

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ****METHOD FOR DETERMINING THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF NONWOVENS**

УДК 677.08

**В.И. Ольшанский, В.Г. Мульц\*, Е.Л. Зимина***Витебский государственный технологический университет*<https://doi.org/10.24412/2079-7958-2021-2-43-50>**V. Alshanski, U. Mults\*, E. Zimina***Vitebsk State Technological University***РЕФЕРАТ***ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ, ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ, ТЕМП НАГРЕВА, ТЕПЛОВЫЙ ПОТОК, НЕТКАНЫЙ МАТЕРИАЛ, СТАЦИОНАРНЫЙ МЕТОД*

*Целью работы является разработка метода для определения основных теплофизических свойств нетканых материалов.*

*Предложена методика нахождения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности нетканых полотен, произведенных из отходов текстильного производства.*

*В статье произведены экспериментальные исследования и установлены зависимости изменения теплофизических свойств нетканых материалов в условиях воздействия на них стационарного теплового потока.*

*Разработанная установка и методика позволяют оперативно определять теплофизические свойства фольгированных нетканых материалов, в сравнении с материалами, не имеющими защитного покрытия в виде алюминиевой фольги.*

**ABSTRACT***THERMAL CONDUCTIVITY, HEAT TRANSFER, HEATING RATE, HEAT FLOW, NONWOVEN FABRIC, STATIONARY METHOD*

*The object of the study is a multilayer foiled material obtained from the waste of the textile industry.*

*The aim of the work is to develop a method for determining the basic thermophysical properties of nonwovens.*

*A method for finding the coefficients of thermal conductivity and thermal conductivity of non-woven fabrics made from textile waste is proposed.*

*The article, describes experimental studies and discusses the dependences of changes in the thermophysical properties of nonwovens under the influence of a stationary heat flow on them.*

*The developed installation and methodology allow us to quickly determine the thermophysical properties of foiled nonwovens, in comparison with materials that do not have a protective coating in the form of aluminum foil.*

**ВВЕДЕНИЕ**

На предприятиях легкой текстильной промышленности Республики Беларусь значительную часть материала составляют различного рода текстильные отходы, обладающие низким коэффициентом теплопроводности, что является определяющим фактором для использования их в качестве теплоизоляционных материалов.

Вторичные материальные ресурсы являются значительной сырьевой базой для производства нетканых материалов. К ним относятся отходы

производства отраслей легкой промышленности, отходы производства химических волокон и отходы потребления. Нетканые материалы производятся из широкого ассортимента сырья [1].

Источником сырья для производства нетканых материалов в мировом производстве являются: полимеры и их производимые (в виде гранулята, крошки и т. п.) – 44 %, синтетические волокна – 47 %, целлюлоза (древесная пульпа) – 7 %, остальное – 2 %. Из химических волокон наиболее часто используют полиэфирные (37 %),

\* E-mail: [vladmuls@gmail.com](mailto:vladmuls@gmail.com) (U. Mults)

полипропиленовые (36 %), вязкозные (20 %), би-компонентные (6 %), остальные (1 %).

Одним из методов изготовления нетканых полотен является переработка текстильных отходов производства. Предприятие ООО «АКОТЕРМ ФЛАКС» занимается производством нетканых текстильных материалов теплоизоляционного назначения [2].

Технологический процесс изготовления нетканых полотен на предприятии осуществляется следующим образом: подготовка сырья (рыхление, очистка от примесей и смешивание волокна, регенерированного из лоскута и тряпья из использованной одежды военного назначения, с добавлением в смесь до 40 % полиэфирного волокна); формирование волокнистой основы с помощью системы валков; скрепления волокнистой основы (непосредственно получения нетканого материала); отделка нетканого материала фольгой или бумагой. Для получения нетканого полотна используется метод термического скрепления – в этом методе используются термопластичные свойства полиэфирного волокна, которые обеспечивают надежное скрепление материала [3].

На данном предприятии имеется необходимость в проведении сравнительного анализа теплофизических свойств фольгированных нетканых материалов, в сравнении с материалами, не имеющими защитного покрытия в виде алюминиевой фольги. Полученные данные позволят определить эффективность применения защитного слоя, а также расширить сферу применения нетканых материалов.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является разработка метода для определения основных теплофизических свойств нетканых материалов.

#### ВЫБОР МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Теплоизоляционные материалы должны обладать высоким термическим сопротивлением, низкой тепло- и температуропроводностью, для чего требуются определенные методики их измерения.

Полученные данные должны обеспечивать достаточно высокую точность измерений при минимальных временных затратах.

В настоящий момент используется ряд методов определения теплопроводности материалов:

- метод определения цилиндрическим зонтом (ГОСТ 30256-94);
- метод определения поверхностным преобразователем (ГОСТ 30290-94);
- метод выполнения измерений теплопроводности дизелькометрическим методом (ГОСТ 8621-2006);
- стационарный метод плоского слоя и метод труб.

Методы, основанные на измерении стационарной теплопроводности, делятся на две группы.

Первая группа методов позволяет проводить измерения в широком диапазоне температур и получать точные значения. Недостатком данного метода является большая продолжительность опыта.

Вторая группа позволяет проводить эксперимент в течение нескольких минут (до 1 ч), но метод ограничен измерением теплопроводности при сравнительно низких температурах.

Проведя анализ рассмотренных методов измерения теплопроводности, для проведения эксперимента был выбран стационарный метод теплового потока, обеспечивающих достаточную точность получаемых данных и не требующих больших временных затрат.

Метод стационарного теплового потока является технологически простым методом исследования температурной зависимости коэффициента теплопроводности пластин любого типа проводимости. Метод основан на пропускании теплового потока через исследуемый образец [4].

#### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Исследуемые нетканые материалы могут иметь толщину от 10 мм до 50 мм. Поэтому для определения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности была разработана новая экспериментальная установка, имеющая ограничение по толщине исследуемого материала от 1 мм до 50 мм. Структурная схема опытной установки представлена на рисунке 1.

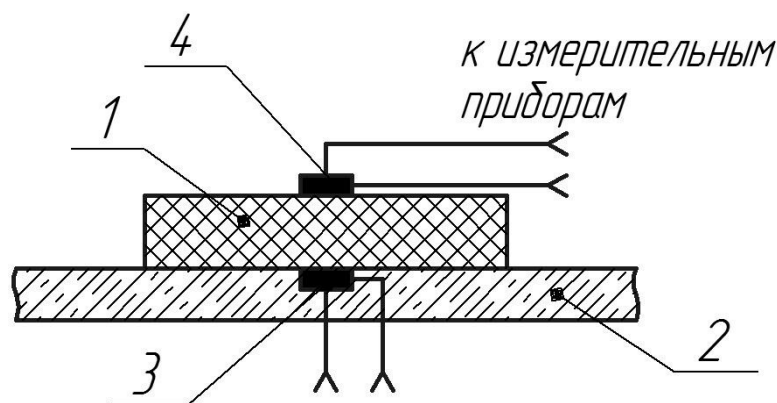


Рисунок 1 – Структурная схема опытной установки

Исследуемый образец 1 имеет форму прямоугольной пластины. Температурный нагрев производится с помощью нагревательного стола 2. Нагревательный стол состоит из блоков параллельно соединенных керамических резисторов. Номинальное напряжение питания нагревательного стола 12 В. Встроенный датчик измерения температуры 3 позволяет удерживать мощность теплового потока в заданных пределах. Для удобства расчетов мощность теплового потока устанавливается. Значение температуры с наружной поверхности образца определяется с помощью термопары 4. Фиксация значения температуры происходит через каждые 60 с. Среднее время проведения эксперимента составляет 30 мин. Образец исследуемого материала должен плотно прилегать к нагревательному элементу во избежание ошибок контактного сопротивления.

Принимаем, что температура  $t$  поверхности во всех точках одинакова или незначительно изменяется. Исследуемые образцы имеют форму пластины, следовательно, можно ограничиться расчетом одномерной задачи теплопроводности для плоской стенки.

Любой процесс нагревания или охлаждения тела можно условно разделить на три стадии. Первая стадия охватывает начало процесса. Скорость изменения температуры в отдельных точках тела при этом различна, и поле температур зависит от начального состояния тела. Первая стадия, характеризующая начальное развитие

теплового процесса, называется неупорядоченной стадией процесса охлаждения (нагревания).

С течением времени начальные условия сказываются незначительно и относительная скорость изменения температуры во всех точках тела становится постоянной. Этот период охлаждения называют регулярным режимом. По истечении достаточно большого промежутка времени наступает третий – стационарный режим с постоянным распределением температуры тела во времени.

Коэффициент теплопроводности находится из соотношения [5]:

$$\lambda = \frac{Q}{t_{c1} - t_{c2}} K, \quad (1)$$

где  $Q$  – тепловой поток, Вт;  $t_{c1}, t_{c2}$  – соответственно температура нижнего и верхнего слоя материала, °С;  $K$  – коэффициент формы исследуемого материала, для неограниченного плоского тела рассчитывается по формуле [4]:

$$K = \frac{\delta}{F_p}, \quad (2)$$

где  $\delta$  – толщина плоского слоя, м;  $F_p$  – расчетная площадь поверхности, нормальной к направлению теплового потока, м<sup>2</sup>.

Для регулярного режима, теория которого разработана Г. М. Кондратьевым, температура тела во времени изменяется по экспоненциальному закону [5]:

$$\vartheta = Ae^{-m\tau}, \quad (3)$$

где  $\vartheta$  – избыточная температура:  $\vartheta = |t_{ж} - t|$ ,  $t, t_{ж}$  – соответственно температура тела и окружающей среды;  $m$  – темп нагрева;  $\tau$  – время;  $A$  – константа.

Величина  $m$  характеризует интенсивность охлаждения (нагрева) тела, то есть скорость изменения температуры тела в данной точке, и называется темпом охлаждения или нагрева. Темп охлаждения зависит от формы и размеров тела, его физических свойств (коэффициента теплопроводности, теплоемкости, плотности) и от граничных условий, характеризуемых коэффициентом теплоотдачи.

График изменения избыточной температуры тела во времени приведен на рисунке 2 а. В полулогарифмических координатах он изображен на рисунке 2 б.

Наступление регулярного режима характеризуется тем, что кривая изменения  $\ln \vartheta = f(\tau)$  переходит в прямую линию, имеющую постоянный угловой коэффициент  $\varphi$  на графике (рисунок 2 б). Как видно, относительную скорость нагрева тела (темп нагрева) можно определить по тангенсу угла наклона прямой [5]:

$$m = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_1 - \tau_2}. \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет определить величину  $m$  (с) из опыта. Для этого измеренные в какой-нибудь точке тела избыточные температуры  $\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_n$  и соответствующие им отрезки времени  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$  необходимо отложить на полулогарифмическом графике  $\ln \vartheta = f(\tau)$ , на прямолинейном участке зависимости выбрать точки 1 и 2 и соответствующие им величины  $\ln \vartheta_1, \ln \vartheta_2, \tau_1, \tau_2$  подставить в формулу (4). При достаточно больших значениях коэффициента теплоотдачи темп охлаждения оказывается пропорциональным коэффициенту температуропроводности (вторая теорема Кондратьева Г. М.) [6]:

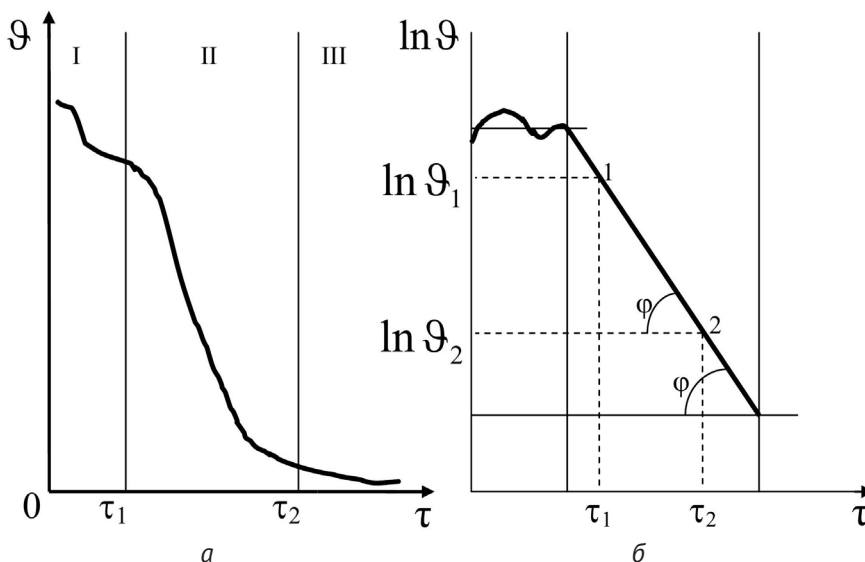


Рисунок 2 – Изменение избыточной температуры во времени (а) и в полулогарифмических координатах (б)

$$a = K'm \quad (5)$$

где  $K'$  – коэффициент формы, характеризующий геометрическую форму и размеры тела.

Коэффициент формы для неограниченной пластины [5]:

$$K' = (2\delta/\pi)^2 \quad (6)$$

где  $\delta$  – толщина плоского слоя,  $m^2$ .

Для проведения испытаний предприятием ООО «АКОТЕРМ ФЛАКС» были предоставлены образцы нетканых полотен.

Образцы выкраиваются размером 100x200 мм и маркируются порядковым номером. Характеристики материала представлены в таблице 1 [7].

Эксперимент проводится при следующих установленных значениях: мощность теплового потока  $Q = 100 \text{ Вт}$ , расчетная площадь поверхности, нормальная к направлению теплового потока, –  $F_p = 0,02 \text{ м}^2$ .

По последним значениям температур поверхности определяется разность температур между верхней и нижней сторонами исследуемой пробы. Значения данных приведены на рисунке 3 в виде гистограммы.

Далее рассчитывается коэффициент формы по формуле (2). По формуле (1) рассчитывается коэффициент теплопроводности. Эксперимент

Таблица 1 – Основные характеристики нетканых материалов

№ образца	Толщина образца, мм	Защитный слой	Начальная температура образца, $T_0, ^\circ\text{C}$
1	15	Алюминиевая фольга	22
2	15	–	22
3	12	Алюминиевая фольга	22
4	12	–	22
5	35	Алюминиевая фольга	22
6	35	–	22

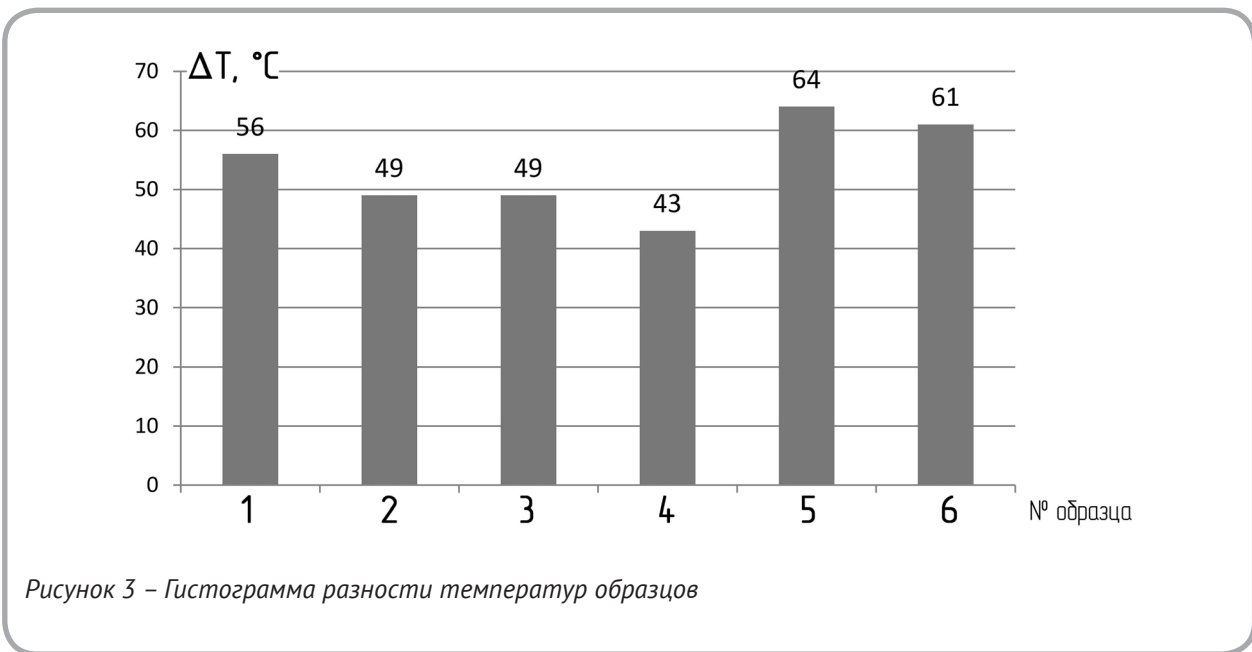


Рисунок 3 – Гистограмма разности температур образцов

по определению теплопроводности считается завершённым, если изменение значения температуры не превышает 0,5 градуса в минуту. При таком незначительном изменении температуры процесс будем считать стационарным. График изменения температур образцов № 1 и № 2 по времени представлен на рисунке 4. Для остальных образцов материалов графики изменения температуры по времени строятся аналогично.

Область 1 на графике является неупорядоченной стадией процесса нагревания, характеризующей начальное развитие теплового процесса. Область 2 является регулярным режимом, при котором скорость изменения температуры во всех точках тела становится постоянной. Область 3 является стационарным режимом с постоянным распределением температуры тела во времени. Из графика видно, что образец № 1, имеющий защитный фольгированный слой, нагревается медленней, чем образец № 2, а после достижения верхней поверхности образцов температур  $T_1 = 44\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $T_2 = 51\text{ }^{\circ}\text{C}$  процесс нагрева замедляется и составляет не более 0,5  $^{\circ}\text{C}$ . Это означает, что процесс теплообмена стационарен и эксперимент считается завершённым.

На основании данных выводов к рисунку 4 построим график изменения температуры в по-

лулогарифмических координатах для образца № 1 (рисунок 5). Для остальных образцов графики строятся аналогично.

Темп нагрева определяется по формуле (4). Коэффициент формы  $K'$  определяется по формуле (6). Коэффициент теплопроводности определяется по формуле (5). Данные расчета основных теплофизических свойств нетканых материалов приведены в таблице 2.

Сравнительный анализ основных теплофизических свойств нетканых материалов показывает, что основные теплофизические свойства в значительной степени зависят от толщины нетканого материала. Образцы, имеющие защитное покрытие в виде алюминиевой фольги, имеют коэффициенты теплопроводности и теплопроводности на 4–5 % ниже, в сравнении с образцами, не имеющими защитного покрытия.

Собранная экспериментальная установка и использованная методика позволяет оперативно определять теплофизические свойства нетканых материалов, значения их коэффициентов теплопроводности и температуропроводности, устойчивости к воздействию теплового потока, тем самым определяется область применения существующих и вновь проектируемых материалов.

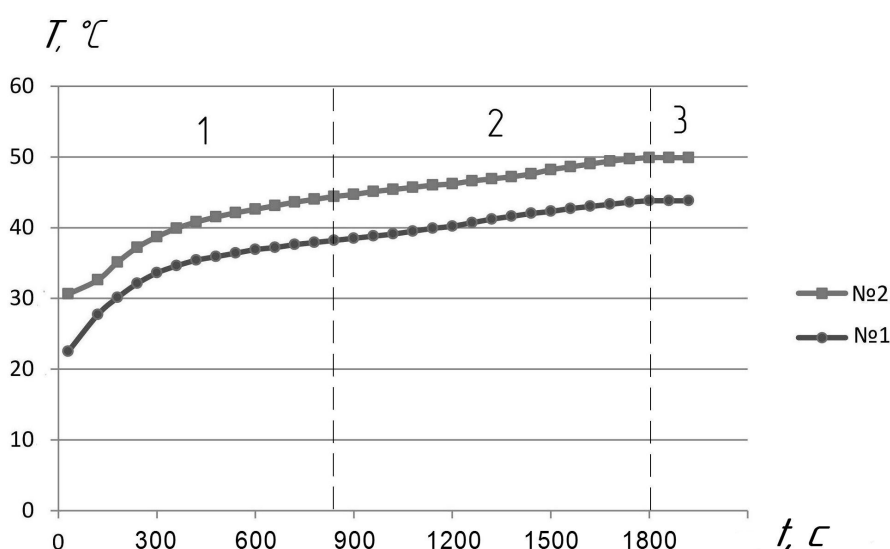


Рисунок 4 – Графики зависимости изменения температуры верхних поверхностей образцов № 1 и № 2 по времени

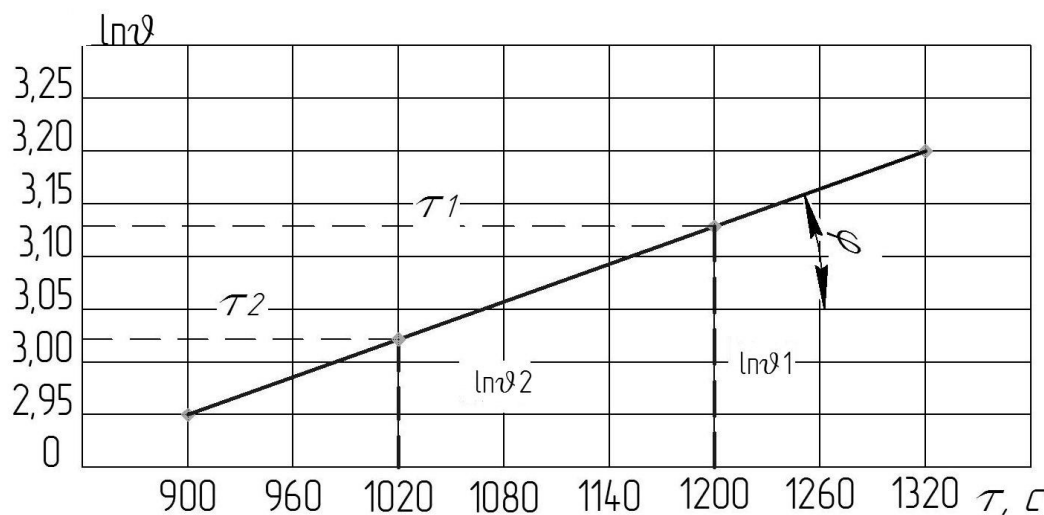


Рисунок 5 – График изменения избыточной температуры образца № 1 в полулогарифмических координатах

Таблица 2 – Значения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности

№ образца	Коэффициент формы $K, м^2$	Коэффициент теплопроводности $\lambda, Вт/(м \cdot К)$	Коэффициент формы $K', м^2$	Темп нагрева $t, с$	Коэффициент температуропроводности $\alpha, м^2/с$
1	0,75	0,22	$9,13 \cdot 10^{-5}$	0,0495	$4,52 \cdot 10^{-6}$
2	0,75	0,23	$9,13 \cdot 10^{-5}$	0,0499	$4,56 \cdot 10^{-6}$
3	0,6	0,17	$5,84 \cdot 10^{-5}$	0,0493	$2,88 \cdot 10^{-6}$
4	0,6	0,19	$5,84 \cdot 10^{-5}$	0,05	$2,92 \cdot 10^{-6}$
5	1,75	0,5	$4,96 \cdot 10^{-4}$	0,483	$2,40 \cdot 10^{-5}$
6	1,75	0,53	$4,96 \cdot 10^{-4}$	0,05	$2,48 \cdot 10^{-5}$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дмитракович, Н. М., Русецкий, Ю. Г., Шарай, М. Т. (2015), Исследование теплофизических свойств дублированных текстильных материалов и применением термостойких клеевых соединений, *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация*, 2015, № 7(17), С. 118–123.

REFERENCES

1. Dmitrakovich, N. M., Rusetskiy, YU. G., Sharay, M. T. (2015), Investigation of the thermophysical properties of duplicated textile materials and the use of heat-resistant adhesive joints [Issledovaniye teplofizicheskikh svoystv dublirovannykh tekstil'nykh materialov i primeneniye termostoykikh kleyevykh soyedineniy], *Chrezvychaynyye situatsii: preduprezhdeniye i likvidatsiya*

2. Зими́на, Е. Л., Скобо́ва, Н. В., Соколов Л. Е., Гришанова, С. С. (2019), Технологии переработки отходов химического волокна коврового производства, *Химические волокна*, 2019, № 1, С. 23–25.
3. Гусаров, А. М., Кузнецов, А. А., Дмитракович, Н. М. (2014), Исследование распределения температуры в многослойном пакете материалов боевой одежды пожарных при тепловом воздействии, *Вести Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*, 2014, № 4, С. 87–93
4. Парманчук, В. В., Ольшанский, В. И. (2014), Теплофизические свойства многослойных теплоизоляционных материалов, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2014, № 27, С. 87–93.
5. Лыков, А. В. (1967), *Теория теплопроводности*, Москва, Высшая школа, 600 с.
6. Осипов, В. А. (1969), *Экспериментальное исследование процессов теплообмена*, Москва, Энергия, 391 с.
7. Zimina, E. L., Ul'yanova, N. V., Vashchenko, O. D. (2021), Development of technology for production of sound insulation materials from waste, *Fibre Chemistry*, 2021, Vol. 52, № 1, pp. 362–365.
- tsiya – Emergencies: prevention and response*, 2015, № 7(17), pp. 118–123.
2. Zimina, E. L., Skobova, N. V., Sokolov, L. E., Grishanova, S. S. (2019), Technologies for recycling chemical fiber waste from carpet production [Tekhnologii pererabotki othodov himicheskogo volokna kovrovogo proizvodstva], *Himicheskie volokna – Chemical fibers*, 2019, № 1, pp. 23–25.
3. Gusarov, A. M., Kuznetsov, A. A., Dmitrakovich, N. M. (2014), Investigation of the temperature distribution in a multilayer package of materials for combat clothing of firefighters under thermal exposure [Issledovaniye raspredeleniya temperatury v mnogoslnoy nom pakete materialov boyevoy odezhdy pozharnykh pri teplovom vozdeystvi], *Vesti Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk – News from the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Technology Series*, 2014, № 4, pp. 87–93.
4. Parmanchuk, V. V., Olshanskiy, V. I. (2014), Thermophysical properties of multilayer thermal insulation materials [Teplofizicheskiye svoystva mnogoslnoy nykh teploizolyatsionnykh materialov], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta – Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2014, № 27, pp. 87–93.
5. Lykov, A. V. (1967), *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity], Moscow, Higher school, 600 p.
6. Osipov, V. A. (1969), *Eksperimental'noe issledovanie processov teploobmena* [Experimental study of heat exchange processes], Moscow, Energy, 391 p.
7. Zimina, E. L., Ul'yanova, N. V., Vashchenko, O. D. (2021), Development of technology for production of sound insulation materials from waste, *Fibre Chemistry*, 2021, Vol. 52, № 1, pp. 362–365.

Статья поступила в редакцию 25.05.2021 г.