

## ПОЖАРНАЯ ТЕХНИКА И ВООРУЖЕНИЕ

УДК 677.077.625.16

**Гусаров А.М., д-р техн. наук Кузнецов А.А.,  
канд. техн. наук Дмитракович Н.М.\***

### **Прогнозирование температуры на внутренней поверхности пакета материалов боевой одежды пожарного при многоцикловом тепловом воздействии**

*УО «Витебский государственный технологический университет», г. Витебск*

*\*Учреждение «Научно-исследовательский центр*

*Витебского областного управления МЧС Республики Беларусь», г. Витебск*

Предложен новый методологический подход с разработкой соответствующей математической модели для оценки теплофизических свойств пакета материалов боевой одежды пожарных при эксплуатации. Практическое применение разработанной модели позволяет осуществить прогноз значений температуры на внутренней поверхности пакета материалов при многоцикловом воздействии теплового потока в диапазоне от 1 до 5 кВт/м<sup>2</sup>, а также произвести оценку времени потенциально безопасной эксплуатации боевой одежды пожарных.

*Ключевые слова:* боевая одежда пожарных, многоцикловое тепловое воздействие, температура на внутренней поверхности пакета материалов, математическая модель.

### **Введение**

Боевая одежда пожарных (далее – БОП) является основным и самым массовым по применяемости средством индивидуальной защиты пожарных. Она используется при тушении любых пожаров и предназначена для защиты тела человека от опасных и вредных факторов окружающей среды, возникающих при тушении пожаров и проведении связанных с ними первоочередных аварийно-спасательных работ, а также от неблагоприятных климатических воздействий. Наиболее часто к травматизму и гибели пожарных приводят тепловые факторы пожара: воздействие высокой температуры окружающей среды, тепловых пото-

ков, открытого пламени и контакт с нагретыми поверхностями.

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] (например, РПУП «Униформ», г. Микашевичи, Декларация о соответствии № ВУ / 112 10.1 2Д 033 00034).

Однако оценка качества БОП при помощи нормативных требований к теплофизическим показателям материалов, используемых при ее изготовлении, имеет ряд недостатков:

нормативные требования к показателям теплофизических свойств пакета материалов БОП указаны для одноциклового воздействия. Однако в процессе эксплуатации БОП фактически сталкивается с многократно повторяющейся тепловой нагрузкой;

теплозащитные свойства БОП при воздействии теплового облучения задаются в [1] несколькими параметрами чисел: плотностью потока облучения и соответствующим минимальным временем переносимости. Очевидно, что в реальных условиях проведения аварийно-спасательных работ пожарный сталкивается с уровнем теплового воздействия, отличным от указанного в [1] как по плотности теплового потока, так и временем его действия.

Таким образом, нормативные требования к показателям теплофизических свойств материалов служат только мерой качества изготовления БОП и не могут быть использованы для оценки ее эксплуатационных свойств. Также необходимо отметить, что комплексный мониторинг изменений защитных свойств БОП в процессе ее эксплуатации отсутствует. Изъятие из эксплуатации происходит только при наличии видимых термических и механических повреждений, не подлежащих устранению в условиях пожарной части. В связи с этим использование БОП, срок эксплуатации которой еще не истек и, соответственно, степень изменения защитных свойств неизвестна, может стать дополнительным риском для жизни пожар-

ных при тушении пожаров и проведении связанных с ними первоочередных аварийно-спасательных работ.

Комплексная оценка показателей качества материалов БОП при воздействии различных эксплуатационных факторов позволит выявить резервы эксплуатационной надежности, прогнозировать эффективный срок службы и, соответственно, повысить надежность и конкурентоспособность БОП.

Данная работа посвящена исследованию влияния многоциклового теплового воздействия на теплозащитные свойства БОП. Основным показателем теплозащитных свойств БОП при тепловом воздействии является значение температуры подкостюмного пространства в течение ее времени работы или значение температуры на внутренней поверхности пакета материалов, используемых при изготовлении БОП.

### **Основная часть**

Для исследования влияния многоциклового воздействия тепловых потоков различного уровня на защитные 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 полшерстяной холстопршивной, поверхностная плотность  $235 \text{ г/м}^2$ ) и подкладочной ткани (100 % х/б ткань, поверхностная плотность  $140 \text{ г/м}^2$ ). При проведении исследо-

ваний 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 рис. 1.

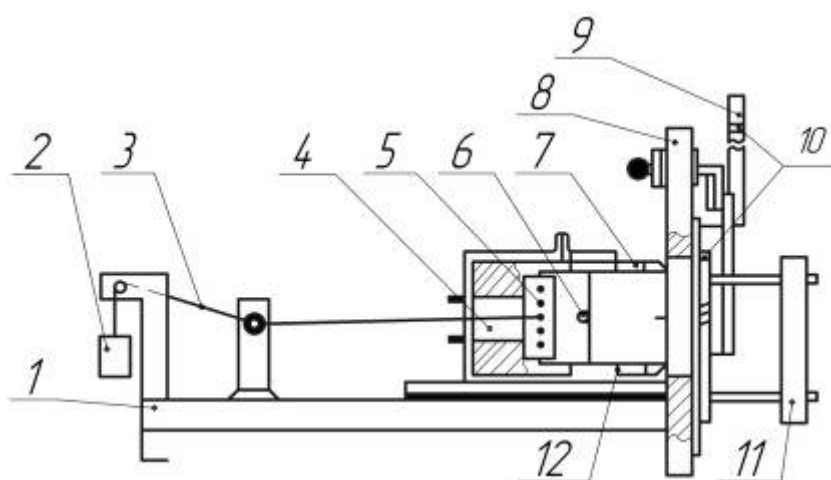


Рис. 1 Схема экспериментальной установки: 1 – платформа; 2 – груз; 3 – нити; 4 – датчик измерения плотности теплового потока; 5 – зажим; 6 – термопара; 7 – держатель пробы; 8 – экран; 9 – защитная заслонка; 10 – система охлаждения; 11 – радиационная панель; 12 – проба

Образец пакета материалов размером  $210 \times 70 \text{ мм}$  подвергался воздействию теплового потока плотностью в диапазоне от 1 до  $5 \text{ кВт/м}^2$ , 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. Продолжи-

тельность теплового воздействия составляло 240 с. Охлаждение образца продолжалось до достижения начальной температуры на внутренней поверхности образца ( $T_0 = 26 \text{ }^\circ\text{C}$ ). 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 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 рис. 2.

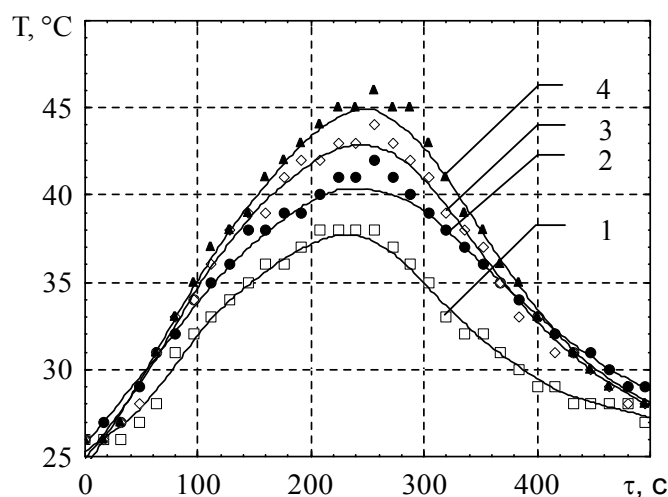


Рис. 2 Зависимость температуры на внутренней поверхности пакета материалов  $T$  от времени  $\tau$  при плотности падающего теплового потока  $q_{п}=2$  кВт/м<sup>2</sup> для различных циклов теплового нагружения: 1 – 1 цикл; 2 – 3 цикла; 3 – 5 циклов; 4 – 10 циклов

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 тепло-

вого воздействия. На рис. 3 представлена зависимость максимальной температуры на внутренней поверхности пакета материалов от количества циклов теплового нагружения при различных значениях уровня теплового воздействия.

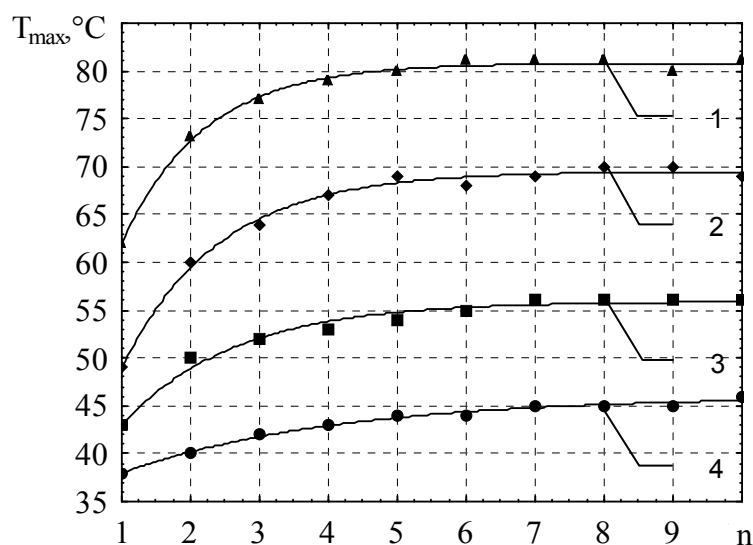


Рис. 3 Зависимость максимальной температуры на внутренней поверхности пакета материалов  $T_{\max}$  от количества циклов теплового нагружения  $n$  при различных значениях уровня теплового воздействия  $q_n$ : 1 – при  $q_n = 5 \text{ кВт/м}^2$ ; 2 – при  $q_n = 4 \text{ кВт/м}^2$ ; 3 – при  $q_n = 3 \text{ кВт/м}^2$ , 4 – при  $q_n = 2 \text{ кВт/м}^2$

Согласно [1] безопасным условием эксплуатации БОП является рост температуры на внутренней поверхности пакета материалов в течение испытания не более чем на  $50^\circ\text{C}$  от начальных условий, то есть для проведенных экспериментальных исследований температура на внутренней поверхности пакета материалов не должна превышать  $76^\circ\text{C}$ . Таким образом, многоцикловое (240 с) тепловое воздействие в диапазоне от 1 до  $4 \text{ кВт/м}^2$  не снижает время безопасной эксплуатации по сравнению с нормативным (не менее 240 с). Тепловое воздействие в  $5 \text{ кВт/м}^2$  после 2-го цикла способствует снижению времени безопасной эксплуатации.

Установлено, что после некоторого количества циклов теплового воздействия в пакете материалов наступает состояние тепловой стабилизации, при котором максимальная температура на внутренней по-

верхности пакета материалов остается постоянной и практически не зависит от времени теплового воздействия.

Для повышения информативности результатов экспериментов дальнейшие исследования направлены на моделирование температурных кривых, что позволит осуществить прогнозирование температуры на внутренней поверхности пакета при любой продолжительности теплового воздействия в диапазоне от 1 до  $5 \text{ кВт/м}^2$ .

На рис. 4 представлена типовая зависимость температуры на внутренней поверхности пакета материалов от времени теплового воздействия  $T(\tau)$ . Можно отметить, что общий вид данной зависимости не зависит от выбора методологического подхода к проведению экспериментальных исследований.

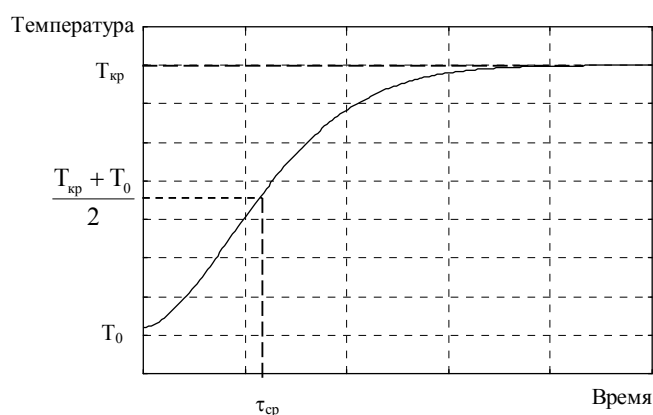


Рис. 4 Типовая зависимость температуры на внутренней поверхности пакета материалов от времени теплового воздействия  $T(\tau)$

Для количественного описания зависимости  $T(\tau)$  можно рекомендовать математическую модель следующего вида [2]:

$$T(\tau) = T_{кр} - (T_{кр} - T_0) \cdot \exp[-M^c \tau^c], \quad (1)$$

где  $\tau$  – время теплового воздействия, с;

$T_{кр}$  – критическая температура пакета, соответствующая установившемуся значению температуры при длительном тепловом воздействии, не приводящем к видимой деформации, °С;

$T_0$  – начальная температура пакета, °С;

$M, c$  – параметры модели.

Для определения физического смысла параметра  $M$  модели (1) предположим, что существует такое время  $\tau_{ср}$ , при котором текущее значение температуры образца численно равно среднему арифметическому значению параметров  $T_0$  и  $T_{кр}$  модели (1):

$$T(\tau_{ср}) = \frac{1}{2}(T_{кр} + T_0). \quad (2)$$

Тогда, подставив соотношение (2) в модель (1), получим

$$\frac{1}{2}(T_{кр} + T_0) = T_{кр} - (T_{кр} - T_0) \cdot \exp[-M^c \tau_{ср}^c]. \quad (3)$$

После преобразований получим:

$$\frac{1}{2} = \exp[-M^c \tau_{ср}^c] \Rightarrow M^c = \frac{\ln 2}{\tau_{ср}^c}.$$

Следовательно, параметр модели  $M$  в данном случае определяет время теплового воздействия  $\tau_{ср}$ , необходимого для выполнения условия (2), и имеет размерность [с<sup>-1</sup>].

Оценка параметров, предложенных в математической модели (1), производилась с использованием программного пакета статистической обработки данных «Statistica for Windows». Численные значения параметров модели (1) в зависимости от плотности падающего теплового потока и соответствующих состоя-

нию тепловой стабилизации пакета материалов сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Параметры модели (1) для расчета температуры на внутренней поверхности пакета материалов ( $T$ ) при многоцикловом тепловом нагружении в зависимости от плотности падающего теплового потока (при  $T_0 = 26 \text{ }^\circ\text{C}$ )

| Параметры модели   | Количество циклов теплового воздействия |        |        |        |        |        |
|--|---|--------|--------|--------|--------|--------|
|  | 1                                       | 3      | 5      | 8      | 9      | 10     |
| Плотность падающего теплового потока $2 \text{ кВт/м}^2$ |   |        |        |        |        |        |
| $T_{кр}, \text{ }^\circ\text{C}$                         | 38,9                                    | 41,2   | 43,7   | 45,3   | 45,7   | 45,8   |
| $M, \text{ с}^{-1}$                                      | 0,0090                                  | 0,0083 | 0,0080 | 0,0077 | 0,0077 | 0,0077 |
| $c$  | 1,75                                    | 1,63   | 1,83   | 1,77   | 1,73   | 1,82   |
| Коэффициент детерминации, $R^2$                          | 0,993                                   | 0,993  | 0,994  | 0,998  | 0,997  | 0,997  |
| Плотность падающего теплового потока $3 \text{ кВт/м}^2$ |   |        |        |        |        |        |
| $T_{кр}, \text{ }^\circ\text{C}$                         | 50,0                                    | 53,1   | 55,9   | 56,3   | 56,0   | 56,9   |
| $M, \text{ с}^{-1}$                                      | 0,0083                                  | 0,0080 | 0,0076 | 0,0085 | 0,0084 | 0,0086 |
| $c$  | 1,34                                    | 1,41   | 1,53   | 1,67   | 1,73   | 1,58   |
| Коэффициент детерминации, $R^2$                          | 0,996                                   | 0,997  | 0,997  | 0,998  | 0,997  | 0,997  |
| Плотность падающего теплового потока $4 \text{ кВт/м}^2$ |   |        |        |        |        |        |
| $T_{кр}, \text{ }^\circ\text{C}$                         | 59,4                                    | 64,9   | 68,2   | 69,0   | 71,3   | 68,7   |
| $M, \text{ с}^{-1}$                                      | 0,0079                                  | 0,0072 | 0,0075 | 0,0078 | 0,0076 | 0,0076 |
| $c$  | 1,27                                    | 1,45   | 1,79   | 1,84   | 1,69   | 1,82   |
| Коэффициент детерминации, $R^2$                          | 0,983                                   | 0,994  | 0,997  | 0,997  | 0,997  | 0,997  |
| Плотность падающего теплового потока $5 \text{ кВт/м}^2$ |   |        |        |        |        |        |
| $T_{кр}, \text{ }^\circ\text{C}$                         | 66,7                                    | 79,2   | 83,1   | 86,7   | 87,1   | 87,3   |
| $M, \text{ с}^{-1}$                                      | 0,0085                                  | 0,0082 | 0,0079 | 0,0068 | 0,0070 | 0,0071 |
| $c$  | 1,30                                    | 1,36   | 1,37   | 1,44   | 1,37   | 1,48   |
| Коэффициент детерминации, $R^2$                          | 0,993                                   | 0,995  | 0,996  | 0,997  | 0,997  | 0,997  |

По результатам математического моделирования установлено следующее:

– увеличение плотности теплового нагружения  $q_n$  и количества циклов теплового воздействия приводит к увеличению критической температуры  $T_{кр}$  для исследованных

пакетов материалов. Можно отметить линейный характер зависимости критической температуры  $T_{кр}$  от плотности теплового нагружения  $q_n$ ;

– численные значения параметров  $M$  и  $c$  модели (1) практически не зависят от плотности тепловой нагрузки  $q_n$  в исследованном диапа-

зоне ее значений, количества циклов теплового воздействия  $n$ , а определяются структурными характеристиками исследуемого пакета материалов;

– после 8-го цикла теплового воздействия критическая температура  $T_{кр}$  практически не изменяется. Следовательно, изменение теплофизических свойств пакета материалов происходит в течение первых 8-ми циклов теплового воздействия, а в дальнейшем наступает состояние тепловой устойчивости пакета материалов и, соответственно, устойчивости его теплофизических свойств к многоциклового воздействию теплового потока плотностью от 1 до 5 кВт/м<sup>2</sup>;

– исследованный пакет материалов обеспечивает безопасные условия эксплуатации БОП независимо от времени и количества циклов воздействия теплового потока в диапазоне от 2 до 4 кВт/м<sup>2</sup>. После 4-го цикла воздействия теплового потока плотностью 5 кВт/м<sup>2</sup> время безопасной эксплуатации не будет превышать 225 с, что необходимо учитывать при проведении аварийно-спасательных работ подразделениями МЧС.

### Заключение

В результате проведенного комплекса исследований установлено, что увеличение количества циклов теплового нагружения приводит к закономерному изменению показате-

телей, определяющих теплозащитные свойства пакета материалов. Показано, 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 до 5 кВт/м<sup>2</sup>.

На основании экспериментальных данных и разработанной математической модели установлено, что исследованный пакет материалов при тепловом воздействии в диапазоне от 2 до 4 кВт/м<sup>2</sup> обеспечивает безопасные условия эксплуатации БОП независимо от времени и количества циклов теплового нагружения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *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.
2. *Богдановф, Дж.* Вероятностные модели накопления повреждений // Дж. Богдановф, Ф. Козин / М.: Мир, 1989. – 245 с.

