

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ БОЕВОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ ПРИ МНОГОЦИКЛОВЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

А.А. Кузнецов

УДК 677.017

РЕФЕРАТ

БОЕВАЯ ОДЕЖДА ПОЖАРНЫХ, МНОГОЦИКЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, СТИРКА, МНОГОКРАТНЫЙ ИЗГИБ И ИСТИРАНИЕ, ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, УСТОЙЧИВОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ПАКЕТА МАТЕРИАЛОВ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Объектом исследования является пакет материалов, используемый при изготовлении боевой одежды пожарных для подразделений МЧС РБ.

Целью данной работы является комплексное исследование степени влияния основных эксплуатационных факторов на теплозащитные свойства боевой одежды пожарных, а также разработка методов соответствующих испытаний.

Установлен характер влияния различных эксплуатационных факторов (механических, тепловых и влажно-тепловых) на защитные свойства пакета материалов боевой одежды пожарных. Разработана математическая модель взаимосвязи устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов и количества циклов нагружения различными факторами износа. Предложен методологический подход, позволяющий произвести классификацию различных факторов износа по степени оказываемого влияния на ухудшение защитных свойств пакета материалов боевой одежды пожарных.

ABSTRACT

FIRE FIGHTER'S PROTECTIVE CLOTHING, MULTICYCLIC ACTION, STABILITY TO THERMAL ACTION OF THE PACKAGE OF MATERIALS

The results of research of influence of the basic operational factors on the change of protective properties of fire fighter's protective clothing are presented. Mathematical models of dependence of stability to thermal action of the package of materials and the number of cycles of action are received by various factors of deterioration. The methodological approach for classification of factors of deterioration by degree of influence on reduction of protective properties of a package of materials of fire fighter's protective clothing is offered.

Боевая одежда пожарных (БОП) является основным и самым массовым по применяемости средством индивидуальной защиты пожарных. Она используется при тушении любых пожаров и при проведении связанных с ними первоочередных аварийно-спасательных работ. Производители современной БОП, стоящей на вооружении подразделений МЧС Республики Беларусь, гарантируют ее соответствие требованиям действующего стандарта СТБ 1971–2009 «Система стандартов безопасности труда. Одежда пожарная боевая. Общие технические условия» [1].

Однако нормативные требования к показателям теплофизических свойств материалов служат только мерой качества изготовления БОП и не могут быть использованы для оценки ее эксплуатационных свойств [2].

В настоящее время отсутствует комплексный мониторинг изменения защитных свойств одежды пожарных в процессе ее использования. Изъятие из эксплуатации происходит только при наличии видимых термических либо механических повреждений. Однако применение только визуального контроля неизбежно влечет за со-

бой субъективность оценки показателей, определяющих качество материалов, и, как следствие, невозможность достоверно и объективно оценить эффективный срок их эксплуатации [3].

На сегодня существует крайне ограниченное количество исследований, направленных на установление теоретических закономерностей, оценку и прогнозирование качества защитной одежды пожарных в процессе ее эксплуатации [2], [4], [5]. Отсутствие информации об изменении защитных свойств, а также методики проведения эксплуатационных испытаний, регламентированной стандартом, сдерживает совершенствование существующих и разработку новых материалов для изготовления БОП.

Целью данной работы является комплексное исследование степени влияния основных эксплуатационных факторов на теплозащитные свойства боевой одежды пожарных, а также разработка методов соответствующих испытаний.

В качестве объекта экспериментальных исследований использовался следующий пакет материалов, из которых изготавливают БОП для подразделений МЧС РБ: ткань из термостойкого синтетического волокна «Арселон-С», артикул 09с-365, саржевого переплетения, поверхностная плотность 223 ± 11 г/м² с нанесенным мембранным покрытием 130 ± 30 г/м² ТУ 80005044.003–2012 (материал верха, совмещенный с водонепроницаемым слоем); ватин полушерстяной холстопршивной, поверхностная плотность 235 г/м² (теплоизоляционная подстежка); хлопчатобумажная ткань, поверхностная плотность 140 г/м² (подкладочная ткань).

Экспериментальные исследования проводились в условиях аккредитованной лаборатории при научно-исследовательском центре Витебского областного управления МЧС с использованием установки для определения устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1.

В ходе комплекса экспериментальных исследований реальные условия, которые защитная одежда пожарных испытывает в процессе эксплуатации, моделировались при помощи лабораторных воздействий различными факторами износа.

Испытания проводились циклически и со-

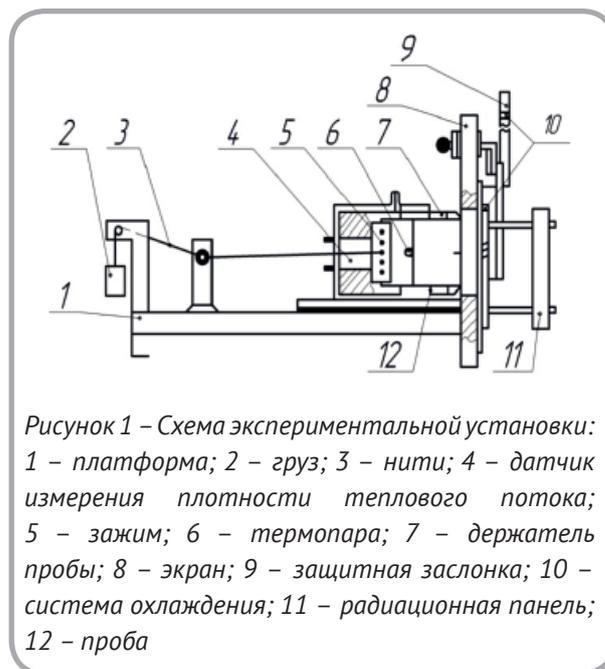


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки: 1 – платформа; 2 – груз; 3 – нити; 4 – датчик измерения плотности теплового потока; 5 – зажим; 6 – термopара; 7 – держатель пробы; 8 – экран; 9 – защитная заслонка; 10 – система охлаждения; 11 – радиационная панель; 12 – проба

стояли из этапов механических, тепловых и влажно-тепловых воздействий, действующих на материалы по отдельности, попарно и совместно. Один этап механических, тепловых и влажно-тепловых воздействий включал, соответственно:

- многократный изгиб и истирание материала верха мягким абразивом в течение 700 циклов;
- воздействие на пакет материалов теплового потока плотностью 5 кВт/м² в течение 240 секунд и 40 кВт/м² в течение 5 секунд;
- стирка материала верха в растворе синтетического моющего средства при температуре плюс 40 °С.

Методика и средства для осуществления многократного изгиба и истирания материала верха регламентированы СТБ 1972–2009 [6]. Методика и средства для воздействия теплового потока на пакет материалов регламентированы СТБ 1971–2009 [1]. Стирка материала верха регламентирована СТБ 1971–2009 [1] и осуществляется в стиральных машинах барабанного типа.

До испытания и периодически, после соответствующего цикла нагружения, проводилась оценка времени, по истечении которого температура на внутренней поверхности пакета материалов изменится на 50 °С при воздействии теплового потока плотностью $5,0$ кВт/м². Данный

показатель аналогичен нормативному показателю пакета материалов БОП – устойчивость пакета к воздействию теплового потока, но в отличие от него дает количественную оценку защитных свойств пакета материалов БОП [2].

Количество циклов воздействия ограничивалось снижением устойчивости пакета к воздействию теплового потока до уровня 100 секунд.

Основные результаты экспериментальных исследований влияния многоцикловых воздействий основных эксплуатационных факторов на устойчивость пакета материалов к воздействию теплового потока представлены на рисунке 2.

Для повышения информативности полученных результатов на данном рисунке представлен уровень соответствия устойчивости пакета к воздействию теплового потока нормативным требованиям ($8, \tau = 240$ с).

В ходе предварительного анализа результатов эксперимента:

1. Установлен закономерный характер снижения устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока при увеличении количества циклов нагружения вне зависимости от вида фактора износа.

2. Для исследуемого состава пакета материалов наименьшее влияние на изменение устойчивости пакета материалов оказывает фактор износа, состоящий только из стирки (рисунок 2, кривая 1), а наибольшее – комплексное воздействие трех факторов износа: теплового воздействия, многократного изгиба и истирания, стирки (рисунок 2, кривая 7).

3. Степень совместного влияния двух различных факторов износа на исследуемый показатель практически одинакова (рисунок 2,

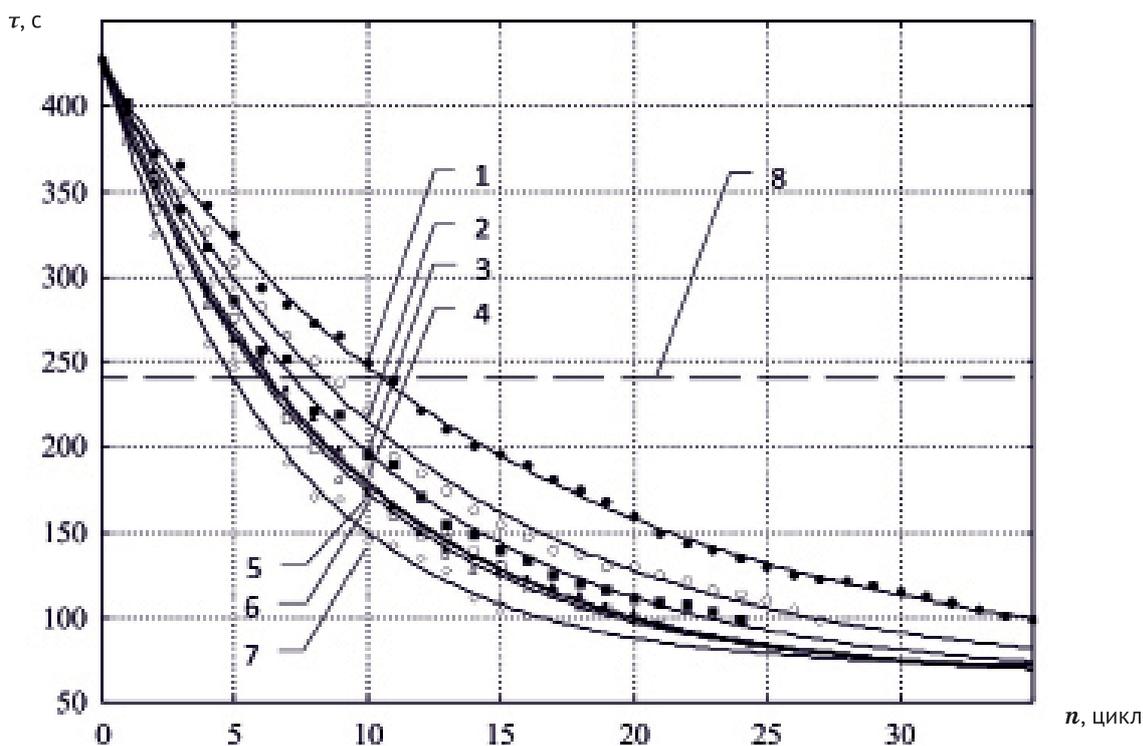


Рисунок 2 – Зависимость устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока от количества циклов нагружения, состоящих из различных факторов износа τ (n): 1 – стирка; 2 – многократный изгиб и истирание; 3 – тепловое воздействие; 4 – тепловое воздействие, стирка; 5 – многократный изгиб и истирание, стирка; 6 – тепловое воздействие, многократный изгиб и истирание; 7 – тепловое воздействие, многократный изгиб и истирание, стирка; 8 – уровень устойчивости пакета к воздействию теплового потока, соответствующий нормативным требованиям

кривые 4, 5, 6).

Для научно-обоснованной классификации различных факторов износа по степени влияния на защитные свойства пакета материалов БОП предположим, что процесс изнашивания защитной одежды при воздействии различных эксплуатационных факторов идентичен процессу накопления уровня повреждений в нестационарном процессе Пуассона. Следует отметить, что данный методологический подход довольно успешно использован автором для аналитического описания процессов, происходящих при испытании текстильных нитей на истирание и многоцикловое растяжение [7–8].

По определению процесс Пуассона является моделью эксперимента либо испытания, при котором определяются либо число определенных событий, которые имеют место в течение определенного периода времени t , либо изменение состояния наблюдаемого объекта [9].

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

$$P_i(t, t + \Delta t) = \frac{c}{b} \left(\frac{t}{b}\right)^{c-1} \quad (1)$$

где c – параметр стационарности процесса Пуассона (если $c = 1$, то процесс Пуассона – стационарный); b – коэффициент пропорциональности.

Интегральная функция распределения нестационарного процесса Пуассона $F(t)$, определяющая вероятность того, что одно событие произойдет до времени t , имеет следующий вид:

$$F(t) = 1 - P_0(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{b}\right)^c\right]. \quad (2)$$

Вследствие того, что у рассматриваемого пакета материалов происходит закономерное снижение устойчивости к воздействию теплового потока при увеличении количества циклов нагружения, соотношение (2) применительно к исследуемому процессу можно записать в сле-

дующем виде:

$$\frac{\tau_0 - \tau(t)}{\tau_0 - \tau_{кр}} = F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{b}\right)^c\right]. \quad (3)$$

Так как время нагружения пропорционально числу циклов, то модель (3) удобно переписать в следующем виде:

$$\frac{\tau_0 - \tau(n)}{\tau_0 - \tau_{кр}} = F(n) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{n}{b}\right)^c\right], \quad (4)$$

где $\tau(n)$ – текущее значение устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов БОП после n циклов нагружения, c ; $\tau_{кр}$ – критическое значение устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов БОП, соответствующее такому состоянию пакета, при котором устойчивость материалов остается постоянной и больше не зависит от количества циклов нагружения, c ; τ_0 – начальное значение устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов БОП, c .

Обозначив $M = 1 / b^c$, математическую модель (4) удобно представить в виде:

$$\theta(n) = \frac{\tau_0 - \tau(n)}{\tau_0 - \tau_{кр}} = 1 - \exp[-Mn^c], \quad (5)$$

или

$$\tau(n) = \tau_{кр} + (\tau_0 - \tau_{кр}) \exp[-Mn^c], \quad (6)$$

где $q(n)$ – значение уровня структурных повреждений, как функции количества циклов нагружения (времени испытаний); M – темповый параметр моделей, цикл⁻¹.

Следует отметить, что в случае стационарности процесса Пуассона темповый параметр M является величиной, обратной такому количеству циклов нагружения, по истечении которых текущее изменение устойчивости к воздействию теплового потока по отношению к критической устойчивости $(\tau(n) - \tau_{кр})$ меньше максимально возможного $(\tau_0 - \tau_{кр})$ в e раз для данного паке-

та материалов.

Для оценки параметров разработанных математических моделей (5), (6) производилась обработка результатов экспериментальных исследований с использованием математического статистического пакета «Statistica for Windows». Численные значения параметров моделей (5), (6) взаимосвязи устойчивости пакета к воздействию теплового потока и количества циклов нагружения представлены в таблице 1.

По результатам проведенного моделирования процесса ухудшения защитных свойств при проведении многоциклового испытания установлено следующее:

- численные значения коэффициента детерминации R^2 модели (6) для исследуемых факторов износа находятся в пределах от 0,998 до 0,999, что свидетельствует о достоверности модели и возможности ее практического использования для прогнозирования устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока от количества циклов нагружения;

- численные значения параметров $\tau_{кр}$ и τ_0 математической модели (6) не зависят от условий проведения многоциклового испытания, а определяются теплофизическими свойствами пакета материалов;

- для всех исследуемых факторов износа численные значения параметра ϵ модели (6) практически одинаковы и стремятся к 1. Данный факт указывает на стационарность рассматриваемого процесса Пуассона накопления уровня повреждений (устойчивости пакета материалов

к воздействию теплового потока) при многократном воздействии различных факторов износа;

- изменение значения параметра M указывает на его зависимость от вида фактора износа. Численное значение параметра M пропорционально степени влияния фактора износа на изменение устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока.

Использование соотношения (6) позволяет провести анализ интенсивности процесса снижения исследуемого показателя теплозащитных свойств пакета материалов БОП при воздействии различных факторов износа (для упрощения практического использования параметр стационарности ϵ модели (6) можно принять за 1):

$$I_{\tau}(n) = \left| \frac{d\tau(n)}{dn} \right| = \left| - \frac{M(\tau_0 - \tau_{кр})}{\exp(Mn)} \right|.$$

На рисунке 3 представлены зависимости интенсивности процесса снижения теплозащитных свойств пакета материала БОП от количества циклов нагружения для исследуемого пакета материалов. Комплексный анализ данных зависимостей позволяет провести классификацию различных факторов износа по степени их влияния на ухудшение защитных свойств пакета материалов БОП. Например, наибольшее влияние на изменение устойчивости пакета материалов к тепловому потоку оказывает комплексное воздействие трех факторов износа: теплового воз-

Таблица 1 – Численные значения параметров математических моделей (5), (6)

Фактор износа	τ_0, ϵ	$t_{кр}, \epsilon$	$M, \text{цикл}^{-1}$	ϵ	Коэффициент детерминации, R^2
1.Тепловое воздействие	425,8	76,6	0,088	1,09	0,998
2.Многokrатный изгиб и истирание	417,5	87,4	0,065	1,17	0,998
3.Стирка	424,2	67,3	0,069	0,99	0,999
4.Тепловое воздействие, многократный изгиб и истирание	424,3	73,1	0,112	1,05	0,998
5.Многokrатный изгиб и истирание, стирка	428,5	71,3	0,109	1,04	0,999
6.Тепловое воздействие, стирка	421,2	67,9	0,109	1,03	0,998
7.Тепловое воздействие, многократный изгиб и истирание, стирка	427,6	68,9	0,149	1,00	0,998

действия, многократного изгиба и истирания, стирки, соответствующее максимальному значению $I_{\tau} = 54,0$ [с цикл⁻¹](рисунок 3).

В результате проведенного комплекса исследований:

- установлен характер влияния различных эксплуатационных факторов (механических, тепловых и влажно-тепловых) на защитные свойства пакета материалов БОП;

- разработана математическая модель взаимосвязи устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов и количества циклов нагружения различными факторами износа;

- предложен методологический подход, позволяющий произвести классификацию различных факторов износа по степени оказываемого влияния на ухудшение защитных свойств пакета материалов БОП.

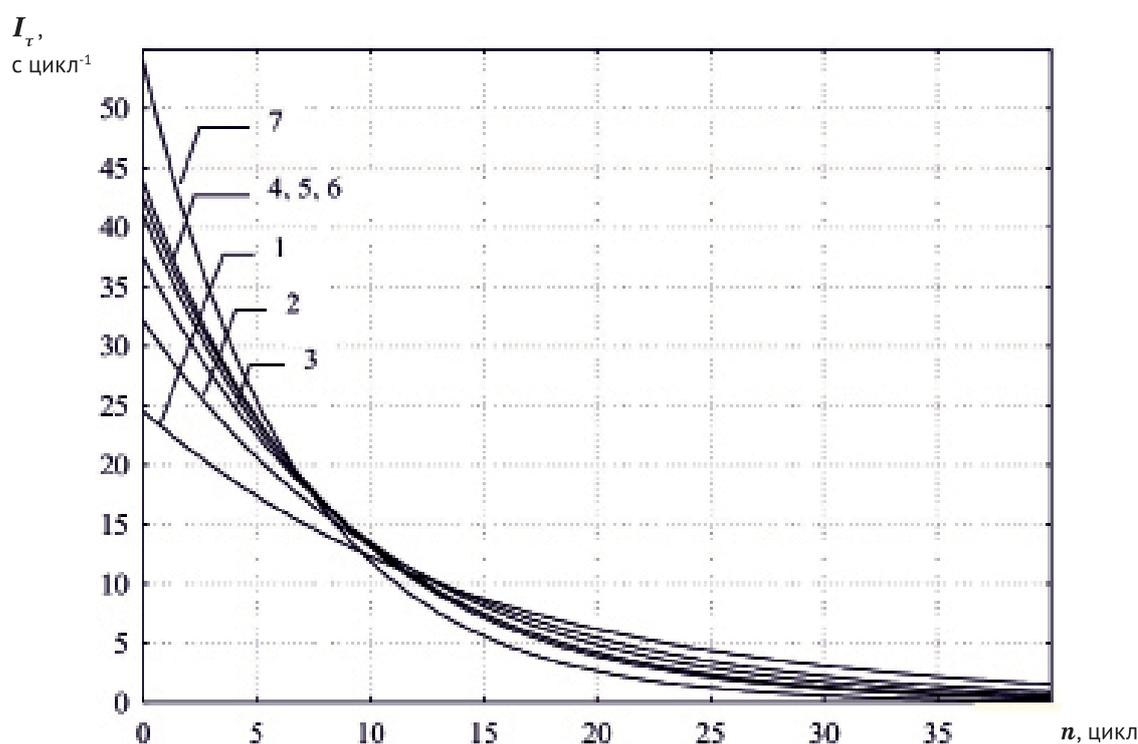


Рисунок 3 – Зависимость интенсивности процесса снижения устойчивости материалов к воздействию теплового потока от количества циклов нагружения, состоящих из различных факторов износа $I_{\tau}(n)$: 1 – стирка; 2 – многократный изгиб и истирание; 3 – тепловое воздействие; 4 – тепловое воздействие, стирка; 5 – многократный изгиб и истирание, стирка; 6 – тепловое воздействие, многократный изгиб и истирание; 7 – тепловое воздействие, многократный изгиб и истирание, стирка

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СТБ 1971–2009 (2010), Система стандартов безопасности труда. Одежда пожарных боевая. Общие технические условия, Минск: Госстандарт, 2010, 36 с.
2. Гусаров, А.М., Кузнецов, А.А., Дмитракович, Н.М. (2011), Исследования устойчивости пакета материалов боевой одежды пожарного к многоцикловому тепловому воздействию, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2011, № 22, С. 39–47.
3. Slater, K. (1986), The progressive deterioration of textile materials, I: *Characteristics of degradation*, *Journal of the Textile Institute*, 1986, Vol. 77, № 2, pp. 76-87.
4. Гусаров, А.М., Кузнецов, А.А., Дмитракович, Н.М. (2012), Прогнозирование температуры на внутренней поверхности пакета материалов боевой одежды пожарного при многоцикло-вом тепловом воздействии, *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация*, 2012, № 2, С. 140-147.
5. Gagnon, B. D. (2000), Evaluation of New Test Methods for Fire Fighting Clothing, M.S. Thesis, Worcester Polytechnic Institute [Electronic resource], (2000), available at: <http://www.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-0418100-155520/unrestricted/gagnon.pdf/> (accessed 31 January 2011).
6. СТБ 1972–2009 (2010), Одежда пожарных специальная защитная от повышенных тепловых воздействий. Общие технические условия, Минск: Госстандарт - НИЦ ВОУ МЧС г.Витебск, 2010, 46 с.

REFERENCES

1. Belarusian state standard 1971-2009 (2010), Standards of safety of work. Fire fighter's protective clothing. The general requirements [Sistema standartov bezopasnosti truda. Odezhda pozharnyh boevaja. Obshhie tehicheskie uslovija], Minsk: Gosstandart – Minsk: State standard, 2010, 36 p.
2. Gusarov, A.M., Kuznetsov, A.A., Dmitrakovich, N.M. (2011), Researches of stability of the package of materials of fire fighter's protective clothing to multicyclic thermal action [Issledovanija ustojchivosti paketa materialov boevoj odezhdy pozharnogo k mnogociklovomu teplovomu vozdejstvuju], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta – Herald Vitebsk State Technological University*, 2011, № 22, pp. 39–47.
3. Slater, K. (1986), The progressive deterioration of textile materials, I: Characteristics of degradation, *Journal of the Textile Institute*, 1986, Vol. 77, № 2, pp. 76-87.
4. Gusarov, A.M., Kuznetsov, A.A., Dmitrakovich, N.M. (2012), Temperature forecasting for the internal surface of the package of materials of fire fighter's protective clothing at multicyclic thermal influence [Prognozirovanie temperatury na vnutrennej poverhnosti paketa materialov boevoj odezhdy pozharnogo pri mnogociklovom teplovom vozdejstvii], *Chrezvychajnye situacii: preduprezhdenie i likvidacija – Emergency Situations: the prevention and liquidation*, 2012, № 2, pp. 140-147.
5. Gagnon, B. D. (2000), Evaluation of New Test Methods for Fire Fighting Clothing, M.S. Thesis, Worcester Polytechnic Institute [Electronic resource], (2000), available at: <http://www.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-0418100-155520/unrestricted/gagnon.pdf/> (accessed 31 January 2011).

7. Кузнецов, А.А. (2007), Вероятностная модель накопления остаточной циклической деформации при проведении многоцикловых испытаний на растяжение, *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, 2007, № 1, С. 23–27.
8. Кузнецов, А.А., Ольшанский, В.И. (2004), *Оценка и прогнозирование физико-механических свойств текстильных нитей*, УО «ВГТУ», Витебск, 226 с.
9. Ивахненко, А.Г., Юрачковский, Ю.П. (1986), *Моделирование сложных систем по экспериментальным данным*, Москва, 123 с.
6. Belarusian state standard 1972-2009 (2010), Special protective Clothes of firemen from the increased thermal influences. The general requirements [Odezhdha požarnyh special'naja zashhitnaja ot povyshennyh teplovyh vozdeystvij. Obshhie tehniicheskie uslovija], Minsk: Gosstandart - Minsk: State standard, 2010, 46 p.
7. Kuznetsov, A.A. (2007), Likelihood model of accumulation of residual cyclic deformation at carrying out of multicyclic tests for a stretching [Verojatnostnaja model' nakoplenija ostatochnoj ciklicheskoj deformacii pri provedenii mnogociklovyh ispytanij na rastjazhenie], *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti – Proceedings of higher education institutions. Textile industry technology*, 2007, №1, pp. 23–27.
8. Kuznetsov, A.A., Olshansky, V.I. (2004), *Ocenka i prognozirovanie fiziko-mehaničeskich svojstv tekstil'nyh nitej*, [Estimation and forecasting of physicommechanical properties of textile threads], Vitebsk, 239 p.
9. Ivahnenko, A.G., Jurachkovskij, Ju.P. (1986), *Modelirovanie slozhnyh sistem po jeksperimental'nyh dannym*, [Modeling of complex systems on experimental data], Moscow, 123 p.

Статья поступила в редакцию 11. 11. 2014 г.