

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ
DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

УДК 536.24:0242
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-467-476>

Поступила в редакцию 24.06.2019
Received 24.06.2019

А. И. Ольшанский, Р. В. Окунев, А. М. Гусаров

Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА В КОМБИНИРОВАННЫХ ПАКЕТАХ ВОДОТЕРМОСТОЙКОЙ ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ

Аннотация. Представлены результаты исследования нестационарного теплообмена в комбинированных пакетах, предназначенных для создания специальной водотермостойкой защитной одежды пожарных от опасных и вредных факторов при проведении аварийно-спасательных и других неотложных работ с участием нетоксичных веществ, растворов кислот, щелочей, нефти и нефтепродуктов, жидких токсичных веществ, а также при работе в воде с температурой от 0 до 70 °С. Устойчивость пакетов материалов одежды исследовалась как нестационарный процесс теплообмена в многослойной пластине с идеальным тепловым контактом на стыках слоев. Неограниченная пластина нагревается с обеих сторон при различных условиях теплообмена по закону Ньютона, с постоянным воздействием теплового источника на одну из поверхностей, контактирующей с горячей жидкостью через водонепроницаемую тонкую поверхность. Вторая поверхность пластины взаимодействует с внешней средой, температура которой изменяется по линейному закону. При решении уравнения нестационарной теплопроводности с нелинейными коэффициентами переноса использовались методы линеаризации, основанные на аппроксимации нелинейных коэффициентов, такими, при которых нелинейные уравнения становятся приблизительно линейными. Весь процесс теплопереноса разбивается на множество малых временных интервалов в пределах, которых коэффициенты переноса постоянны. Зональным методом исследования нестационарной теплопроводности в пакетах одежды установлены уравнения для расчета температуры, плотностей тепловых потоков, распределения температуры по толщине пакетов одежды. Показано, что при принятых упрощениях расчета значения параметров хорошо согласуются с экспериментом. Установлен состав пакета одежды, соответствующий техническим требованиям ТУ ВУ 101 114 857.082-2015 «Комплекты индивидуальной защиты».

Ключевые слова: коэффициент теплопроводности, коэффициент теплообмена, коэффициент температуропроводности, плотность теплового потока, теплоемкость, плотность, водотермостойкая одежда

Для цитирования: Ольшанский, А. И. Исследование нестационарного теплообмена в комбинированных пакетах водотермостойкой защитной одежды пожарных / А. И. Ольшанский, Р. В. Окунев, А. М. Гусаров // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64, №4. – С. 467–476. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-467-476>

A. I. Ol'shanskii, R. V. Okunev, A. M. Gusarov

Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Belarus

STUDY ON NON-STATIONARY HEAT EXCHANGE IN COMBINED PACKAGES OF WATER-RESISTANT PROTECTIVE CLOTHING OF FIREFIGHTERS

Abstract. The results of research of non-stationary heat exchange in combined packages intended for creation of special water- and heat-resistant protective clothing of firefighters from dangerous and harmful factors during emergency rescue and other urgent works, with participation of non-toxic substances, acid solutions, alkalis, oil and petroleum products, liquid toxic substances, as well as during operation in water with temperature from 0 to 70 °C are presented. The stability of clothing material packs has been investigated as a transient heat exchange process in a multilayer plate with ideal thermal contact at the joints of the layers. The unlimited plate is heated on both sides under different heat exchange conditions according to Newton's Law,

with constant action of the heat source on one of the surfaces of the hot liquid contacting through the waterproof thin surface. Second surface of the plate interacts with external medium, temperature of which varies according to linear law. At solving the equation of non-stationary thermal conductivity with nonlinear transport coefficients, linearization methods are used based on the approximation of nonlinear coefficients, such that nonlinear equations become approximately linear. The entire heat transfer process is divided into a plurality of small-time intervals within which the transfer coefficients are constant. The zonal method of investigation of non-stationary thermal conductivity in clothing packages establishes equations for calculation of temperature, densities of thermal flows, distribution of temperature across thickness of clothing packages. It has been shown that under accepted calculation simplifications, parameter values are well consistent with the experiment. The composition of the clothing package is proposed, which meets the technical requirements of TU BY 10114857.082-2015 “Personal Protective Kits”.

Keywords: heat conductivity coefficient, heat exchange coefficient, thermal diffusivity coefficient, density of a heat flux, thermal capacity, density, water- and heat-resistant clothes

For citation: Ol’shanskii A. I., Okunev R. V., Gusarov A. M. Study on non-stationary heat exchange in combined packages of water-resistant protective clothing of firefighters. *Vestsi Natsyyanal’nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 4, pp. 467–476 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-4-467-476>

Введение. При решении задач, направленных на решение проблем ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, особое внимание уделяется проектированию специальной защитной одежды. Такие водотермостойкие костюмы наряду с другими видами индивидуальной защиты обеспечивают полный или частичный барьер между человеком и окружающей средой.

Задачи исследования. Для проектирования и создания специальной водотермостойкой защитной одежды пожарных необходимо изучение теплофизических свойств различных эластичных, гибких материалов, пригодных для создания одежды с требуемыми теплозащитными свойствами.

В соответствии с техническими требованиями ТУ ВУ 101 114 857.082-2015 «Комплекты индивидуальной защиты» при определении устойчивости пакетов материалов к воздействию горячей водой образцы подвергаются испытаниям по режимам: 70 ± 5 °С и 90 ± 5 °С; время воздействия составляет $\tau = 300$ с. Пакет материалов для одежды считается выдержавшим испытания, если на всех пробах не произошло: разрушения (оплавление, растрескивание); протекания воды внутрь пробы; отслоения покрытия от основы (для многослойных материалов); повышения температуры на внешней поверхности пакета не более 50 °С.

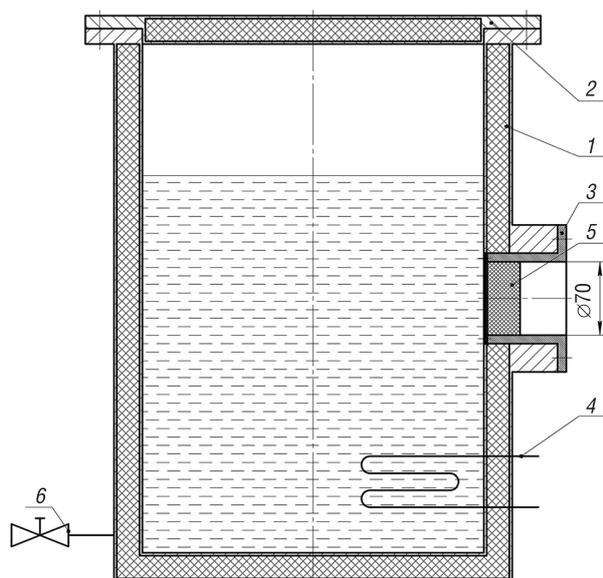


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – теплоизолированная емкость, 2 – крышка, 3 – рамка, 4 – нагревательный элемент, 5 – пакет материалов, 6 – кран

Fig. 1. Scheme of experimental installation: 1 – heat-insulated capacity, 2 – cover, 3 – frame, 4 – heating element, 5 – package of materials, 6 – crane

Нами эксперимент проводился в горячей воде по режиму 90 ± 5 °С, близкой к состоянию кипения, время воздействия для каждого режима испытаний $\tau = 300$ с. Для каждого режима испытаний были подготовлены не менее трех проб пакетов, включающие в себя материалы, которые входят в состав изделия. Для измерения температуры воды в емкости установки и температур поверхностей пакета материалов применялись термодатчики ТХА(К) с пределом допустимой погрешности $\pm 1,5$ °С.

Условия проведения исследований. Для осуществления исследований была создана экспериментальная установка, принципиальная схема которой изображена на рис. 1.

Исследуемый пакет материалов 5 в форме круга диаметром 70 мм помещался в рамку 3. Рамка с закрепленным образцом пакета материалов плотно устанавливалась во фланец теплоизолированной емкости 1, которую наполняли водой. После заполнения емкость закрывали теплоизолированной крышкой 2. Установив на термостате необходимую температуру, воду нагревали до заданной темпе-

ратуры (90 ± 5 °С). Слив воды из емкости производился через кран б. Измерение температуры фиксировалось с интервалом в 10 с. Длительность воздействия теплового источника $\tau = 300$ с.

В табл. 1 представлен состав подготовленных к эксперименту пакетов одежды.

Т а б л и ц а 1. Состав подготовленных пакетов материалов
T a b l e 1. Composition of the prepared packages of materials

Пакет №1	Пакет №2	Пакет №3
<i>Схема пакетов материалов</i>		
<i>Состав пакетов материалов</i>		
1. Винилискожа ТР специального назначения, ТУ ВУ 800 005 044.002-2008, $\delta_1 = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м; $\lambda_0 = 0,11$ Вт/м°C; $\rho = 1300$ кг/м ³		
2. Полотно полиэфирное объемное термоскрепленное (синтепон), плотность 100 г/м ² , $\delta_2 = 26 \cdot 10^{-3}$ м; $\lambda_0 = 0,04$ Вт/м°C; $\rho = 25$ кг/м ³	2. Ватин холстопршивной полушерстяной, арт. 9С15-319, $\delta_2 = 24 \cdot 10^{-3}$ м; $\lambda_0 = 0,042$ Вт/м°C; $\rho = 50$ кг/м ³	2. Ватин холстопршивной полушерстяной, арт. 9С15-319, $\delta_2 = 6,0 \cdot 10^{-3}$ м; $\lambda_0 = 0,042$ Вт/м°C; $\rho = 50$ кг/м ³ . 3. Полотно полиэфирное объемное термоскрепленное (синтепон), плотность 100 г/м ² , $\delta_2 = 20 \cdot 10^{-3}$ м; $\lambda_0 = 0,04$ Вт/м°C; $\rho = 25$ кг/м ³

Экспериментальные кривые для температуры t_2 на внутренней поверхности пакетов за время воздействия теплового источника изображены на рис. 2, а. Видно, что по завершении стадии прогрева $\tau_{пр} \approx 25-35$ с они представляют собой линейные зависимости.

Анализ экспериментальных кривых $t_2 = f(\tau)$ показывает, что техническим требованиям ТУ ВУ 101 114 857.082-2015 по режиму нагревания пакетов соответствует пакет №1.

Теплозащитный слой одежды должен поглощать, возможно, больший поток тепла от воздействующего теплового источника с уменьшением до минимального стока тепла с внутренней поверхности пакетов при температуре $t_2 \leq 50$ °С, поэтому в пакетах одежды необходимо использовать материалы с низкими коэффициентами теплопроводности и высокими удельными теплоемкостями при минимальной плотности, обладающие также эластичными свойствами, пригодными для создания защитной одежды.

При выборе теплофизических констант для материалов пакетов и их зависимости от температуры были изучены литературные источники [1–5], на основе которых при обработке данных нами получены следующие приближенные зависимости $\lambda = f(t)$ в области температур $t = 20-80$ °С и удельной теплоемкости для материалов, составляющих пакеты одежды:

для винилискожи $\lambda = \lambda_0(1 + 13,2 \cdot 10^{-3}t)$, $\lambda_0 = 0,11$ Вт/м°C;

для ватина $\lambda = \lambda_0(1 + 3,68 \cdot 10^{-3}t)$, $\lambda_0 = 0,042$ Вт/м°C;

для синтепона $\lambda = \lambda_0(1 + 3,68 \cdot 10^{-3}t)$, $\lambda_0 = 0,040$ Вт/м°C.

Удельные теплоемкости при $t = 20-80$ °С соответственно:

для винилискожи $c = 440 + 8,75t$ Дж/кг°C;

ватина и синтепона $c = 1240 + 7,8t$ Дж/кг°C [1–3].

Теплообмен поверхностей пакетов с окружающей средой. Представим пакет материалов в виде многослойной пластины, где наружная сторона омывается горячей водой с $t_{ж} = 90$ °С = const, а внутренняя поверхность пакета контактирует с воздухом с $t_{в} = 20$ °С = const.

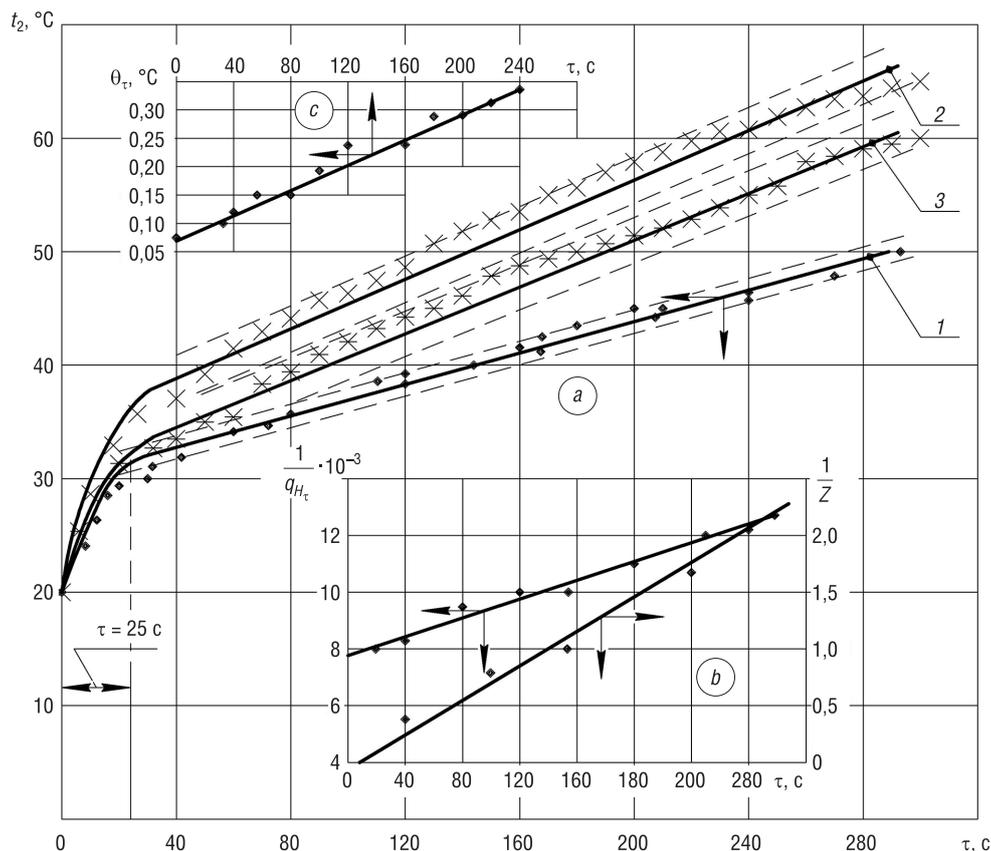


Рис. 2. Зависимость внутренней температуры $t_2 = f(\tau)$ (a) для пакетов № 1, 2, 3; зависимость $1/q_{H\tau} = f(\tau)$ (b); зависимость $\theta_\tau = f(\tau)$ (c)

Fig. 2. Dependence of the outside temperature $t_2 = f(\tau)$ (a) for packages no. 1, 2, 3; dependence $1/q_{H\tau} = f(\tau)$ (b); dependence $\theta_\tau = f(\tau)$ (c)

Критериальное уравнение теплообменного числа Нуссельта для наружной поверхности со стороны горячей воды имеет вид [6]:

$$Nu_{ж} = 0,15Ra^{0,33} \cdot \varepsilon_k,$$

где $Nu_{ж} = \alpha_1 \cdot l/\lambda_{ж}$ – критерий Нуссельта; ε_k – коэффициент конвекции, при $Ra > 10^9$ коэффициент конвекции $\varepsilon_k = 1$; α_1 – коэффициент теплообмена; $\lambda_{ж}$ – коэффициент теплопроводности горячей жидкости.

Число Рэлея определяется зависимостью

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta_{ж} \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu_{ж} \cdot a},$$

где g – ускорение силы тяжести, $g = 9,81$ м/с²; $\beta_{ж}$ – коэффициент температурного расширения, 1/К; l – характерный размер стенки, $l = 0,07$ м; a – коэффициент теплопроводности, м²/с; Gr – критерий Грасгофа; Pr – критерий Прандтля; Δt – разность температур, $\Delta t = t_{ж} - t_{ст}$; $\nu_{ж}$ – коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

Все физические константы для воды $\lambda_{ж}$, $\nu_{ж}$, $\beta_{ж}$, $Pr_{ж}$ при $t_{ж} = 90$ °С определялись по таблицам, приведенным в [4]. Средняя температура поверхности винилискожи для начального периода прогрева принималась $t_1 \approx 40$ °С при $\tau \approx 25$ с.

Коэффициент теплоотдачи от жидкости к поверхности определялся по критерию Нуссельта

$$\bar{\alpha}_1 = \frac{Nu \cdot \lambda_{ж}}{l} = \frac{188,6 \cdot 0,676}{0,07} \approx 1821 \text{ Вт/м}^2\text{°С}.$$

При температуре горячей воды $t_{\text{ж}} = 90^\circ\text{C}$ возле вертикальной поверхности пластины наблюдаются конвективные токи жидкости. Для их определения воспользуемся соотношением для определения общей скорости конвекции при допущениях Буссинеска [6]

$$W = \sqrt{g\beta l(t_{\text{ж}} - t_{\text{в}})} = \sqrt{9,81 \cdot 6,95 \cdot 10^{-4} \cdot 0,07 \cdot 70} \approx 0,18 \text{ м/с.}$$

Число Рейнольдса определяем по скорости конвективных токов, $W \approx 0,18 \text{ м/с}$,

$$\text{Re} = \frac{W \cdot l}{\nu_{\text{ж}}} = \frac{0,18 \cdot 0,07}{0,326 \cdot 10^{-6}} \approx 38650.$$

Для капельных жидкостей при значениях $\text{Re} < 4 \cdot 10^4$ критериальное уравнение имеет вид [6, 7]

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,76 \cdot \text{Re}^{0,5} \cdot \text{Pr}^{0,43}.$$

Коэффициент теплоотдачи от жидкости к поверхности равен

$$\bar{\alpha}_1 = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{\text{ж}}}{l} = \frac{200 \cdot 0,676}{0,07} \approx 1930 \text{ Вт/м}^2\text{°C.}$$

Погрешность при вычислении $\bar{\alpha}_1$ составила около 5 % и находится в пределах точности проведения эксперимента. Сравнение коэффициентов теплоотдачи $\bar{\alpha}_1$, полученных по двум независимым формулам, показывает их удовлетворительное совпадение.

Определим коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}_2$ от внутренней поверхности пакета к воздуху. Физические константы воздуха при $t_{\text{в}} = 20^\circ\text{C}$ [4]: $\text{Pr} = 0,7$; $\beta = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$; $\lambda = 0,025 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$; $\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2\text{/с}$; $a = 21,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2\text{/с}$.

Внутренняя поверхность нагревается от начальной температуры стенки $t_0 = 20^\circ\text{C}$ до $t_2 = 50^\circ\text{C}$ за цикл воздействия источника продолжительностью $\tau = 300 \text{ с}$.

Число Рэлея при данных условиях рассчитывается следующим образом:

$$\text{Ra} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu \cdot a} = \frac{9,81 \cdot 3,4 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot 3,43 \cdot 10^{-4}}{15 \cdot 10^{-6} \cdot 21,4 \cdot 10^{-6}} \approx 1,1 \cdot 10^6.$$

Критериальное уравнение теплообмена имеет вид [6–8]

$$\text{Nu} = 0,135 \cdot \text{Ra}^{0,33} \cdot \varepsilon_k.$$

Коэффициент конвекции вычисляется по зависимости $\varepsilon_k = (1/\sqrt{\text{Pr}})^{-2} \approx 0,68$ [8].

Число Нуссельта равно

$$\text{Nu} = 0,135 \cdot (1,1 \cdot 10^6)^{0,33} \cdot 0,68 \approx 8,2.$$

Коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}_2$ от внутренней поверхности пакета к воздуху определяется, как

$$\bar{\alpha}_2 = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{l} = \frac{8,2 \cdot 0,025}{0,07} \approx 2,9 \text{ Вт/м}^2\text{°C.}$$

Плотность стока тепла с внутренней поверхности пакета в окружающую среду за время $\tau = 300 \text{ с}$ имеет следующее значение:

$$q = \bar{\alpha}_2(t_2 - t_0) \approx 86 \text{ Вт/м}^2.$$

Анализ термических сопротивлений переноса тепла. Термическое сопротивление слоя винилскожи ($\delta_1 = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$) при температуре $t \approx 80^\circ\text{C}$ с коэффициентом теплопроводности $\lambda_1 = 0,22 \text{ Вт/м}^2\text{°C}$ равно

$$R_{\lambda_1} \approx \delta_1 / \lambda_1 \approx 0,4 \cdot 10^{-3} / 0,22 \approx 0,0018 \text{ м}^2\text{°C/Вт.}$$

Термическое сопротивление слоев ватина ($\delta_2 = 24,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$) и синтепона ($\delta_3 = 26,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$) при средней температуре $t \approx 70^\circ\text{C}$ составляет

$$R_{\lambda_2} \approx 24 \cdot 10^{-3} / 0,051 \approx 0,48 \text{ м}^2\text{°C/Вт}; R_{\lambda_3} \approx 26 \cdot 10^{-3} / 0,052 \approx 0,51 \text{ м}^2\text{°C/Вт.}$$

Для двухслойных и трехслойных пакетов эквивалентные коэффициенты теплопроводности [4] будут равны

$$\lambda_{\text{экв}}^{\text{пакет № 1}} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{0,4 \cdot 10^{-3} + 26 \cdot 10^{-3}}{\frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{0,22} + \frac{26 \cdot 10^{-3}}{0,051}} \approx 0,050 \text{ Вт/м}^\circ\text{С};$$

$$\lambda_{\text{экв}}^{\text{пакет № 2}} = \frac{0,4 \cdot 10^{-3} + 24 \cdot 10^{-3}}{\frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{0,22} + \frac{24 \cdot 10^{-3}}{0,051}} \approx 0,051 \text{ Вт/м}^\circ\text{С};$$

$$\lambda_{\text{экв}}^{\text{пакет № 3}} = \frac{0,4 \cdot 10^{-3} + 6 \cdot 10^{-3} + 20 \cdot 10^{-3}}{\frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{0,22} + \frac{6 \cdot 10^{-3}}{0,051} + \frac{20 \cdot 10^{-3}}{0,052}} \approx 0,051 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}.$$

Поскольку эквивалентные коэффициенты теплопроводности для всех пакетов имеют близкие значения, то, пренебрегая термическим сопротивлением слоя винилискожи, можно приближенно расчет распределения температуры по сечению проводить как для однослойной стенки, контактным теплообменом в случае соприкосновения пористых материалов можно пренебречь.

Обоснование упрощений при решении задач нестационарной теплопроводности. Решение задач нелинейного переноса тепла связано с большими трудностями, поскольку необходимо учитывать изменение коэффициентов переноса от температуры. Для упрощения задач нелинейного переноса тепла используются различные методы линеаризации, основанные на аппроксимации нелинейных коэффициентов переноса линейными, при которых можно использовать уравнение переноса при постоянных коэффициентах [5, 9, 10].

Для выбора шага по времени и минимизации погрешности по способу итерации производная по времени $\partial t / \partial \tau$ заменяется отношением «разности вперед» и «разности назад» ($t \pm \Delta t$) [10]. Для выбранного шага по времени Δt вычисляется параметр [9]

$$\eta = \delta / 2\sqrt{a \cdot \Delta \tau},$$

где δ – толщина стенки; $\Delta \tau$ – интервал времени; a – коэффициент температуропроводности, соответствующий значению температуры в момент времени τ .

Если для выбранного интервала времени параметр $\eta > 3$, то наблюдается стационарное состояние [9]. Для пакета № 1 имеем

$$\eta = 26 \cdot 10^{-3} / 2\sqrt{1,13 \cdot 10^{-6} \cdot 10} \approx 3,87,$$

где $a = \lambda_{\text{экв}} / c\rho = 0,051 / 1800 \cdot 25 \approx 1,13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при средней температуре в пакете $t \approx 70^\circ\text{С}$.

Замена производной по времени $\partial t / \partial \tau$ отношением «разности вперед» или «разности назад» позволяет с более высокой точностью определять температуру в узловых точках k в момент времени $\tau \pm \Delta \tau$ по значениям температур в точках $k, k + 1, k - 1$ в момент времени τ :

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\Delta t}{\Delta \tau} = \frac{t_{k,\tau} + \Delta t + t_{k,\tau}}{\Delta t}; \quad \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\Delta t}{\Delta \tau} = \frac{t_{k,\tau} + \Delta t - t_{k,\tau}}{\Delta t}.$$

При этом значения теплофизических характеристик для узловых точек $k \pm 1$ корректируются для каждого шага по времени $\Delta \tau$ [10].

Условия эксперимента. При малом термическом сопротивлении слоя винилискожи градиент температуры по сечению винилискожи $\nabla t \rightarrow 0$, температура поверхности винилискожи t_1 , контактирующая с жидкостью, стремится к температуре $t_{\text{ж}}$, и в этих условиях определить плотность потока тепла q_1 от горячей воды к поверхности винилискожи по уравнению Ньютона при использовании техники измерения температуры термопарой представляет трудности.

Плотность потока тепла q_1 определяется из уравнения теплового баланса

$$q_1 = q_{H\tau} + q_2, \quad (1)$$

где $q_{H\tau}$ – переменный поток тепла на нагрев теплозащитного слоя пакета, q_2 – плотность стока тепла с внутренней поверхности в окружающую среду.

Зависимость $t_2 = f(\tau)$ для пакета №1 (рис. 2, а) является линейной и приближенно описывается уравнением

$$t_2 \approx 0,070\tau + 30; \tau > 25 \text{ с.}$$

Плотность потока тепла на поверхности $q_1 = \text{const}$, температура поверхности винилискожи $t_1 = \text{const}$. Коэффициент теплообмена от жидкости к поверхности винилискожи $\alpha_1 \gg \alpha_2$, где α_2 – коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности пакета в окружающую среду.

Температура внутренней поверхности пакета линейно изменяется во времени. Решение задачи нестационарной теплопроводности через однослойную плоскую стенку, полученное А. И. Пеховичем с использованием упрощений методом суперпозиции с действующими источниками тепла [5], соответствует условиям нашего эксперимента.

Из условий теплообмена при линейном изменении во времени температуры t_2 на внутренней поверхности и плотности потока тепла от источника $q_1 = \text{const}$ и $t_1 = \text{const}$ для температурного параметра θ_τ можно записать [5] следующим образом:

$$\theta_\tau = (t_2 - t_0) / Z\tau, \tag{2}$$

где τ – время воздействия источника тепла на поверхность пакета со стороны жидкости при $q_1 = \text{const}$, с; Z – представляет приращение температуры в данной точке к изменению температуры на поверхности тела, за единицу времени, °C/с.

Температурный параметр θ_τ при $q_1 = \text{const}$, $t_1 = \text{const}$ и $\alpha_1 \gg \alpha_2$ и линейным характером изменения температуры t_2 на внутренней поверхности принимает вид [5]

$$\theta_\tau = \lambda(t_2 - t_b) / q_1 \cdot \delta_\Pi, \tag{3}$$

где δ_Π – толщина теплозащитного слоя пакета; t_b – температура окружающей среды, $t_b = 20$ °C; λ – коэффициент теплопроводности слоя пакета.

В случае если пакет материалов с наружной стороны контактирует с жидкостью $t_{ж} = \text{const}$ и $q_1 = \text{const}$, а температура среды $t_b = \text{const}$, то коэффициент Z при данных условиях теплообмена равен [5]

$$Z \approx \frac{q_1 \delta_\Pi}{\lambda \tau} \tag{4}$$

Температурный параметр θ_τ является линейной функцией времени. Зависимость $\theta_\tau = f(\tau)$, представленная на рис. 2, с, выражается эмпирической зависимостью

$$\theta_\tau = 10^{-3} \cdot \tau + 0,072. \tag{5}$$

Из решений уравнения (3) определяется температура t_2 :

$$t_2 \approx t_b + \frac{\theta_\tau \cdot q_1 \cdot \delta}{\lambda}. \tag{6}$$

В условиях теплообмена на обогреваемой поверхности пакета $q_1 = \text{const}$, $t_1 = \text{const}$, $\alpha_1 \gg \alpha_2$ и линейной зависимости $t_2 = \text{const}$ распределение температуры по толщине однослойной плоской стенки определяется уравнением [4–6] при $\eta > 3$:

$$t_{\delta x} \approx t_2 + \frac{q_{H\tau}}{\lambda_0(1 + bt)}(\delta_\Pi - \delta_x), \tag{7}$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности при $t = 0$ °C; b – коэффициент, зависящий от температуры, 1/°C

Тепловой поток на нагрев пакетов $q_{H\tau}$ определяется из условия, что для каждого малого промежутка $\Delta t = 10$ с $\eta > 3$ и при $t_1 = \text{const}$ имеет место стационарное состояние. В стационарных условиях тепловой поток $q_{H\tau}$ определяется по уравнению [4, 6, 7]

$$q_{H\tau} = \frac{\lambda(t)}{\delta_\Pi} \left[1 + b \frac{t_1 + t_{2cp}}{2} \right] (t_1 + t_{2cp}), \tag{8}$$

где t_{2cp} – средняя температура, определяется по «разности вперед» и «разности назад» [10].

Для всего периода воздействия источника тепла температура t_2 является переменной и отражает изменение потока тепла в нестационарных условиях с учетом изменения значений теплофизических характеристик в момент времени τ .

В табл. 2 даны значения температуры t_2 , вычисленные по уравнениям (6), (7), и значения тепловых потоков q_1 , q_2 и $q_{H\tau}$, полученные по формулам (1), (9) и (10).

Анализ значений плотности потока тепла на обогреваемой поверхности q_1 (табл. 2) показывает, что в границах точности эксперимента с погрешностью $\Delta \approx 2-3\%$ тепловой поток $q_1 \approx \text{const}$. Температура поверхности винилискожи, контактирующая с жидкостью при $\tau > 25$ с, определяемая по уравнению Ньютона $q_1 = \bar{\alpha}_1(t_1 - t'_1)$, где t_1 – температура наружной поверхности винилискожи со стороны горячей воды

Температура поверхности винилискожи с ее обратной стороны

$$t'_1 = q_1 \frac{\delta_k}{\lambda_k} - t_1 \approx 89,915 \text{ }^\circ\text{C},$$

где δ_k/λ_k – термическое сопротивление слоя винилискожи при средней температуре $t \approx 80$ °C. Перепад температуры по сечению винилискожи составляет $\Delta t \approx 0,1$ °C.

Плотность потока тепла q_1 принимает значение

$$q_1 \approx \bar{\alpha}_1(t_{\text{ж}} - t'_1) = 1821 \cdot 0,085 = 155,0 \text{ Вт/м}^2.$$

Несовпадение значений находится в границах допустимой погрешности.

Зависимость $1/q_{H\tau} = f(\tau)$, представленная на рис. 2, *b*, является линейной и приближенно аппроксимируется уравнением

$$q_{H\tau} \approx \frac{1000}{0,015\tau + 7,95}. \tag{9}$$

Коэффициент теплопередачи K для пакета № 1 определяется по формуле [4–10]

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}}. \tag{10}$$

Т а б л и ц а 2. Значения температуры t_2 и тепловых потоков q_1 , q_2 и $q_{H\tau}$ в процессе воздействия теплового потока на обогреваемую поверхность с течением времени для пакета № 1
 T a b l e 2. Values of temperature of t_2 and heat fluxes q_1 , q_2 and $q_{H\tau}$ in the course of impact of a heat flux on the warmed surface eventually for package no. 1

τ , с	$t_{2\text{экс}}$, °C	t_2 , °C (6)	$q_2 = \bar{\alpha}_2 \Delta t$, Вт/м ²	$q_{H\tau}$, Вт/м ² (8)	$q_{H\tau}$, Вт/м ² (9)	q_1 , Вт/м ² (1) $q_{H\tau} + q_2$
30	30,0	30,1	30,6	122	121,0	152,6
40	33,0	30,9	36,2	119	119,5	155,2
60	34,0	34,2	39,4	115	116,0	154,4
80	35,0	35,6	44,4	111	109,0	155,4
100	38,0	37,2	50,8	109	106,0	159,8
120	39,0	38,4	54,2	100	102,0	154,2
140	40,0	39,8	58,6	97	100,0	155,6
160	42,0	41,6	64,4	91	95,0	155,4
180	43,0	42,8	67,0	88	91,0	155
200	44,0	44,1	70,5	86	89,0	156,5
240	47,0	45,8	77,7	80	84,0	157,7
260	49,0	48,2	80,9	74	73,0	154,9
280	49,0	49,6	84,7	72	76,0	156,7
300	50,0	50,9	87,3	70	74,0	157,3

П р и м е ч а н и е: среднее значение $q_1 \approx 155$ Вт/м² \approx const.

Термическое сопротивление теплоотдаче со стороны горячей жидкости к поверхности винилискожи и сопротивление теплопроводности слоя винилискожи соответственно равны:

$$R_{\alpha_1} = \frac{1}{\bar{\alpha}_1} = \frac{1}{1823} = 5,48 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2\text{ }^\circ\text{C/Вт}$$

$$\text{и } R_{\lambda_1} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} \approx 0,0018 \text{ м}^2\text{ }^\circ\text{C/Вт}.$$

Пренебрегая термическими сопротивлениями, коэффициент теплопередачи K принимает значение

$$K = \frac{1}{\frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}} \approx \frac{1}{0,5 + 0,345} \approx 1,18 \text{ Вт/м}^2\text{ }^\circ\text{C},$$

где $R_{\alpha_2} = \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{2,9} \approx 0,345 \text{ м}^2\text{ }^\circ\text{C/Вт}$ – термическое сопротивление теплоотдаче со стороны внутренней поверхности пакета к воздуху.

Плотность потока тепла пакета № 1 равна

$$q_1 = K(t_{\text{ж}} - t_{\text{в}}) = 1,18 \cdot 70 = 82,6 \text{ Вт/м}^2.$$

Плотность стока тепла с внешней поверхности определяется по уравнению Ньютона

$q_1 \approx 86 \text{ Вт/м}^2$. Ошибка обработки эксперимента находится в допустимых пределах.

При $\tau > 25$ с нагрев пакетов происходит в условиях регулярного режима. Темп нагрева тела определяется экспериментально, путем измерения температуры для двух последовательных моментов времени [4, 6, 9]. При $\tau_1 = 30$ с $t_2 = 30$ °С; при $\tau_2 = 180$ с $t_2 = 43,2$ °С. Темп нагрева m_t зависит от физических свойств теплозащитного слоя пакетов одежды и условий теплообмена с окружающей средой и для пакета №1 рассчитывается следующим образом:

$$m_t = \frac{\ln\left(\frac{90 - 30}{90 - 43,2}\right)}{180 - 30} = 1,64 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}.$$

Регуляризация нагрева твердого тела происходит не только по температурам, но и тепловым потокам [7, 9], следовательно, плотность потока $q_{H\tau}$ является функцией $m_t\tau$ ($q_{H\tau} = f(m_t\tau)$). Зависимость оказалась линейной (рис. 3, b) и приближенно аппроксимируется уравнением

$$q_{H\tau} \approx 122 - 10^2 m_t\tau. \tag{11}$$

Распределение температуры по сечению пакета №1, определяемое по формуле (8), представлено на рис. 3, a. Сравнение расчетных значений температур с экспериментом для внутренней поверхности пакета дано в табл. 3.

Исследование теплообмена пакетов одежды, предназначенных для создания специальной водостойкой защитной одежды пожарных, на основе приближенного решения уравнения теплопроводности в условиях нестационарного теплообмена, показало достаточно хорошее совпадение расчетных значений параметров с экспериментом.

Т а б л и ц а 3. Сравнение расчетных значений температуры с экспериментом, при $q_1 = 155 \text{ Вт/м}^2$, $t_{ж} = 90$ °С для внутренней поверхности пакета №1
 T a b l e 3. Comparison of calculated values of temperature with an experiment, at $q_1 = 155 \text{ W/m}^2$, $t_{ж} = 90$ °С for an internal surface of package no. 1

$\tau, \text{ с}$	$\delta = 26 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	
	$t_{2\text{экс}}, \text{ °С}$	$t_2, \text{ °С (6)}$
30	30,0	28,9
60	34,0	33,6
100	38,0	37,3
160	42,0	42,5
200	44,0	44,1
260	49,0	48,9
280	49,0	49,5
300	50,0	50,4

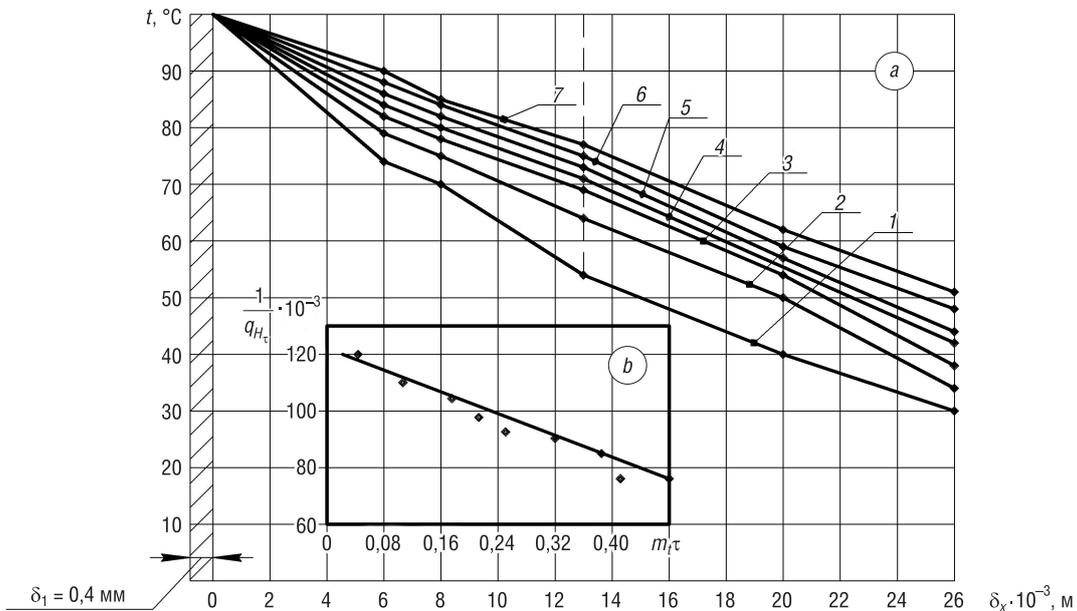


Рис. 3. Зависимость для распределения температуры по толщине пакета №1 (a) и зависимости для плотности теплового потока $q_{H\tau} = f(\tau)$ (b) пакета №1: 1 – $\tau = 30$ с; 2 – $\tau = 60$ с; 3 – $\tau = 100$ с; 4 – $\tau = 160$ с; 5 – $\tau = 200$ с; 6 – $\tau = 250$ с; 7 – $\tau = 300$ с

Fig. 3. Dependence for distribution of temperature on thickness of package №1 (a) and dependence for density of a heat flux $q_{H\tau} = f(\tau)$ (b) of package no. 1: 1 – $\tau = 30$ s; 2 – $\tau = 60$ s; 3 – $\tau = 100$ s; 4 – $\tau = 160$ s; 5 – $\tau = 200$ s; 6 – $\tau = 250$ s; 7 – $\tau = 300$ s

Заключение. В результате исследования нестационарного процесса теплопередачи в пакетах защитной одежды получены уравнения для определения температуры по сечению пакетов в зависимости от времени воздействия теплового источника.

Установлен состав материалов пакета одежды, соответствующий техническому требованию ТУ ВУ 101 114 857.082-2015 «Комплекты индивидуальной защиты», необходимый для создания специальной водотермостойкой защитной одежды пожарных.

Список использованных источников

1. Франчук, А. У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов / А. У. Франчук. – М.: НИИ строительной физики, 1969. – 143 с.
2. Физические величины: справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Меймехова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
3. Блази, В. Строительная физика: справ. проектировщика / В. Блази. – М.: Техносфера, 2005. – 536 с.
4. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 486 с.
5. Пехович, А. И. Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. – Л.: Энергия, 1968. – 303 с.
6. Тепло- и массообмен: учеб. пособие: в 2 ч. / Б. М. Хрусталева [и др.]; под общ. ред. А. П. Несенчука – Минск: БНТУ, 2007. – Ч. 1. – 606 с.
7. Лыков, А. В. Теплообмен: справочник / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1972. – 560 с.
8. Рудобашта, С. П. Теплотехника: учеб. для вузов / С. П. Рудобашта. – М.: Колос, 2010. – 620 с.
9. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.
10. Тепло- и массообмен: учеб. пособие: в 2 ч. / Б. М. Хрусталева [и др.]; под общ. ред. А. П. Несенчука – Минск: БНТУ, 2009. – Ч. 2. – 274 с.

References

1. Franchuk A. U. *Tables of Heat Engineering Indicators of Building Materials*. Moscow, Publishing House of Research Institute of Building Physics, 1969. 143 p. (in Russian).
2. Grigoriev I. S., Meymehov E. Z. (eds.) *Physical Quantities: Reference book*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 1232 p. (in Russian).
3. Blazy V. *Construction Physics: Handbook of the designer*. Moscow, Technosphere Publ., 2005. 536 p. (in Russian).
4. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. *Heat Transfer*. Moscow, Energiya Publ., 1975. 486 p. (in Russian).
5. Pekhovich A. I. *Calculations of the Thermal Regime of Solids*. Leningrad, Energiya Publ., 1968. 303 p. (in Russian).
6. Khrustalev B. M., Nesenchuk A. P., Timoshpolskii V. I., Akel'ev V. D., Sednin V. A., Kopko V. M., Nerezko A. V. *Heat and Mass Transfer. Part 1*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2007. 606 p. (in Russian).
7. Lykov A. V. *Heat and Mass Transfer: Handbook*. Moscow, Energiya Publ., 1972. 560 p. (in Russian).
8. Rudobashta S. P. *Heat Engineering*. Moscow, Kolos Publ., 2010. 620 p. (in Russian).
9. Lykov A. V. *Heat Conductivity Theory*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 600 p. (in Russian).
10. Khrustalev B. M., Nesenchuk A. P., Akel'ev V. D., Sednin V. A., Kopko V. M., Timoshpolskii V. I., Sednin A. V., Nerezko A. V. *Heat and Mass Transfer. Part 2*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2009. 274 p. (in Russian).

Информация об авторах

Ольшанский Анатолий Иосифович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: tiomp@vstu.by

Окунев Роман Владимирович – старший преподаватель кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: ramanokuneff@ya.ru

Гусаров Алексей Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: tiomp@vstu.by

Information about the authors

Anatoli I. Ol'shanskii – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: tiomp@vstu.by

Roman V. Okunev – Senior Lecturer of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: ramanokuneff@ya.ru

Aleksei M. Gusarov – Ph. D. (Engineering), Associate Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: tiomp@vstu.by