

**АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД В ИССЛЕДОВАНИИ  
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ\***

**ANALYTICAL APPROACH IN RESEARCH  
THERMAL PROPERTIES OF NON-WOVEN MATERIALS**

*Е.В. МЕЗЕНЦЕВА, В.Ю. МИШАКОВ, О.О. ЕРОФЕЕВ*

*E.V. MEZENTSEVA, V.YU. MISHAKOV, O.O. EROFEEV*

**(Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство),  
ООО "Термопол",  
ООО "ТК Иннотек")**

**(Russian state University named after A.N. Kosygin (Technology. Design. Art),  
Thermopol, LLC,  
TK Innotek, LLC)**

E-mail: yelena\_ev@mail.ru; viktormishakov@rambler.ru

*Важнейшим теплозащитным параметром в спецодежде является показатель суммарного теплового сопротивления. В частности, утепляющая прослойка из объемного нетканого материала несет основную теплозащитную функцию. В данной статье была рассмотрена методика расчета суммарного теплового сопротивления, где выведены корреляционные зависимости от экспериментальных значений, позволяющие прогнозировать теплозащиту утеплителя для производителей материалов и изделий.*

*The most important heat-protective parameter in workwear is the indicator of the total thermal resistance. In particular, an insulating layer made of a bulky nonwoven material has the main heat-shielding function. In this article, the methodology for calculating the total thermal resistance was considered, where the correlation dependences on the experimental values were derived, which allow predicting the thermal protection of insulation for manufacturers of materials and products.*

**Ключевые слова:** нетканые материалы, утеплители, микроволокно, КОНО-2, Фишер, корреляция, поверхность отклика, нулевая гипотеза.

**Keywords:** nonwovens, insulation, microfiber, KONO-2, Fisher, correlation, response surface, null hypothesis.

Изучение теплофизических характеристик спецодежды всегда являлось определяющим при оснащении работников разных профессий. Спецодежда работника со-

стоит из нескольких слоев текстильных материалов различных по структуре, свойствам и назначению. Ткань верхнего слоя выполняет первичную защиту в зависимо-

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-38-90010.

\* Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number №19-38-90010.

сти от сферы применения, обеспечивая эстетическую составляющую и комфортность носки. Ветрозащитные мембраны при необходимости защищают от потоков холодного воздуха. Безусловно, основную теплозащитную функцию выполняет утеплитель из объемного термоскрепленного нетканого материала. Подкладочная ткань завершает конструкцию спецодежды.

Теплофизические свойства любой спецодежды особенно в зимний период характеризуются показателем суммарного теплового сопротивления, коэффициентом теплопроводности, удельной теплоемкостью [1]. Обычно производители спецодежды используют нетканые материалы поверхностной плотностью 100 и 150 г/м<sup>2</sup> в один или несколько слоев обеспечивая защиту от переохлаждения. Для этих значений показатели суммарного теплового сопротивления должны быть больше значений 0,25 и 0,45°С·м<sup>2</sup>/Вт, соответственно [2].

Прогнозирование показателей качества конечного продукта является насущной задачей как для исследователей, так и для производителей [3].

В эксперименте проводилось исследование свойств термоскрепленных нетканых материалов по плану КОНО-2. В качестве варьируемых факторов были выбраны поверхностная плотность материала (100-200 г/м<sup>2</sup> с интервалом 50) и результирующая линейная плотность волокна (1,8...6,2 дтекс с интервалом 2,2). Образцы вырабатывались из смеси штапельных полиэфирных и бикомпонентных волокон с одинаковым режимом термообработки 150°С. Готовые образцы подвергали испытаниям по определению толщины и суммарного теплового сопротивления нетканого материала. Зачастую экспериментальные значения теплового сопротивления утеплителя не представляют полной картины, поэтому их определяют расчетным путем [4].

Суммарное тепловое сопротивление материала ( $R_0$ ) – есть сумма теплового сопротивления материала ( $R_M$ ) и конвективной теплоотдачи ( $R_K$ ) с поверхности материала представлено в формуле 1.

$$R_0 = R_M + R_K. \quad (1)$$

По физическому смыслу тепловое сопротивление материала  $R_M$  – это величина, обратно-пропорциональная коэффициенту теплопередачи ( $K$ ) или как отношение толщины материала ( $\delta$ , м) к коэффициенту теплопроводности ( $\lambda$ , Вт/м<sup>2</sup>·°С).

Конвективная теплоотдача ( $R_K$ ) определяется как обратное значение теплоотдачи ( $\beta$ ). При температуре 50°С теплоотдача составляет  $\beta=11,39$  Вт/м<sup>2</sup>·°С (именно это значение является пороговым на приборе при нагревании), откуда  $R_K = 0,0878$  м<sup>2</sup>·°С/Вт.

Коэффициент теплопроводности характеризуется отношением количества проходящего теплового потока ( $Q$ , Вт/м<sup>2</sup>) через материал определенной толщины, регистрируя разность температур ( $\Delta t$ , °С) и время прохождения тепла ( $\tau$ , с) (формула 2).

$$\lambda = \frac{Q \cdot \delta}{\tau \Delta t} = \frac{\delta}{R_0} = K\delta. \quad (2)$$

При расчетах тепловых характеристик также важны коэффициенты удельной теплоемкости ( $c$ , Дж/кг·°С) и температуропроводности ( $a$ , м<sup>2</sup>/с). Коэффициент удельной теплоемкости характеризует аккумуляцию тепловой энергии при изменении температуры, а коэффициент температуропроводности характеризует способность материала к нагреву (формула 3).

$$a = \frac{\lambda}{C_v} = \frac{\lambda}{c\gamma} = \frac{\delta^2}{\tau}, \quad (3)$$

где  $\gamma$  – объемная масса материала, г/м<sup>3</sup>;  $C_v$  – объемная теплоемкость материала, Дж/(м<sup>3</sup>·°С).

Принимая во внимание, что в эксперименте используются только полиэфирные волокна, то теплоемкость их составляет:  $c = 15$  Дж/кг·°С.

Для волокнистого материала характерен показатель пористости. Обратным показателем пористости для волокнистого материала является относительная плотность материала (или "плотность упаковки").

Плотность упаковки материала есть отношение объемной плотности материала к объемной плотности волокна (формула 4):

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\delta_{\text{мат}}}{\delta_{\text{вол}}}\right) \cdot 100\% = (1 - \alpha) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{m_{\text{мат}}}{H \cdot \delta_{\text{вол}}}\right) \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $\delta_{\text{вол}}$  – плотность волокна, г/см<sup>3</sup>;  $\alpha$  – относительная плотность материала или плотность его упаковки;  $m_{\text{мат}}$  – поверхностная плотность материала, г/м<sup>2</sup>;

В виду того, что микропористая система состоит из штапельных синтетических волокон, главным показателем которых является линейная плотность волокна ( $T$ , текс). Отношение линейной плотности волокна к плотности полимера ( $\varphi$ ) называется толщиной волокнистого слоя ( $\omega$ ), которая показывает заполняемость площади материала штапельными волокнами. Показатель толщины волокнистого слоя тождественен коэффициенту температуропроводности в случае одинаковой плотности полимера. Толщина волокнистого слоя представлена в формуле 5:

$$\omega = \frac{T}{\varphi}. \quad (5)$$

В любом случае, отношение коэффициента теплопроводности материала к удельной теплоемкости, есть зависимость результирующей линейной плотности волокна к относительной плотности материала [5...7], [11], [12] (формула 6).

$$\frac{\lambda}{c} = \omega \gamma = T \frac{\gamma}{\varphi} = T \alpha. \quad (6)$$

Поэтому достаточно просто можно определить коэффициент теплопроводности волокнистого материала при изменении линейной плотности волокна, удельной теплоемкости и плотности упаковки (формула 7).

$$\lambda = T \alpha c. \quad (7)$$

Далее расчетным путем определяем суммарное тепловое сопротивление, а затем сравниваем их с экспериментальными, получаем корреляцию. Результаты экспериментальных и расчетных значений в соответствии с использованной рабочей матрицей эксперимента представлена в табл. 1 (рабочая матрица предварительного эксперимента).

Т а б л и ц а 1

№ образца	Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	Результирующая линейная плотность, текс	Толщина, мм	Суммарное тепловое сопротивление, м <sup>2</sup> ·°С/Вт	
				экспериментальное	расчетное
1	150	0,40	15,0	0,557	0,606
2	200	0,62	25,0	0,592	0,552
3	100	0,62	16,0	0,391	0,466
4	100	0,18	8,0	0,353	0,415
5	200	0,18	13,0	0,735	0,736
6	200	0,40	18,0	0,730	0,647
7	150	0,62	21,0	0,483	0,524
8	100	0,40	12,0	0,378	0,419
9	150	0,18	10,0	0,545	0,599

Анализ полученных экспериментальных (рис. 1 – поверхность отклика зависимости суммарного теплового сопротивления (экспериментального) от линейной плотности волокон и поверхностной плотности нетканого материала) и расчетных (рис. 2 – поверхность отклика зависимости

суммарного теплового сопротивления (расчетного) от линейной плотности волокон и поверхностной плотности нетканого материала) значений суммарного теплового сопротивления позволил сделать вывод, что при поверхностной плотности материала 100 г/м<sup>2</sup> наивысшие показатели суммарного

теплового сопротивления у материала из волокон с результирующей линейной плотностью 6,2 дтекс. Они обеспечивают объ-

емную пористую структуру в отличие от материалов с меньшим диаметром, имеющие низкие показатели толщины.

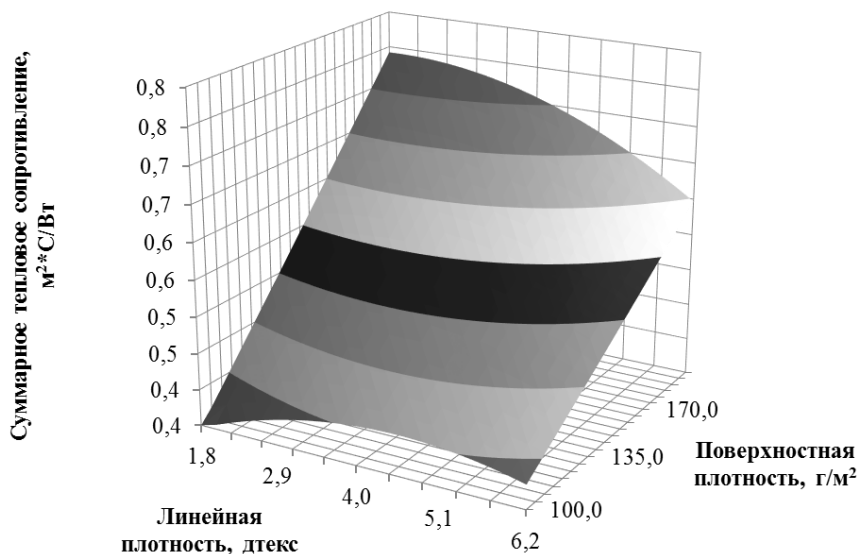


Рис. 1

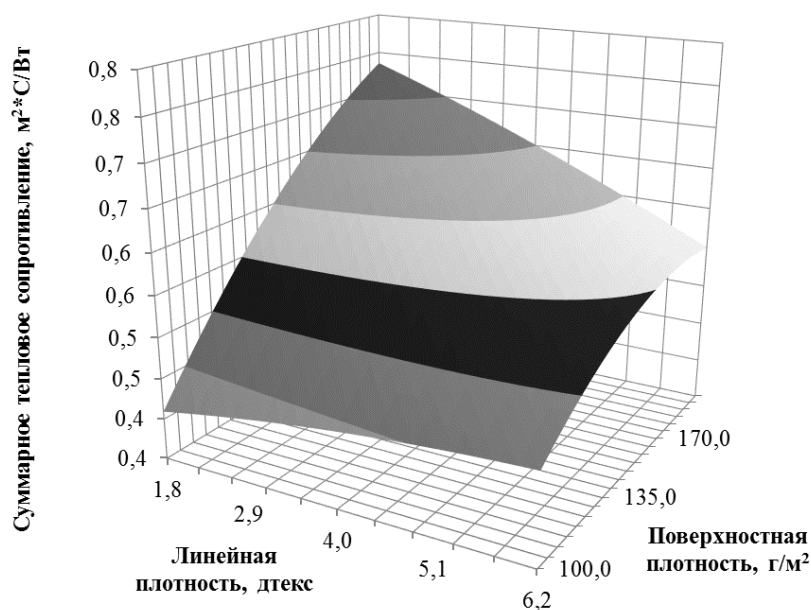


Рис. 2

С увеличением поверхностной плотности утеплителя до 150...200 г/м<sup>2</sup> для волокон 6,2 дтекс рост суммарного теплового сопротивления происходит незначительно из-за увеличения размера пор в межволоконной структуре, поэтому уступает волокнам 1,8 и 4,4 дтекс.

Для поверхностной плотности материала 150 г/м<sup>2</sup> утеплители с результирующей линейной плотностью волокон 1,8 и 4,4 дтекс показывают наивысшие тепловые показатели причем волокна с большим диаметром превосходят утеплители из волокон 1,8 дтекс, обеспечивая оптимум.

С увеличением поверхностной плотности материала до 200 г/м<sup>2</sup> растет естественным путем пористость, поэтому имеется обратная зависимость роста суммарного теплового сопротивления от снижения линейной плотностью волокон до 1,8 дтекс.

Для анализа связи между экспериментальными и расчетными значениями суммарного теплового сопротивления был проведен корреляционный анализ. Для выполнения данной задачи подсчитывалось значение простого парного коэффициента корреляции.

Коэффициент корреляции рассчитывали по формуле 8:

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}, \quad (8)$$

где  $x_i$  и  $y_i$  – значения случайных величин, между которыми исследуется связь;  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  – средние значения случайных величин.

Коэффициент корреляции рассчитывался для определения связи между экспериментальными ( $x$ ) и расчетными ( $y$ ) значениями суммарного теплового сопротивления.

$$r_{xy} = 0,95.$$

Для расчета ошибки коэффициента корреляции использовалась формула 9:

$$m_r = \frac{1 - r_{xy}^2}{\sqrt{n - 1}}, \quad (9)$$

где  $n$  – количество исследуемых образцов = 9.

В данном случае имеем:

$$m_r = 0,03.$$

Ориентировочно можно считать, что если абсолютное значение коэффициента корреляции в три раза больше его ошибки, то имеет место связь между случайными величинами.

В рассматриваемом случае выполнялось условие  $r > 3m_r$  ( $0,95 > 0,10$ ), соответственно имеется связь между экспериментальными и расчетными значениями показателя суммарного теплового сопротивления.

Зная величину коэффициента корреляции  $r$ , можно дать качественную оценку силы связи между переменными. С целью классификации силы связи обычно использовали шкалу Чеддока (табл. 2 – шкала Чеддока для классификации силы связи) [8].

Т а б л и ц а 2

Величина коэффициента множественной корреляции, $r$	Оценка силы связи
0,10...0,30	Слабая
0,30...0,50	Умеренная
0,50...0,70	Заметная
0,70...0,90	Высокая
0,90...0,99	Весьма высокая

В рассматриваемом случае, согласно шкале Чеддока, связь между переменными можно считать весьма высокой.

Представим корреляционную связь в виде графика (рис. 3 – корреляционная связь между расчетным и экспериментальными значениями суммарного теплового сопротивления).

Обозначим линию тренда, которая дает общую картину того, как изменяются зна-

чения в зависимой переменной в ответ на изменение независимой переменной. Представим уравнение зависимости, найденное путем однофакторного дисперсионного анализа, методом наименьших квадратов. Обозначим коэффициент детерминации  $R^2$ , который позволяет дать эффективную оценку регрессионной модели, определить меру ее качества.

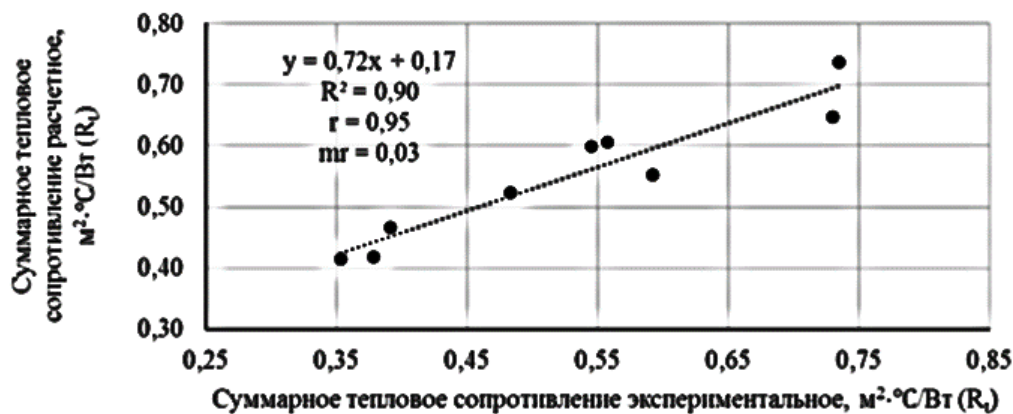


Рис. 3

Максимальное значение коэффициента детерминации равно единице. В этом случае линия регрессии точно соответствует всем наблюдениям. Если в выборке отсутствует связь между  $x$  и  $y$ , то величина коэффициента детерминации будет близка к нулю.

Допустимые значения для коэффициента детерминации, следующие: 0,01...0,09 – связь слабая; 0,09...0,49 – связь средняя; 0,49...1,00 – связь достаточно сильная (использование полученной регрессионной модели в анализе теоретически обосновано) [8].

По имеющемуся коэффициенту корреляции можно рассчитать коэффициент детерминации (формулы 10; 11):

$$r_{xy} = \sqrt{R^2}, \quad (10)$$

$$R^2 = r_{xy}^2. \quad (11)$$

В рассматриваемом случае  $R^2 = 0,90$ , что говорит имеющейся достаточно сильной связи и использование полученной регрессионной модели в анализе теоретически обосновано.

Сравним экспериментальные и расчетные ряды данных путем проверки однородности их дисперсий, это позволит оценить равно ли математическое ожидание показателей их экспериментальному значению.

Решение данной задачи осуществляется на практике путем проверки статистических гипотез [9].

В данном случае необходимо установить, являются ли дисперсии выборочной совокупности двух рядов значений  $S_1^2 \neq S_2^2$  со степенями свободы  $m_1$  и  $m_2$  значительно отличающимися или они близки и могут быть приняты в качестве значений одного и того же процесса или явления в генеральной совокупности значений.

Нулевая гипотеза в этом случае не отвергается для дисперсий  $\sigma^2$  в генеральной совокупности:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2.$$

Возможно два варианта альтернативной гипотезы:

$$H_1^{(1)}: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2;$$

$$H_1^{(2)}: \sigma_1^2 > \sigma_2^2.$$

Вариант гипотезы  $H_1^{(3)}: \sigma_1^2 < \sigma_2^2$  целесообразно не рассматривать при условии  $S_1^2 > S_2^2$ .

Для сравнения двух дисперсий используется F-критерий Фишера [10] – это отношение двух дисперсий, где  $S_1^2 > S_2^2$ :

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}. \quad (12)$$

При выбранном уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , границы критической области устанавливаются по таблицам квантилей F – распределения для числа степеней свободы  $m_1 = n_1 - 1$  и  $m_2 = n_2 - 1$ .

Нулевую гипотезу принимают, то есть полагают, что  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$  при выполнении одной из альтернативных гипотез:

$$F \leq F_{(\frac{\alpha}{2})m_1m_2} \text{ при } H_1^{(1)}: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

$$F \leq F_{\alpha m_1m_2} \text{ при } H_1^{(2)}: \sigma_1^2 > \sigma_2^2.$$

В случае подтверждения нулевой гипотезы, по двум выборочным дисперсиям, в дальнейшем возможно использование любого из двух рядов данных в качестве достоверной характеристики процесса.

В рассматриваемом случае статистика критерия Фишера:

$$F = \frac{0,02}{0,01} = 1,76.$$

Критическая область при  $m_1=m_2=9-1=8$ , имеем  $F_{0,03;8;8} = 4,43$  и  $F_{0,05;8;8} = 3,44$ .

Подсчитанное значение статистики  $F=1,76$  не попадает в критическую область по первой альтернативной гипотезе ( $1,76 < 4,43$ ), также как и по второй альтернативной гипотезе ( $1,76 < 3,44$ ). Следовательно, нулевая гипотеза  $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$  не отвергается.

## ВЫВОДЫ

1. Исходя из проведенных расчетов можно сказать, что полученные значения в результате эксперимента, равно как и значения полученные в результате применения равенства 7 равны между собой. При этом в случае анализа суммарного теплового сопротивления более широкого диапазона поверхностных плотностей и линейной плотности волокон, полученный результат будет сохраняться при доверительной вероятности 95%.

2. Приведенные данные для расчета теплофизических характеристик утеплителя позволяют прогнозировать использование штапельных волокон малого диаметра в том числе из микроволокон (до 1 дтекс). Особенно это необходимо при получении значений на оборудовании при определении суммарного теплового сопро-

тивления, где можно проанализировать отклонения от расчетных значений, используя корреляционный метод.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мезенцева Е.В., Мишаков Ю.В. Выбор определяющих показателей качества теплоизоляционных нетканых материалов эвристическим методом // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 2019, №1. С. 39...45.
2. ГОСТ Р 57027–2016. Полотна нетканые термоскрепленные объемные синтетические. Общие технические условия. – Введ. 2017-08-01. – М.: Стандартиформ, 2016. – 8 с.
3. Хакимуллин Ю.Н., Лисаневич М.С., Галимзянова Р.Ю., Шакиров Б.Л. Прогнозирование долговечности ламинированного нетканого материала, стерилизованного ионизирующим излучением // Вестник технологического университета. – 2015. Т.18. № 17. С. 120...122.
4. Молькова И.В. Разработка пакетов материалов для одежды специального назначения и исследование их теплозащитных свойств: Дис...канд. техн. наук. – Иваново, 2004.
5. Горчакова В.М., Сергеенков А.П., Волоцик Т.Е. Оборудование для производства нетканых материалов. – М.: РГУ имени А.Н. Косыгина: ООО "Совъяз Бево", 2006. Ч.2.
6. Козинда З.Ю., Подгаевская Т.А., Ерофеев О.О., Логинов В.И., Игнатова И.Д., Архиреев К.Э., Герасименко С.В. Исследования теплофизических свойств текстильных материалов для боевой одежды пожарного // Пожарная безопасность. – 2016, № 2. С. 71...78.
7. Мезенцева Е.В., Мишаков В.Ю., Готовкина М.С. Утепленная верхняя одежда: социологический анализ предпочтений россиян // Дизайн и технологии. – 2018, № 65(107). С. 122...130.
8. Афанасьев В.Н., Леушина Т.В., Лебедева Т.В., Цыпин А.П. Эконометрика. – Оренбург: ОГУ, 2012.
9. Севостьянов А.Г. Методы и средства исследования механико-технологических процессов текстильной промышленности. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2007.
10. Fisher R. The Design of Experiments (6th ed.). – London: Oliver and Boyd, 1951.
11. Советников Д.А., Мишаков В.Ю., Павлов М.А., Кирсанова Е.А., Трещалин Ю.М. Теоретическое исследование волокнистых материалов с целью расчета и прогнозирования теплофизических свойств // Дизайн и технологии. – 2007, № 57 (99). С.86...91.
12. Мишаков В.Ю., Советников Д.А., Павлов М.А., Кирсанова Е.А. Разработка метода анализа и расчета эффективного коэффициента теплопроводности нетканого теплоизоляционного материала // Theoretical & Applied Science. – 2017, № 7 (51). С.21...27.

## REFERENCES

1. Mezentseva E.V., Mishakov Yu.V. Vybor opredelyayushchikh pokazateley kachestva teploizolyatsionnykh netkanykh materialov evristicheskim metodom // *Izv. vuzov. Tekhnologiya legkoy promyshlennosti.* – 2019, №1. S. 39...45.
2. GOST R 57027–2016. Polotna netkanye termoskrepennye ob"emnye sinteticheskie. Obshchie tekhnicheskie usloviya. – Vved. 2017-08-01. – M.: Standartinform, 2016. – 8 s.
3. Khakimullin Yu.N., Lisanevich M.S., Galimzyanova R.Yu., Shakirov B.L. Prognozirovaniye dolgovechnosti laminirovanogo netkanogo materiala, sterilizovannogo ioniziruyushchim izlucheniem // *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta.* – 2015. T. 18. №17. S. 120...122.
4. Mol'kova I.V. Razrabotka paketov materialov dlya odezhdy spetsial'nogo naznacheniya i issledovaniye ikh teplozashchitnykh svoystv: Dis....kand. tekhn. nauk. – Ivanovo, 2004.
5. Gorchakova V.M., Sergeenkov A.P., Voloshchik T.E. Oborudovaniye dlya proizvodstva netkanykh materialov. – M.: RGU imeni A.N. Kosygina: OOO "Sov"yazh Bevo", 2006. Ch.2.
6. Kozinda Z.Yu., Podgaevskaya T.A., Erofeev O.O., Loginov V.I., Ignatova I.D., Arkhireev K.E., Gerasimenko S.V. Issledovaniya teplofizicheskikh svoystv tekstil'nykh materialov dlya boevoy odezhdy pozharnogo // *Pozharnaya bezopasnost'.* – 2016, № 2. S.71...78.
7. Mezentseva E.V., Mishakov V.Yu., Gotovkina M.S. Uteplennaya verkhnyaya odezhda: sotsiologicheskii analiz predpochteniy rossiyan // *Dizayn i tekhnologii.* – 2018, № 65(107). S. 122...130.
8. Afanas'ev V.N., Leushina T.V., Lebedeva T.V., Tsyplin A.P. *Ekonometrika.* – Orenburg: OGU, 2012.
9. Sevost'yanov A.G. *Metody i sredstva issledovaniya mekhaniko-tekhnologicheskikh protsessov tekstil'noy promyshlennosti.* – M.: MGTU im. A.N. Kosygina, 2007.
10. Fisher R. *The Design of Experiments (6th ed.).* – London: Oliver and Boyd, 1951.
11. Sovetnikov D.A., Mishakov V.Yu., Pavlov M.A., Kirsanova E.A., Treshchalin Yu.M. Teoreticheskoe issledovaniye voloknistykh materialov s tsel'yu rascheta i prognozirovaniya teplofizicheskikh svoystv // *Dizayn i tekhnologii.* – 2007, № 57 (99). S. 86...91.
12. Mishakov V.Yu., Sovetnikov D.A., Pavlov M.A., Kirsanova E.A. Razrabotka metoda analiza i rascheta effektivnogo koeffitsienta teploprovodnosti netkanogo teploizolyatsionnogo materiala // *Theoretical & Applied Science.* – 2017, № 7 (51). S. 21...27.

Рекомендована кафедрой коммерции и сервиса.  
Поступила 18.10.19.