

Анализ зависимости, представленной на рисунке 1, указывает на то, что значения показателей качества текстильного материала в процессе его эксплуатации становятся ниже нормативных требований прежде, чем появляются визуально очевидные повреждения ткани (область 1). Это указывает на потребность в расширенном визуальном осмотре или других не визуальных методах выявления степени разрушения материала [5].

Комплексная оценка показателей теплофизических и физико-механических свойств материалов БОП при воздействии различных эксплуатационных факторов (многократные тепловые и механические воздействия, действие воды и агрессивных сред, климатические воздействия и др.) позволит выявить резервы их эксплуатационной надежности, прогнозировать эффективный срок службы и, соответственно, повысить надежность и конкурентоспособность БОП.

Для исследования влияния многоциклового воздействия тепловых потоков различного уровня на теплофизические свойства БОП на базе научно-исследовательского центра Витебского областного управления МЧС проведен ряд экспериментальных исследований.

В качестве объекта исследования использовался пакет материалов, применяемый при изготовлении БОП в Республике Беларусь и состоящий из материала верха («Арселон-С», арт. 09с-368/1 саржевого переплетения, поверхностная плотность  $260 \pm 14 \text{ г/м}^2$ ), водонепроницаемого слоя (мембранный материал ТУ ВУ 300620644.017 – 2008), теплоизоляционной подстежки (ватин полушерстяной холстопршивной, поверхностная плотность  $235 \text{ г/м}^2$ ) и подкладочной ткани (100 % х/б ткань, поверхностная плотность  $140 \text{ г/м}^2$ ). При проведении исследований использовались: установка для определения устойчивости к воздействию теплового потока, приемник теплового потока ПТПО №192, измеритель-регулятор «Сосна-002», термоэлектрический преобразователь ТХА-1199/53, секундомер Интеграл С-01. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.

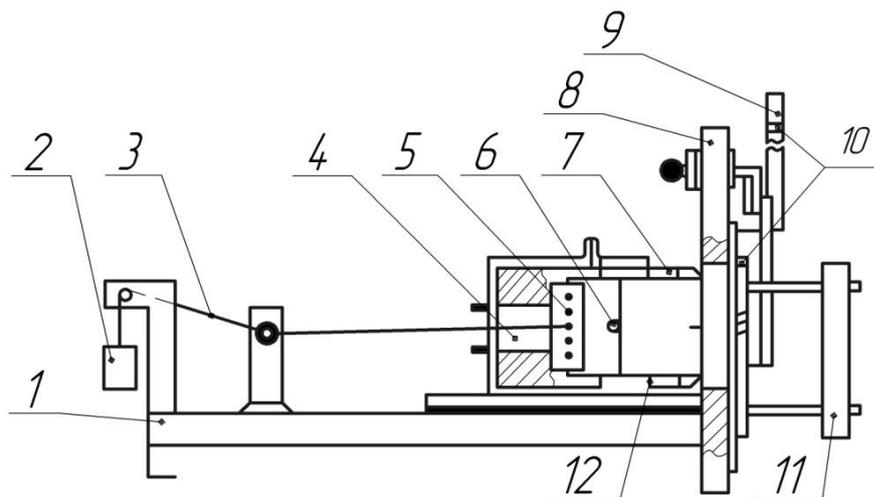


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки:

1 – платформа; 2 – груз; 3 – нити; 4 – датчик измерения плотности теплового потока; 5 – зажим; 6 – термопара; 7 – держатель пробы; 8 – экран; 9 – защитная заслонка; 10 – система охлаждения; 11 – радиационная панель; 12 – проба

Образец пакета материалов размером 210×70 мм подвергался воздействию теплового потока плотностью в диапазоне от 1 кВт/м<sup>2</sup> до 5 кВт/м<sup>2</sup>, действие которого гарантированно не приводит к возникновению видимых признаков деструкции пакета: разрушения наружной поверхности материала верха и внутренних слоев пакета (оплавления, обугливания, прогара); отслоения полимерного покрытия от тканевой основы водонепроницаемого слоя; воспламенения. Продолжительность теплового воздействия составляло 240 секунд. Охлаждение образца продолжалось до достижения начальной температуры на внутренней поверхности образца. После завершения этапа охлаждения образец подвергался повторному тепловому воздействию установленного теплового потока. В процессе проведения исследования регистрировались значения температуры на внутренней поверхности пакета материалов. Для измерения температуры на внутренней поверхности пакета материалов использовался термоэлектрический преобразователь типа ХК (хромель-копель), прикрепленный по центру образца. Для измерения значений плотности теплового потока использовался датчик типа Гордона с диапазоном измерения от 1 кВт/м<sup>2</sup> до 50 кВт/м<sup>2</sup> и погрешностью измерений не более 8 %, данные которого выводились на вторичный прибор с классом точности не менее 0,15.

В результате экспериментальных исследований получены зависимости изменения температуры  $T(\tau)$  на внутренней поверхности пакета материалов от времени в процессе многоциклового (нагрев-охлаждение) теплового нагружения для различной плотности падающего теплового потока. Некоторые результаты исследований представлены на рисунках 3, 4.

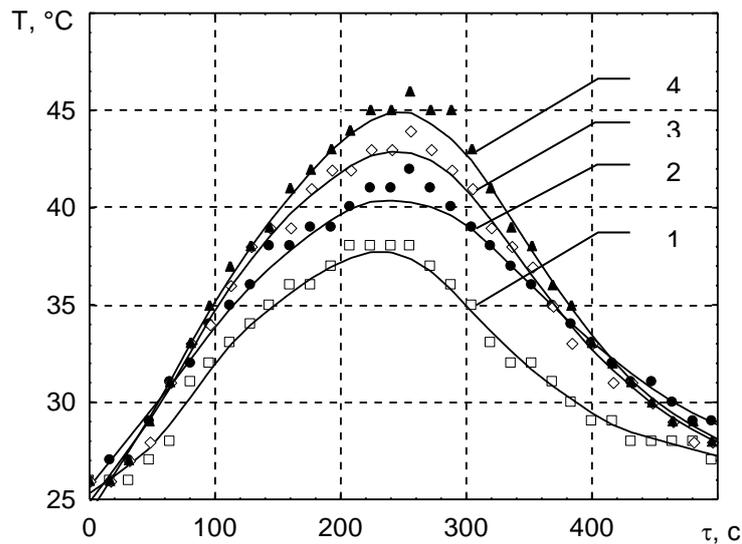


Рисунок 3 – Зависимость температуры на внутренней поверхности пакета материалов  $T$  от времени  $\tau$  при плотности падающего теплового потока  $q_n = 2 \text{ кВт/м}^2$  для различных циклов теплового нагружения: 1 – 1 цикл; 2 – 3 цикл; 3 – 5 цикл; 4 – 10 цикл

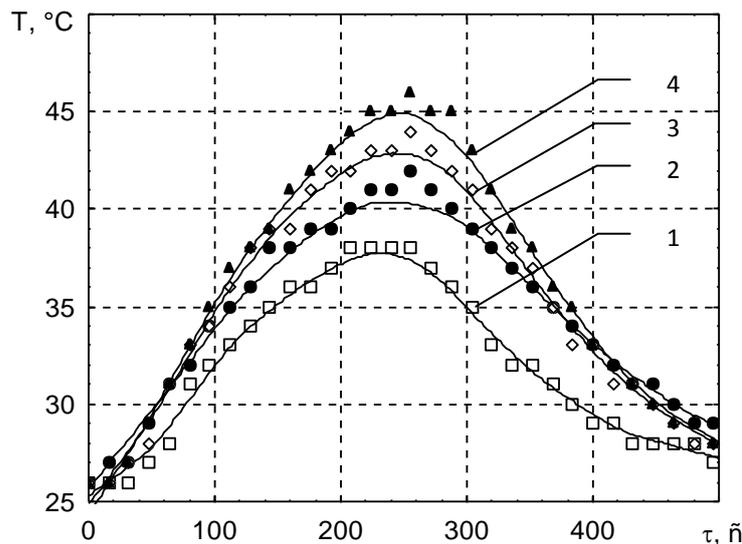


Рисунок 4 – Зависимость температуры на внутренней поверхности пакета материалов  $T$  от времени  $\tau$  при плотности падающего теплового потока  $q_n = 3 \text{ кВт/м}^2$  для различных циклов теплового нагружения: 1 – 1 цикл; 2 – 3 цикл; 3 – 5 цикл; 4 – 10 цикл

Анализ результатов экспериментальных исследований, позволяет отметить, что увеличение плотности падающего теплового потока приводит к закономерному увеличению максимальной температуры на внутренней поверхности пакета материалов для данного диапазона теплового воздействия. На рисунке 5 представлена зависимость максимальной температуры на внутренней поверхности пакета материалов от количества циклов теплового нагружения при различных значениях уровня теплового воздействия.

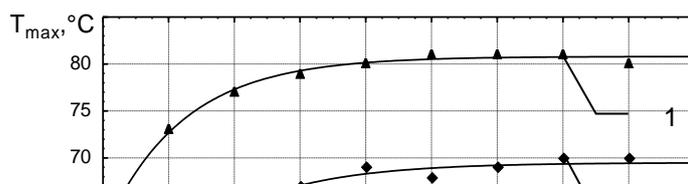


Рисунок 5 – Зависимость максимальной температуры на внутренней поверхности пакета материалов  $T_{max}$  от количества циклов теплового нагружения  $n$  при различных значениях уровня теплового воздействия  $q_n$ :

1 – при  $q_n = 5$  кВт/м<sup>2</sup>; 2 – при  $q_n = 4$  кВт/м<sup>2</sup>; 3 – при  $q_n = 3$  кВт/м<sup>2</sup>, 4 – при  $q_n = 2$  кВт/м<sup>2</sup>

Рост максимальной температуры на внутренней поверхности пакета материалов при многократном тепловом воздействии косвенным образом указывает на изменение теплофизических свойств материалов, приводящих к снижению устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока.

Установлено, что после некоторого количества циклов теплового воздействия в пакете материалов наступает состояние, близкое к устойчивому (стационарному), при котором максимальная температура на внутренней поверхности пакета материалов остается постоянной и практически не зависит от количества циклов теплового воздействия.

Для повышения информативности результатов экспериментальных исследований возникает необходимость в установлении закономерности изменения максимальной температуры на внутренней поверхности пакета материалов от количества циклов теплового нагружения для исследованного диапазона теплового воздействия, что позволит провести анализ экспериментальных результатов не только на качественном, но и на количественном уровне.

В качестве теоретической интерпретации процесса роста максимальной температуры на внутренней поверхности пакета материалов при многократном тепловом воздействии воспользуемся основным физическим принципом теории надежности, сформулированным Н.М. Седякиным [6 – 9].

Применительно к процессу роста максимальной температуры на внутренней поверхности пакета материалов при многократном тепловом воздействии основной физической принцип теории надежности можно сформулировать следующим образом: «Скорость изменения максимальной температуры на внутренней поверхности пакета материалов  $dT_{max} / dn$  не зависит от того, как и за какое время (количество циклов теплового нагружения) она изменилась от некоторого начального значения  $T_0$  до текущего  $T_{max}$  в рассматриваемый момент времени, а зависит от условий проведения испытания и теплофизических свойств материалов».

Запись этого принципа в дифференциальной форме имеет следующий вид:

$$\frac{dT_{max}}{dn} = -M(T_{max} - T_c)^k, \quad (1)$$

где  $M$  – параметр модели, отражающий темп изменения максимальной температуры;

$k$  – параметр модели, принимающий значение 1, 2, ...

Решение дифференциального уравнения (1) при условии  $k = 1$ , учитывая, что минимальное значение  $n$  равно 1, имеет следующий вид:

$$T_{max}(n) = T_c + (T_0 - T_c) \exp[-M(n-1)], \quad (2)$$

где  $T_0$  – максимальная температура на внутренней поверхности пакета материалов на первом цикле теплового нагружения образца, °С;

$T_c$  – максимальная температура на внутренней поверхности пакета при его тепловой стабилизации (тепловая стабилизация пакета – это состояние, при котором максимальная температура на внутренней поверхности пакета материалов остается постоянной и больше не зависит от количества циклов теплового воздействия), °С;

$n$  – количество циклов теплового нагружения, [цикл].

Для определения физического смысла параметра  $M$  модели (2) произведем преобразования:

$$\frac{T_{max}(n) - T_c}{T_0 - T_c} = \exp[-M(n-1)].$$

Если  $M = 1 / (n - 1)$ , то:

$$\frac{T_{max}(n) - T_c}{T_0 - T_c} = \frac{1}{e}.$$

Следовательно, параметр  $M$  имеет размерность [цикл<sup>-1</sup>] и является величиной, обратной количеству циклов теплового нагружения ( $n - 1$ ), по истечении которых текущее изменение максимальной температуры  $T_{max}$  по отношению к максимальной температуре при тепловой стабилизации пакета  $T_c$  меньше предельно возможного значения в  $e$  раз.

Оценка параметров, предложенных в математической модели (2), производилась с использованием программного пакета статистической обработки данных «Statistica for Windows». Численные значения параметров модели (2) в зависимости от плотности падающего теплового потока и соответствующих состоянию тепловой стабилизации пакета материалов сведены в таблице.

Таблица – Параметры модели (2) для расчета максимальной температуры на внутренней поверхности пакета материалов  $T_{max}$  при многоцикловом тепловом нагружении в зависимости от плотности падающего теплового потока при известных значениях  $T_0$

Параметры модели	Плотность падающего теплового потока, кВт/м <sup>2</sup>			
	2	3	4	5
$T_0, °C$	38,0	43,0	49,0	62,0
$T_c, °C$	46,0	55,9	69,5	80,8
$M, \text{цикл}^{-1}$	0,32	0,61	0,71	0,84
Коэффициент детерминации, $R^2$	0,988	0,980	0,992	0,995

По результатам комплекса исследований, основанных на моделировании, установлено:

– увеличение плотности падающего теплового потока  $q_n$  приводит к увеличению максимальной температуры на внутренней поверхности пакета материалов при его тепловой стабилизации  $T_c$  в исследованном диапазоне теплового воздействия;

– максимальная температура на внутренней поверхности пакета материалов при его тепловой стабилизации  $T_c$  прямо пропорциональна плотности теплового нагружения  $q_n$ .

Для определения эффективного количества циклов теплового воздействия, после которых наступает процесс тепловой стабилизации пакета, введем понятие

интенсивности процесса изменения максимальной температуры на внутренней поверхности пакета материалов:

$$I_T(n) = \frac{dT_{max}(n)}{dn} = M(T_c - T_0) \exp[-M(n-1)]. \quad (3)$$

На рисунке 6 представлены зависимости интенсивности процесса изменения максимальной температуры  $I_T$  на внутренней поверхности пакета материалов от количества циклов воздействия теплового потока плотностью от 1 кВт/м<sup>2</sup> до 5 кВт/м<sup>2</sup>.

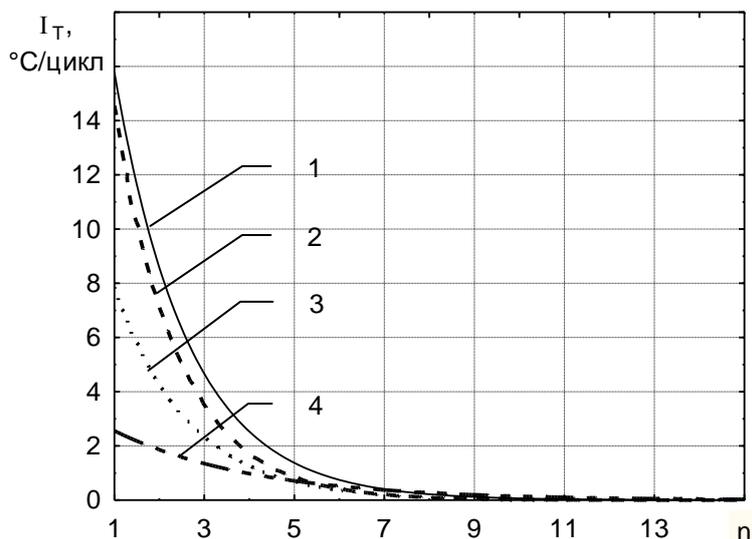


Рисунок 6 – Зависимость интенсивности процесса изменения максимальной температуры  $I_T$  на внутренней поверхности пакета материалов от количества циклов теплового нагружения  $n$  при различных значениях уровня теплового воздействия  $q_n$ : 1 – при  $q_n = 5$  кВт/м<sup>2</sup>; 2 – при  $q_n = 4$  кВт/м<sup>2</sup>; 3 – при  $q_n = 3$  кВт/м<sup>2</sup>, 4 – при  $q_n = 2$  кВт/м<sup>2</sup>

Анализ зависимостей, представленных на рисунке 6, позволяет отметить, что:

- в исследованном диапазоне теплового воздействия увеличение количества циклов нагружения приводит к закономерному снижению интенсивности процесса изменения максимальной температуры  $I_T$  на внутренней поверхности пакета материалов;

- плотность падающего теплового потока  $q_n$  влияет на начальное значение интенсивности процесса изменения максимальной температуры  $I_T$  на внутренней поверхности пакета материалов, однако, начиная с восьмого цикла теплового нагружения, значение интенсивности изменения максимальной температуры  $I_T$  незначительно зависит от уровня падающего теплового потока  $q_n$  ( $I_T(n = 8) = (0,1 - 0,2)$  [°С/цикл] для  $1 \leq q_n \leq 5$  [кВт/м<sup>2</sup>]). Следовательно, изменение теплофизических свойств пакета материалов происходит в течение первых восьми циклов теплового воздействия, а в дальнейшем наступает состояние тепловой стабилизации пакета материалов и, соответственно, устойчивость его теплофизических свойств к многоциклового воздействию теплового потока плотностью от 1 кВт/м<sup>2</sup> до 5 кВт/м<sup>2</sup>.

Использование моделей (2, 3) существенно повышает информативность экспериментальных исследований, позволяет осуществить прогноз значений максимальной температуры на внутренней поверхности пакета материалов при многоциклового нагружении теплового потока в исследованном диапазоне воздействия, а также определить эффективное количество циклов теплового воздействия, после которых наступает процесс тепловой стабилизации пакета.

#### ВЫВОДЫ

В результате проведенного комплекса исследований:

- показано, что нормативные требования к показателям теплофизических и физико-механических свойств материалов БОП служат только мерой качества изготовления и не могут быть использованы для оценки эксплуатационных свойств;
- впервые проведен комплекс экспериментальных исследований, направленных на изучение влияния одного из основных эксплуатационных факторов (многократного теплового воздействия) на теплофизические свойства БОП;
- установлено, что изменение теплофизических свойств пакета материалов происходит в течение первых восьми циклов теплового воздействия, а в дальнейшем наступает состояние тепловой стабилизации пакета материалов и, соответственно, устойчивость его теплофизических свойств к многоциклового воздействию теплового потока в диапазоне от 1 кВт/м<sup>2</sup> до 5 кВт/м<sup>2</sup>;
- разработаны математические модели, которые позволяют осуществить прогноз значений максимальной температуры на внутренней поверхности пакета материалов при многоциклового воздействии теплового потока в диапазоне от 1 кВт/м<sup>2</sup> до 5 кВт/м<sup>2</sup>, а также определить эффективное количество циклов теплового воздействия, после которых наступает процесс тепловой стабилизации пакета.

#### Список использованных источников

1. Фойгт, И. Стабилизация синтетических полимеров против действия света и тепла : пер. с нем. / И. Фойгт ; под. ред. Б. М. Коварской. – Ленинград : Химия, 1972. – 544 с.
2. Перепелкин, К. Е. Закономерности изменения свойств синтетических нитей при термическом старении / К. Е. Перепелкин, И. Ю. Моргоева, И. В. Андреева // Химические волокна. – 2001. – № 1. – С. 45-49.
3. СТБ 1971 – 2009. Система стандартов безопасности труда. Одежда пожарных боевая. Общие технические условия. – Введ. 01.01.2010. – Минск : Госстандарт – НИЦ ВОУ МЧС г. Витебск, 2010. – 36 с.
4. Slater, K. The progressive deterioration of textile materials, I: Characteristics of degradation / K. Slater // Journal of the Textile Institute. – 1986. – Vol. 77, No. 2. – p. 76-87.
5. Thorpe P. Development of non-destructive test methods for assessment of in-use fire fighter's protective clothing // P. Thorpe / M.Sc. Thesis, University of Saskatchewan [Electronic resource]. – 2004. – Mode of access: <http://library2.usask.ca/theses/available/etd-05202004-155351/unrestricted/thorpe-thesis.pdf>. – Date of access: 01.02.2012.
6. Седакин, Н. М. Об одном физическом принципе теории надёжности / Н. М. Седакин // Известия АН СССР, Техническая кибернетика. – 1966. – № 3. – С. 80–87.
7. Смагин, В. А. Физико-вероятностные модели прогнозирования надёжности на основе форсирования испытаний / В. А. Смагин // Надёжность и контроль качества. – 1998. – № 4. – С. 15-23.
8. Смагин, В. А. Теоретическое обобщение физического принципа надёжности профессора Н. М. Седакина / В. А. Смагин // Надёжность. – 2005. – №1. – С. 3-13.
9. Кузнецов, А. А. Оценка и прогнозирование физико-механических свойств текстильных нитей / А. А. Кузнецов, В. И. Ольшанский. – Витебск : УО «ВГТУ», 2004. – 226 с.

*Статья поступила в редакцию 22.03.2012*