

Научный журнал «Костюмология» / Journal of Clothing Science <https://kostumologiya.ru>

2021, №4, Том 6 / 2021, No 4, Vol 6 <https://kostumologiya.ru/issue-4-2021.html>

URL статьи: <https://kostumologiya.ru/PDF/17TLKL421.pdf>

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Шарпар, Н. М. Исследование теплоотдачи нетканых материалов для проектирования теплозащитной одежды / Н. М. Шарпар, Л. И. Жмакин, С. Г. Алексеев, М. В. Ляхов // Костюмология. — 2021. — Т. 6. — № 4. — URL: <https://kostumologiya.ru/PDF/17TLKL421.pdf>

**For citation:**

Sharpar N.M., Zhmakin L.I., Alekseev S.G., Lyakhov M.V. Investigation of heat transfer of nonwovens for the design of heat-protective clothing. *Journal of Clothing Science*, 4(6): 17TLKL421. Available at: <https://kostumologiya.ru/PDF/17TLKL421.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 677.076.4:536.2

ГРНТИ 64.29.81

### **Шарпар Николай Михайлович**

ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство)», Москва, Россия

Доцент

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: [sharpar753@mail.ru](mailto:sharpar753@mail.ru)

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=744693](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=744693)

Researcher ID: <https://www.researcherid.com/rid/E-5345-2014>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=54401776000>

### **Жмакин Леонид Иванович**

ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство)», Москва, Россия

Профессор

Доктор технических наук, профессор

E-mail: [li\\_zhmakin@mail.ru](mailto:li_zhmakin@mail.ru)

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=26045](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=26045)

### **Алексеев Сергей Глебович**

ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство)», Москва, Россия

Преподаватель

E-mail: [sergoalexeev@gmail.com](mailto:sergoalexeev@gmail.com)

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1041503](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1041503)

### **Ляхов Максим Викторович**

ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина  
(Технологии. Дизайн. Искусство)», Москва, Россия

Магистр

E-mail: [maxlyakhov8@gmail.com](mailto:maxlyakhov8@gmail.com)

## **Исследование теплоотдачи нетканых материалов для проектирования теплозащитной одежды**

**Аннотация.** В настоящее время широко развиваются разные виды спортивно-оздоровительного отдыха, активного туризма. Двигательная активность относится к важному аспекту при укреплении и поддержании здоровья людей, а также восстановлении их работоспособности. Невзирая на большой ассортимент одежды для активной деятельности

(рыбной ловли, туризма и др.), вопросы, связанные с проектированием одежды для рассматриваемого вида, остаются чрезвычайно актуальными, т. к. имеющиеся изделия не всегда способны обеспечить комфортные условия для самочувствия человека.

В статье рассмотрены исследования теплоотдачи нетканых материалов входящих в пакет зимней одежды, используемой для активного отдыха. При помощи одежды формируется микроклимат, способный обеспечить комфортные условия и нормальное работоспособное состояние человека при ее эксплуатации.

Существенные требования, направленные на потребительские свойства и качество современной зимней одежды, устанавливают ее реализуемость на рынке. Одними из наиболее значимых среди предъявляемого спектра параметров, к нетканым материалам используемых при изготовлении одежды являются теплозащитные. Они описывают способность защиты организма человека от перегрева и теплопотерь при разных температурных режимах. Предельное значение, получается, по средствам оценки теплозащитных показателей при проектировании зимней и демисезонной одежды, либо спецодежды.

В статье разработана методика определения коэффициента объемной теплоотдачи нетканых материалов, в ее основе находятся зависимости, описывающие процессы, осуществляемые в рабочей зоне прибора и исследуемом материале при выполнении испытаний.

Создан универсальный измерительный прибор для определения объемной теплоотдачи нетканых материалов входящих в пакет зимней и демисезонной одежды, что позволяет осуществлять испытания в условиях, близких к их реальным эксплуатационным условиям.

По результатам выполненных экспериментальных исследований, полученные данные позволили определить температурные поля при фильтрации воздуха в рассматриваемых нетканых материалах.

**Ключевые слова:** одежда; нетканые материалы; фильтрация; объемная теплоотдача; теплозащитные свойства одежды; пористость

## Введение

Ежедневно повышается численность людей, занимающихся зимними видами спортивной деятельности, рыбалкой и туризмом. Осуществляется это благодаря повышению качества здорового образа жизни, обеспечивая человеку душевное, социальное и физическое благополучие. К значительной части активного спортивного отдыха относят горный туризм и отдых, где погодные условия обусловлены порывистым ветренным потоком и сниженной температурой. При рассмотрении данной ситуации выполнение спортивных занятий связано с угрозой гипотермии для организма. При учете степени различной активности в подобных климатических условиях возникает вопрос о сбережении здоровья гораздо острее. Благодаря повышенной популярности активного зимнего спортивного вида деятельности увеличивается спрос на одежду теплозащитного назначения для различных возрастных категорий [1].

Следует обратить внимание на то, что теплозащитная одежда, предназначенная для активного образа жизни. Она должна соответствовать высоким потребительским показателям теплозащитных свойств, защищать от воздействия внешних погодных условий ветра, влаги, пониженных температур в окружающей среде. А также не воспрепятствовать выведению влаги, защищать в гипобиозе организм от переохлаждения и не вызывать появления теплового удара при осуществлении интенсивных физических упражнений [2].

Методики современного проектирования одежды теплозащитного назначения позволяют выполнить вычисление теплоизоляционного комплекса [3–5]<sup>1</sup>, однако не принимают во внимание своеобразие изменения характеристик утеплителя при реальных эксплуатационных условиях. Обширный сектор современных нетканых материалов, разновидности их конструкторского решения, в целом изделия обуславливают осуществление процессов проектирования [6]. В процессе разработки теплозащитного пакета для одежды весьма существенно не только определить величину теплоизоляционного покрытия, но также провести оценку ее соответствия реальным эксплуатационным условиям [1].

Существенная роль в поддержании теплового нормального состояния организма человека в неблагоприятных условиях с окружающей средой принадлежит одежде. Этот аспект проектирования одежды для необходимых климатических условий определяется таким образом, чтобы подобрать такие компоненты из текстильных материалов, которые способны обеспечить нормальную работоспособность и жизнедеятельность человека в подобных условиях. В частном случае, разработка специальной одежды для спортивной деятельности [7], предназначена в качестве защиты человека от неблагоприятных, вредных влияний окружающей среды [8; 9], данная задача сводится к подбору определенного состава компонентов одежды, обеспечивающего наиболее длительное функционирование по продолжительности пребывания человека во вредных условиях при осуществлении спецодеждой ее защитных функций [10; 11].

Нетканые материалы, представляют собой капиллярно-пористые среды, в которых вероятна фильтрация воздуха. Здесь требуется принять во внимание, что теплота, подведенная извне к поверхности нетканого материала, направляется внутрь пористого слоя теплопроводной матрицы<sup>2,3</sup> и переходит фильтруемому воздушному потоку по средствам объемной теплоотдачи. Благодаря широкой теплообменной поверхности воздуха и волокон осуществляется процесс теплопереноса, который заметно интенсифицируется в слое пористой матрицы. Подобным образом, при перемещении по порам холодного воздуха, процесс охлаждения осуществляется быстрее.

**Цель исследования** — провести экспериментальное исследование объемной теплоотдачи для выявления дополнительных теплофизических особенностей теплозащитной одежды, выполненной на базе нетканых материалов.

### Методика исследования

Воздух движется через разветвленную сеть внутренних пор и микроканалов, существующих в волокнистом слое, их суммарная площадь весьма велика по сравнению с площадью его внешних поверхностей. Поскольку площадь контакта воздушного потока с развитой поверхностью микроканалов обычно не определена, то интенсивность конвективного теплообмена в порах принято описывать при помощи объемного коэффициента теплоотдачи  $\alpha_V$ , обладающего размерностью  $Vm/(m^3K)$ . Это обусловлено весьма хаотичной и сложной геометрией внутренних каналов пористого тела, которые обладают разными размерами и

---

<sup>1</sup> Черунова, И.В. Совершенствование методов проектирования специальной одежды для горноспасателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.19.04. Шахты, 2001. — 192 с.

<sup>2</sup> Корнюхин И.П., Жмакин Л.И. Тепломассообмен в пористых телах. М.: Информ-электро, 2000. — 236 с.

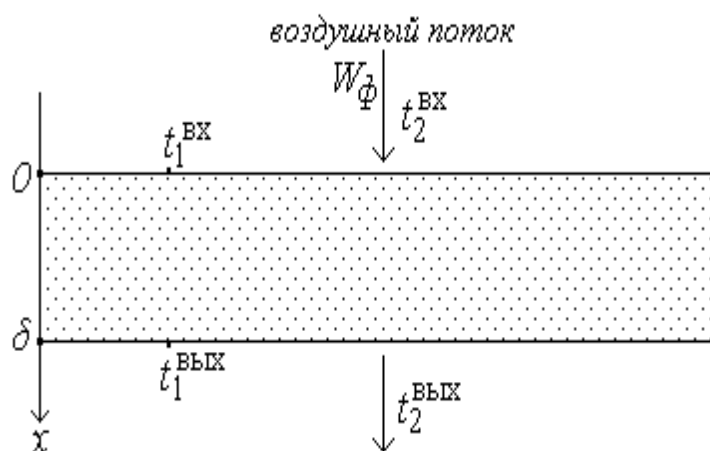
<sup>3</sup> Пелевин Ф.В. Теплообмен и гидравлическое сопротивление в пористых сетчатых материалах. Труды 2-й Российской национальной конференции по теплообмену. М., 1998, Т. 5. С. 254–257.

формами поперечного сечения. Величина коэффициента объемной теплоотдачи устраивается согласно выражению:

$$\alpha_v = \alpha_f S_v,$$

в котором  $\alpha_f$  ( $Bm/(m^2K)$ ), — средний коэффициент теплоотдачи отдельных элементов матричного нетканого каркаса к воздуху, а  $S_v$  ( $m^2/m^3$ ) — удельная смоченная поверхность пор в расчете на единицу объема пористой среды.

Для описания объемной теплоотдачи [12; 13]<sup>4</sup> в статье разбирается перенос теплоты между взаимопроникающими средами. Теплопроводность пористой матрицы считается изотропной, а ее теплофизические свойства так же, как и свойства воздуха не зависящими от температуры. Разберем стационарную задачу теплопереноса в одномерном приближении, когда направления распространения теплового потока в матрице и движения газа в ней параллельны. Расчетная схема такой задачи приведена на рисунке 1 [14].



**Рисунок 1.** Расчетная схема продуваемого пористого слоя

При этих допущениях температурные распределения в матрице и движущемся через нее воздухе описываются системой из двух линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \lambda_1 \frac{d^2 t_1}{dx^2} - \alpha_v (t_1 - t_2) &= 0 \\ \rho_2 c_p w \frac{dt_2}{dx} &= \lambda_2 \frac{d^2 t_2}{dx^2} + \alpha_v (t_1 - t_2). \end{aligned} \quad (1)$$

Первое представляет собой дифференциальное уравнение теплопроводности пористой матрицы, а второе — уравнение энергии для газа. В системе (1) применены следующие обозначения: индексы «1» и «2» относятся к матрице и газу, соответственно;  $w$  — средняя скорость движения воздуха в микроканалах;  $\alpha_v$  — объемный коэффициент теплоотдачи;  $\rho$  — плотность;  $t$  — температура;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $c_p$  — изобарная теплоемкость;  $x$  — координата поперек пористой пластины.

В уравнениях (1) выражение  $\alpha_v (t_1 - t_2)$  можно разбирать, как некоторый источниковый член; он обладает размерностью  $Bm/m^3$  и описывает сток тепла к газу от матрицы по средствам

<sup>4</sup> Шарпар Н.М., Жмакин Л.И., Османов З.Н. Эффективность теплообмена при вынужденной конвекции теплоносителя (воздух) через пористые слои капиллярно-пористого текстильного материала. Хим. волокна, 2014. № 2. — С. 56–59.

конвективного теплообмена между ними. Средняя скорость воздуха в микроканалах связана со скоростью фильтрации  $w_\phi$  выражением  $w = w_\phi / \Pi$ , где  $\Pi$  — пористость. Последняя определяется как доля объема пористого тела, занятого пустотами или как  $\Pi = 1 - \rho_{nm} / \rho_{ms}$ , где  $\rho_{nm}$  и  $\rho_{ms}$  — плотности пористого и монолитного материала. У пористости существует и поверхностный аналог; его называют просветностью и находят как часть пустот в некотором сечении пористого тела. У пористых изотропных сред пористость совпадает с просветностью.

Если пренебречь кондуктивным теплопереносом в движущемся воздухе, то уравнение энергии в системе (1) будет иметь следующий вид:

$$g_2 c_{p2} \frac{dt_2}{dx} = \alpha_v (t_1 - t_2), \quad (2)$$

где  $g_2 = \rho_2 w_\phi$  — удельный расход воздуха через пористый слой ( $кг/м^2с$ ). По существу, уравнение (2) представляет приращение энтальпии воздуха через пористую матрицу по средствам объемной теплоотдачи.

Разберем алгоритм решения записанных ранее уравнений. Обратим внимание на то, что для каждого момента времени у элементарных слоев пористой матрицы  $dx$  справедливы балансовые соотношения вида  $Q_T = Q_K = Q_H$ . Они формулируют равенства по трем тепловым потокам: — переданного теплопроводностью каркаса, воспринятого в итоге конвекции газом и направленного на повышение его энтальпии. Таким образом, можно представить данное выражение в виде:

$$\lambda_1 \frac{d^2 t_1}{dx^2} = \alpha_v (t_1 - t_2) = g_2 c_{p2} \frac{dt_2}{dx}. \quad (3)$$

Сначала разберем равенство  $Q_T = Q_H$  и проведем его интегрирование по координате  $x$ . Тогда запишем:

$$\lambda_1 \frac{dt_1}{dx} = g_2 c_{p2} (t_2 - t_2^{ex})$$

откуда производная:

$$\frac{dt_1}{dx} = \frac{g_2 c_{p2}}{\lambda_1} (t_2 - t_2^{ex}). \quad (4)$$

Согласно выражению (4)  $t_2^{ex}$  — температура воздуха на входе в пористый слой, а константа интегрирования равна нулю, поэтому в любом сечении матрицы осуществляются балансовые соотношения (3). На основе рассматриваемых соотношений производную от температуры воздуха по координате можно записать двойственно:

$$\frac{dt_2}{dx} = \frac{\lambda_1}{g_2 c_{p2}} \cdot \frac{d^2 t_1}{dx^2} = \frac{\alpha_v}{g_2 c_{p2}} \cdot (t_1 - t_2), \quad (5)$$

причем первое равенство найдено из дифференцирования зависимости (4) по координате.

Исключим теперь температуру воздуха, определив ее при помощи формулы (4):

$$t_2 = t_2^{ex} + \frac{\lambda_1}{g_2 c_{p2}} \frac{dt_1}{dx} \quad (6)$$

Подстановка уравнения (6) в соотношение (5) приводит к следующему дифференциальному уравнению записанное для температуры каркаса пористого слоя:

$$\frac{\lambda_1}{g_2 c_{p2}} \cdot \frac{d^2 t_1}{dx^2} = \frac{\alpha_v}{g_2 c_{p2}} \cdot \left( t_1 - t_2^{6x} - \frac{\lambda_1}{g_2 c_{p2}} \cdot \frac{dt_1}{dx} \right).$$

Введем избыточную температуру каркаса  $\theta_1 = t_1 - t_2^{6x}$  и упростим это уравнение; в итоге получим:

$$\frac{d^2 \theta_1}{dx^2} + \frac{\alpha_v}{g_2 c_{p2}} \cdot \frac{d\theta_1}{dx} - \frac{\alpha_v}{\lambda_1} \cdot \theta_1 = 0 \quad (7)$$

Согласно общепринятой классификации [15] уравнение (7) выступает в роли линейного дифференциального уравнения 2-го порядка без правой части с постоянными коэффициентами. Процедура его решения стандартна. Записывается характеристическое уравнение вида:

$$r^2 + pr + q = 0,$$

затем определяются его корни:

$$r_{1,2} = -p/2 \pm \sqrt{(p^2/4 - q)}.$$

В нашем конкретном случае параметры  $p = \frac{\alpha_v}{g_2 c_{p2}}$ ;  $q = -\frac{\alpha_v}{\lambda_1}$ , т. е. дискриминант характеристического уравнения всегда будет положителен. При этом оно обладает двумя неравными действительными корнями, а общее его решение будет иметь вид:

$$\theta_1(x) = C_1 e^{r_1 x} + C_2 e^{r_2 x}. \quad (8)$$

Продифференцировав (8) и подставив найденный результат в соотношение (6), определим распределение избыточной температуры в воздухе, перемещающегося в плоской пористой матрице:

$$\theta_2(x) = t_2 - t_2^{6x} = \frac{\lambda_1}{g_2 c_{p2}} \cdot \frac{d\theta_1}{dx} = \frac{\lambda_1}{g_2 c_{p2}} (C_1 r_1 e^{r_1 x} + C_2 r_2 e^{r_2 x}). \quad (9)$$

В уравнения (8) и (9) включены аналогичные константы  $C_1$  и  $C_2$ . Для их поиска требуется задать два граничных условия. Запишем эти условия для верхней стенки пористого слоя. Будем считать, что при  $x=0$  (см. рис. 1) известны температуры приходящего воздуха и на поверхности исследуемого нетканого материала. Следовательно, при  $x=0$ ,  $\theta_2 = 0$ ,  $\theta_1 = \theta_1^*$ .

Соответствующие уравнения для констант примут следующий вид:

$$\begin{aligned} C_1 + C_2 &= \theta_1^*, \\ C_1 r_1 + C_2 r_2 &= 0, \end{aligned}$$

их решение примет следующий вид:

$$C_1 = \frac{r_2}{r_2 - r_1} \theta_1^*; \quad C_2 = -\frac{r_1}{r_2 - r_1} \theta_1^*. \quad (10)$$



В дальнейшем уравнения (8) и (9) с константами интегрирования (10) были применены для поиска коэффициентов объемной теплоотдачи при течении воздуха через слой нетканого материала. Для этого в статье рассматривалось решение обратной задачи теплопереноса, когда по экспериментально найденным температурам на верхней поверхности пористого слоя и воздуха при входе в него были установлены граничные условия при  $x = 0$  и определен общий вид уравнений для температурных полей [16]. Единственной неизвестной величиной в рассматриваемых уравнениях является коэффициент объемной теплоотдачи, содержащийся в параметрах  $p$  и  $q$ . Так как температуры на нижней поверхности слоя и воздуха при выходе были также определены в ходе проведения экспериментов, то после их подстановки в уравнения температурных полей можно было вычислить неизвестный коэффициент объемной теплоотдачи для нетканого материала [12; 13]<sup>4</sup>. Структурные и теплофизические характеристики образцов нетканого материала, необходимые при решении обратной задачи были определены ранее.

По результатам температурных измерений на верхней поверхности при  $x = 0$  (рис. 1) формировались граничные условия для температурных полей, описываемых уравнениями (8) и (9), и определялись неизвестные константы  $C_1$  и  $C_2$ . Температуры на нижней поверхности при  $x = \delta$  были также найдены из экспериментов, поэтому для поиска корней характеристического уравнения можно записать систему нелинейных уравнений [17]:

$$\begin{aligned} \theta_1(\delta) &= \frac{r_2}{r_2 - r_1} \theta_1^* \exp(r_1 \delta) - \frac{r_1}{r_2 - r_1} \theta_1^* \exp(r_2 \delta) \\ \theta_2(\delta) &= \frac{\lambda_1}{g_2 c_{p2}} \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} \theta_1^* [\exp(r_1 \delta) - \exp(r_2 \delta)] \end{aligned} \quad (11)$$

Обозначения всех величин в этих уравнениях были даны выше.

Система (11) решалась численно в среде «Mathcad». Поскольку установленные значения корней характеристического уравнения связаны с коэффициентом объемной теплоотдачи соотношением:

$$r_1 + r_2 = -p = -\frac{\alpha_v}{g_2 c_{p2}}, \quad (12)$$

то отсюда  $\alpha_v = -g_2 c_{p2} (r_1 + r_2)$ .

Объемная теплоотдача исследовалась также рядом авторов [18–20]. Ими определены уравнения для металлических сеток и других волокнистых структур.

Так, к примеру, в [18] представлено следующее критериальное уравнение для числа Нуссельта при перемещении воздуха в порах материалов, изготовленных плетением проволочных сеток:

$$\overline{Nu_d} = 0,26 \Pi^{2,8} \text{Re}_d^{1,2} (\overline{\delta})^{-1}, \quad (13)$$

где  $\overline{Nu_d} = \frac{\alpha_v d_n^2}{\lambda_g}$ ;  $\text{Re}_d = \frac{w_n d_n}{\nu_g}$ ;  $(\overline{\delta}) = \frac{\delta}{\delta_0}$ . При расчете числа Рейнольдса применяется

средний диаметр поровых каналов  $d_n$  и средняя скорость воздуха в порах  $w_n$ , а при поиске безразмерной толщины стенки принят условный масштаб  $\delta_0 = 1$  мм. Остальные обозначения в (13) встречались ранее и не требуют пояснений. Вычисления объемной теплоотдачи были выполнены при следующих условиях: толщина слоя Геолавсана  $\delta = 2,5$  мм, эффективный

диаметр пор  $d_n = 52,2$  мкм; пористость  $\Pi = 0,83$ ; толщина слоя войлока  $\delta = 4$  мм, эффективный диаметр пор  $d_n = 31,9$  мкм; пористость  $\Pi = 0,54$  [21].

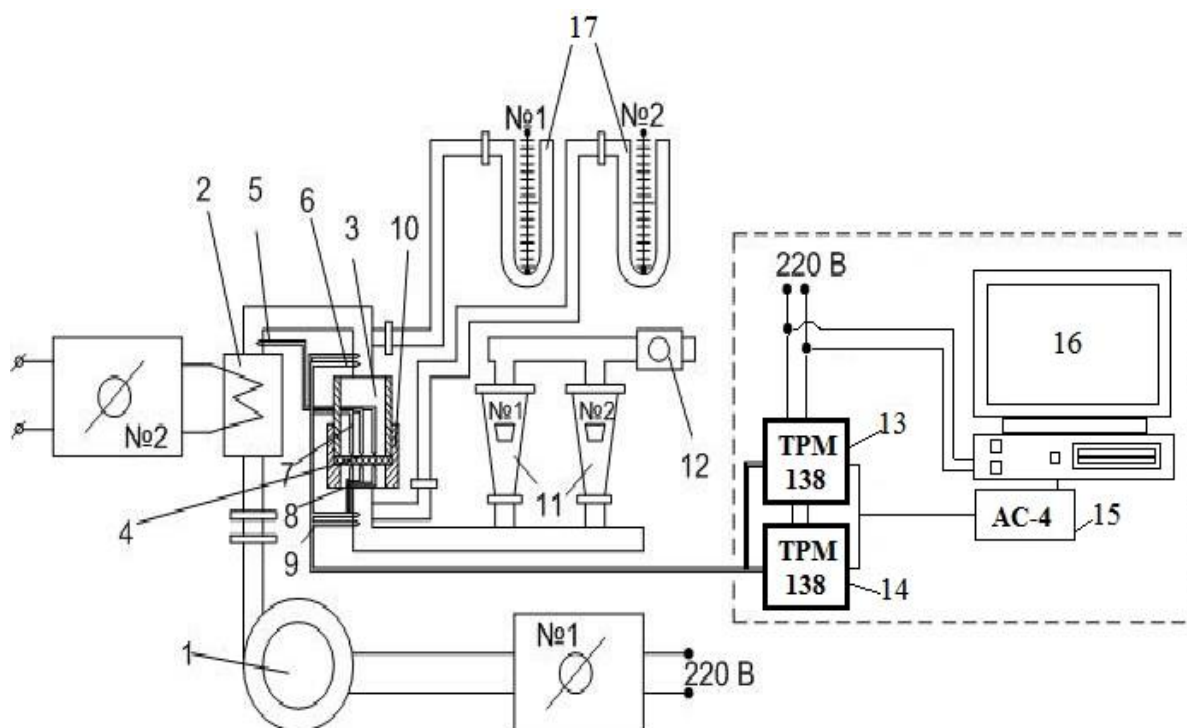
Другое критериальное уравнение для объемной теплоотдачи представлено в [14] и имеет более простой вид:

$$Nu = 0,004 Re Pr \cdot \quad (14)$$

Критерии Рейнольдса и Нуссельта найдены здесь так же, как и в (13); отличие составляет лишь качество характерного размера принят не диаметр поровых каналов ( $d_n$ ), а средний диаметр волокон ( $d_v$ ), формирующих пористое тело. Тогда разбирается наружное обтекание элементов его структуры (внешний теплообмен), а не движение газа в поровых каналах тела (внутренний теплообмен).

### Схема экспериментального прибора для исследования объемной теплоотдачи

Прибор для исследования объемной теплоотдачи изображен на рисунке 2 [12; 13]<sup>4</sup>. Его основным элементом можно считать разборный рабочий участок, в верхней 3 и нижней 10 зоне которого размещены спай хромель-копелевых термопар. По его периметру установлено по три термопары 7 и 8, как приведено на схеме (рис. 2).



**Рисунок 2.** Схема экспериментального прибора для исследования объемной теплоотдачи

Исследуемый образец 4 нетканого материала диаметром 50 мм расположен на специальной площадке в рабочей зоне 10; снизу к поверхности материала примыкают три термопары 8. К нижней зоне 10 примыкает верхняя 3, она прижимает материал к площадке. Температура на верхней поверхности образца, также определялась при помощи трех термопар 7, расположенных по периметру. Вентилятор 1 обеспечивал движение воздуха через печь 2; регулировка мощности вентилятора и нагревателя проводилась с помощью лабораторных автотрансформаторов № 1 и № 2, соответственно. Температура воздуха после прохождения нагревателя определялась по термопаре 5. Далее горячий воздух направлялся по



направляющему каналу, в котором находилась еще пара термопар 6 определяющие температуру воздуха непосредственно перед рабочей зоной, и затем воздушный поток проходил сквозь исследуемый образец и покидая впоследствии рабочую зону. Его температура на выходе определялась по двум термопарам 9, установленным в воздухоотводящем канале. Сигнал термоЭДС со всех термопар поступал на два ПИД-регулятора фирмы «Овен» марки ТРМ-138 13, 14, соединенных по каналу связи RS-485 с блоком контроллера марки АС-4 15 той же фирмы. Контроллер АС-4 был подключен к персональному компьютеру 16. Скорость потока устанавливалась по двум ротаметрам 11 с различными диапазонами измерений, его расход регистрировался также газовым счетчиком 12. Для определения давлений воздуха до и после рабочей зоны служила пара жидкостных U-образных манометров 17.

После запуска прибора и выхода его на стационарный температурный режим выполнялись многократные измерения скоростей и температур воздуха на входе и выходе из рабочей зоны. Также измерялись температуры на верхней и нижней поверхностях образца. Полученные данные усреднялись.

### Результаты

В таблице представлены значения температур, измеренных при разных скоростях продува образцов нагретым воздухом, и коэффициентов объемной теплоотдачи, вычисленных по описанной ранее методике. Эксперименты проводились на образцах войлоков (ТшрА (4 мм), ПГшрА (8 мм) и ГшрА (10 мм)) и полиэфиров (Синтепон (2,5 мм); ГеоЛавсана (2,5 мм) и НП АРТ.С-10 (2 мм)) в диапазоне скоростей фильтрации воздуха 0,197...0,354 м/с. Обозначения температур в этой таблице отвечает приведенным на рисунке 1, а все избыточные температуры найдены как в уравнении (7).

Таблица

Результаты коэффициентов объемной теплоотдачи нетканых материалов

Наименование	$W_{\phi}$ , м/с	$t_2^{ex}$ , °C	$\theta_1^{ex}$ , °C	$\theta_1^{oblx}$ , °C	$\theta_2^{oblx}$ , °C	$\alpha_v$ , Вт/(м <sup>3</sup> ·К)
НП АРТ.С-10 $\delta = 2$ мм	0,197	57,6	-1,9	-6,2	-8,1	6710
	0,219	57,8	-2,1	-5,9	-7,4	7220
	0,254	58,1	-2,4	-5,8	-6,6	8190
	0,354	58,3	-2,6	-5,7	-6,5	8760
Синтепон $\delta = 2,5$ мм	0,197	57,3	-1,2	-2,1	-2,5	8820
	0,219	57,4	-1,2	-1,9	-2,3	9125
	0,254	57,6	-0,5	-1,6	-2,1	9430
	0,354	57,8	-0,3	-0,5	-1,4	9570
ГеоЛавсан $\delta = 2,5$ мм	0,197	57,6	-1,8	-6,6	-9,9	9210
	0,219	57,7	-1,9	-6,5	-9,4	9330
	0,254	57,8	-2	-6,3	-8	9570
	0,354	57,8	-2	-6,0	-6,6	9690
Войлок ТшрА $\delta = 4$ мм	0,197	57,5	-2,5	-9,4	-11,2	3970
	0,219	57,6	-2,2	-7,5	-9,9	4340
	0,254	57,7	-2,2	-6,6	-8,4	4750
	0,354	57,9	-2,3	-6,1	-7,7	5370
Войлок ПГшрА $\delta = 8$ мм	0,197	58,2	-2,8	-13,3	-19,6	1680
	0,219	58,5	-3,0	-10,6	-15,7	1840
	0,254	57,7	-2,1	-7,7	-10,6	2110
	0,354	57,8	-2,1	-6,3	-9	2320
Войлок ГшрА $\delta = 10$ мм	0,197	58,1	-3,0	-18,6	-22,6	1360
	0,219	58,2	-3,0	-18,3	-24,4	1520
	0,254	58,3	-3,0	-13,1	-17,8	1710
	0,354	58,6	-3,2	-8,2	-13,9	1840

На рисунке 3 рассмотрены экспериментальные зависимости коэффициентов объемной теплоотдачи в представленных в статье нетканых материалах от скорости фильтрации воздуха.

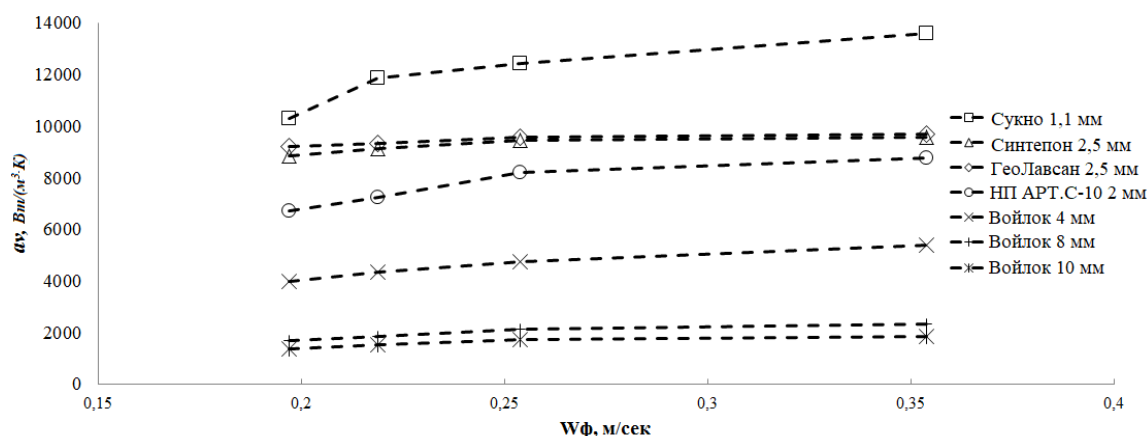


Рисунок 3. Коэффициент объемной теплоотдачи в слое

### Выводы

Разработана методика и создан экспериментальный прибор для исследования коэффициентов объемной теплоотдачи при течении воздуха в слое нетканого материала. Полученные данные позволили рассчитать температурные поля при фильтрации воздуха в нем.

Как видно, коэффициенты объемной теплоотдачи, рассчитанные по различным уравнениям, существенно различаются (в 2,7...3,6 раз), причем с увеличением скорости фильтрации различие возрастает. Порядок величины этих коэффициентов  $10^3 \dots 10^4$ , т. е. при фильтрации газа через пористое тело теплообмен заметно интенсифицируется. Однако для получения надежных данных по объемной теплоотдаче необходимо проведение экспериментов на конкретных образцах пористых материалов, которые затем предполагается применять в теплозащитной одежде. Использование литературных данных других авторов может привести к некорректным результатам.

Экспериментальные данные по коэффициенту объемной теплоотдачи имеют большое практическое значение, т. к. позволяют рассчитать температурные поля в продуваемом образце нетканого материала с помощью уравнений (8) и (9). В таблице показано, как изменяются избыточные температуры нетканого слоя ( $\theta_1$ ) и воздуха ( $\theta_2$ ) по толщине для четырех скоростей фильтрации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Рукавишникова А.С. Экспериментальная оценка теплозащитных свойств комплекта одежды с использованием компьютерных технологий // Инженерный вестник Дона, № 1, 2018 — URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4762](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4762).
2. Cherunova I., S. Samarbakhsh and N. Kornev, 2016. CFD simulation of thermo-aerodynamic interaction in a system human cloth-environment under very low temperature and wind conditions. Proc. VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Crete, Greece, 5–10 June 2016. — Volume IV. — pp. 7703–7710.

3. Лопатченко Т.П., Рукавишников А.С. Исследование деформационных свойств объемных утепляющих материалов для проектирования одежды и снаряжения специального назначения. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2014. 178 с.
4. Афанасьева, Р.Ф. Полимерные материалы в производстве костюма для военнослужащих Арктики (сообщение 1) / Р.Ф. Афанасьева, Н.В. Тихонова, А.Б. Михайлов, Т.М. Осина, И.Д. Михайлова, В.Т. Прохоров // Вестник КГТУ, 2015. Т. 18. № 15. — С. 155–158.
5. Афанасьева, Р.Ф. Полимерные материалы в производстве костюма для военнослужащих Арктики (сообщение 2) / Р.Ф. Афанасьева, Н.В. Тихонова, А.Б. Михайлов, Т.М. Осина, И.Д. Михайлова, В.Т. Прохоров, С.Ю. Полухина // Вестник КГТУ, 2015. Т. 18. № 15. — С. 167–172.
6. Махоткина Л.Ю., Леонова Е.В., Макаров А.В., Марьина А.Н. Исследование свойств инновационных материалов для проектирования теплозащитной одежды // Вестник технол. ун-та, 2017. Т. 20. № 4 — С. 66–68.
7. Махоткина Л.Ю., Тихонова Н.В., Морозова И.И. Проектирование костюма для активного отдыха с улучшенными теплозащитными свойствами // Научный журнал «Костюмология», 2019 № 1, <https://kostumologiya.ru/PDF/06TLKL119.pdf>.
8. Мокеева Н.С., Заев В.А., Жилисбаева Р.О. Прогнозирование теплозащитных свойств многослойной одежды в условиях воздействия низких температур // Технология текстильной промышленности, 2016, № 5(365), — С. 65–68.
9. Прокопенко Л.В., Афанасьева Р.Ф., Бурмистрова О.В., Лосик Т.К. Критерии оценки холодового тресса работников с учетом тяжести выполняемой работы // Актуальные проблемы медицины труда. — 2018. — С. 450–465.
10. Савинова Л.А., Зарецкая Г.П. Разработка исходной информации для проектирования женского комплекта специальной одежды для защиты от пониженных температур // Научный журнал «Костюмология», 2019 № 2, <https://kostumologiya.ru/PDF/12TLKL219.pdf>.
11. Корнюхин И.П. Тепломассообмен в пористых телах: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук: (05.14.05) / [Гос. н.-и.] энерг. ин-т им. Г.М. Кржижановского. — М., 1991. — 32 с.
12. Sharpar N.M., Zhmakin, L.I., Osmanov, Z.N. Efficiency of heat transfer in the forced convection of a heat carrier (air) through the porous layers of a capillary porous textile. *Fibre Chemistry*, 2014. Т. 46. № 2. — С. 126–130.
13. Жмакин Л.И., Шарпар Н.М. Полимерные и текстильные материалы в установках солнечной энергетики: монография. — М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2021. — 195 с.
14. Шарпар Н.М. Разработка методов исследования теплофизических свойств нетканых материалов: Дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2013 — 135 с.
15. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1984. — 632 с.
16. Корнюхин И.П. Тепломассообмен в теплотехнике текстильных производств: Учебное пособие. — М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2004. — 598 с.

17. Шарпар Н.М., Османов З.Н. Экспериментальное исследование коэффициентов теплоотдачи теплоизоляционных материалов в условиях вынужденной конвекции воздуха. В сборнике: Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (Инновации-2016), 2016. — С. 299–302.
18. Теплообменные устройства газотурбинных и комбинированных установок // Под ред. А.И. Леонтьева — М: Машиностроение, 1985, 360 с.
19. Зейгарник Ю.А., Иванов Ф.П., Икрянников Н.П. Опытные данные по теплоотдаче и гидравлическому сопротивлению в неупорядоченных пористых структурах // Теплоэнергетика, 1991. № 2. С. 33–38.
20. Пелевин Ф.В. Теплообмен и гидравлическое сопротивление в пористых сетчатых материалах, Труды 2-й Российской национальной конференции по теплообмену. М.: 1998. т. 5. С. 254–257.
21. Шарпар Н.М., Жмакин Л.И., Суханов Д.С., Маркин Е.М. Определение пористости текстильных материалов капиллярным методом. В сборнике: Фундаментальные и прикладные научные исследования в области инклюзивного дизайна и технологий: опыт, практика и перспективы. Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. Москва, 2021. С. 46–50.

### **Sharpar Nikolai Mikhailovich**

Russian State University named A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia  
E-mail: sharpar753@mail.ru  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=744693](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=744693)  
Researcher ID: <https://www.researcherid.com/rid/E-5345-2014>  
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=54401776000>

### **Zhmakin Leonid Ivanovich**

Russian State University named A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia  
E-mail: li\_zhmakin@mail.ru  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=26045](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=26045)

### **Alekseev Sergey Glebovich**

Russian State University named A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia  
E-mail: sergoalexeev@gmail.com  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1041503](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1041503)

### **Lyakhov Maxim Viktorovich**

Russian State University named A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia  
E-mail: maxlyakhov8@gmail.com

## **Investigation of heat transfer of nonwovens for the design of heat-protective clothing**

**Abstract.** Currently, various types of sports and recreational recreation and active tourism are being widely developed. Motor activity is an important aspect in strengthening and maintaining people's health, as well as restoring their working capacity. Despite the large range of clothing for active activities (fishing, tourism, etc.), issues related to the design of clothing for the type in question remain extremely relevant, because the available products are not always able to provide comfortable conditions for human well-being.

The article considers the research of heat transfer of nonwovens included in the package of winter clothing used for outdoor activities. With the help of clothing, a microclimate is formed that can provide comfortable conditions and a normal working condition of a person during its operation.

Essential requirements aimed at consumer properties and quality of modern winter clothing establish its marketability. One of the most significant among the presented range of parameters for nonwovens used in the manufacture of clothing are heat-protective. They describe the ability to protect the human body from overheating and heat loss at different temperature conditions. The limit value, it turns out, by means of assessing heat-protective indicators when designing winter and demi-season clothing, or workwear.

The article develops a method for determining the volumetric heat transfer coefficient of nonwovens, it is based on dependencies describing the processes carried out in the working area of the device and the material under study during testing.

A universal measuring device has been created to determine the volumetric heat transfer of nonwovens included in the package of winter and demi-season clothing, which allows testing in conditions close to their actual operating conditions.

Based on the results of the experimental studies, the data obtained made it possible to determine the temperature fields during air filtration in the nonwovens under consideration.

**Keywords:** clothing; non-woven materials; filtration; volumetric heat transfer; heat-protective properties of clothing; porosity

## REFERENCES

1. Rukavishnikova A.S. Experimental evaluation of heat-protective properties of a set of clothes using computer technologies // Engineering Bulletin of the Don, № 1, 2018 — URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n1y2018/4762](http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2018/4762).
2. Cherunova I., S. Samarbakhsh and N. Kornev, 2016. CFD simulation of thermo-aerodynamic interaction in a system human cloth-environment under very low temperature and wind conditions. Proc. VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Crete, Greece, 5–10 June 2016. — Volume IV. — pp. 7703–7710.
3. Lopatchenko T.P., Rukavishnikova A.S. Study of the deformation properties of volumetric insulating materials for the design of clothing and equipment for special purposes. Rostov n/A: Publishing Center of DSTU, 2014. 178 p.
4. Afanasyeva, R.F. Polymer materials in the production of a suit for Arctic servicemen (message 1) / R.F. Afanasyeva, N.V. Tikhonova, A.B. Mikhailov, T.M. Osina, I.D. Mikhailova, V.T. Prokhorov // Bulletin of KSTU, 2015. T. 18. № 15. — pp. 155–158.
5. Afanasyeva, R.F. Polymer materials in the production of a suit for Arctic military personnel (message 2) / R.F. Afanasyeva, N.V. Tikhonova, A.B. Mikhailov, T.M. Osina, I.D. Mikhailova, V.T. Prokhorov, S.Yu. Polukhina // Bulletin of KSTU, 2015. T. 18. № 15. — pp. 167–172.
6. Makhotkina L.Yu., Leonova E.V., Makarov A.V., Maryina A.N. Investigation of the properties of innovative materials for the design of heat-protective clothing // Bulletin of technol. un-ta, 2017. T. 20. № 4 — pp. 66–68.
7. Makhotkina L.Yu., Tikhonova N.V., Morozova I.I. Designing a suit for outdoor activities with improved thermal protection properties // Scientific journal "Costumology", 2019 № 1, <https://kostumologiya.ru/PDF/06TLKL119.pdf>.
8. Mokeeva N.S., Zaev V.A., Zhilisbayeva R.O. Forecasting of heat-protective properties of multilayer clothing under conditions of exposure to low temperatures // Technology of textile industry, 2016, № 5(365), — pp. 65–68.
9. Prokopenko L.V., Afanasyeva R.F., Burmistrova O.V., Losik T.K. Criteria for assessing the cold stress of workers taking into account the severity of the work performed // Actual problems of occupational medicine. — 2018. — pp. 450–465.
10. Savinova L.A., Zaretskaya G.P. Development of initial information for designing a women's set of special clothing for protection from low temperatures // Scientific journal "Costumology", 2019 № 2, <https://kostumologiya.ru/PDF/12TLKL219.pdf>.
11. Korniyukhin I.P. Heat and mass transfer in porous bodies: Abstract. dis. on the job. learned. step. Doctor of Technical Sciences: (05.14.05) / [State Scientific and Technical] Energy Institute named after G.M. Krzhizhanovsky. — M., 1991. — 32 p.
12. Sharpar N.M., Zhmakin, L.I., Osmanov, Z.N. Efficiency of heat transfer in the forced convection of a heat carrier (air) through the porous layers of a capillary porous textile. Fibre Chemistry, 2014. T. 46. № 2. — S. 126–130.
13. Zhmakin L.I., Sharpar N.M. Polymer and textile materials in solar energy installations: monograph. — M.: Kosygin Russian State University, 2021. — 195 p.



14. Sharpar N.M. Development of methods for the study of thermophysical properties of nonwovens: Diss. ... Candidate of Technical Sciences. Moscow, 2013 — 135 p.
15. Korn G., Korn T. Handbook of Mathematics for scientists and engineers. — M.: Nauka, 1984. — 632 p.
16. Korniyukhin I.P. Heat and mass transfer in the heat engineering of textile industries: Textbook. — M.: Kosygin Moscow State Technical University, 2004. — 598 p.
17. Sharpar N.M., Osmanov Z.N. Experimental study of heat transfer coefficients of thermal insulation materials in conditions of forced air convection. In the collection: Design, technologies and innovations in the textile and light industry (Innovations-2016), 2016. — pp. 299–302.
18. Heat exchange devices of gas turbine and combined installations // Edited by A.I. Leontiev — M: Mechanical Engineering, 1985, 360 p.
19. Zeigarnik Yu.A., Ivanov F.P., Ikryannikov N.P. Experimental data on heat transfer and hydraulic resistance in disordered porous structures // Heat Power Engineering, 1991. № 2. pp. 33–38.
20. Pelevin F.V. Heat transfer and hydraulic resistance in porous mesh materials, Proceedings of the 2nd Russian National Conference on Heat Exchange. Moscow: 1998. T. 5. pp. 254–257.
21. Sharpar N.M., Zhmakin L.I., Sukhanov D.S., Markin E.M. Determination of porosity of textile materials by capillary method. In the collection: Fundamental and applied scientific research in the field of inclusive design and technology: experience, practice and prospects. Collection of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference. Moscow, 2021. pp. 46–50.