

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЙ ПОДКЛАДКИ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОГО КОСТЮМА ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ С ЭЛЕМЕНТАМИ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ПЛАВУЧЕСТИ

PROCEDURE FOR CALCULATION OF THICKNESS OF HEAT-INSULATING LINING FOR COMBINED COSTUME OF INDIVIDUAL PROTECTION WITH ELEMENTS OF POSITIVE BUOYANCY

УДК 677.017

Р.В. Окунев*

Витебский государственный технологический университет

<https://doi.org/10.24411/2079-7958-2020-13807>

R. Okunev*

Vitebsk State Technological University

РЕФЕРАТ

МЕТОДИКА, ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННАЯ ПОДКЛАДКА, КОСТЮМ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ, ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ, ТЕПЛООТДАЧА

Защита личного состава при работе в горячей и холодной воде (на льду), нахождении на открытом воздухе при низкой температуре обеспечивается внутренней теплоизоляционной подкладкой костюма индивидуальной защиты с элементами положительной плавучести. В работе разработана и описывается методика расчета толщины теплоизоляционной подкладки с учетом величин размерных признаков типовой фигуры человека. Проведенные исследования позволили установить оптимальный пакет материалов, обладающий наилучшими показателями толщины и теплопроводности. Результаты работы реализованы при создании макета теплоизоляционной подкладки на РУП «Униформ» г. Микашевичи.

ABSTRACT

PROCEDURE, THERMAL INSULATION LINING, PERSONAL PROTECTIVE COSTUME, THERMAL CONDUCTIVITY, HEAT REMOVAL

Protection of manpower during operation in hot and cold water (on ice), being in the open air at low temperature is provided by internal heat insulation lining of individual protection costume with elements of positive buoyancy. The work developed and describes the procedure for calculating the thickness of the heat insulation lining, taking into account the values of dimensional features of a typical figure of a person. The studies enabled to establish an optimal package of materials with the best characteristics of thickness and thermal conductivity. The results of the work were implemented during the creation of a model of heat insulation lining at the Uniform Enterprise in Mikashevichi.

Защита личного состава подразделений, обеспечивающих ликвидацию последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, работе в горячей и холодной воде (на льду), нахождении на открытом воздухе при низкой температуре, обеспечивается наличием внутренней теплоизоляционной подкладки костюма индивидуальной защиты (ККИЗ).

Внутренняя теплоизоляционная подкладка предназначена для уменьшения потери теплоты в окружающую среду, а также сохранения необ-

ходимого температурного режима в подкостюмном пространстве создавая тем самым необходимые санитарные условия труда.

Известны в настоящее время научные работы, посвященные описанию механизма переноса теплоты в стационарном либо нестационарном режимах через многослойные материалы, пакеты материалов, ниточные соединения текстильных материалов. При этом материалы рассматриваются как плоская неограниченная пластина, так как их ширина и длина очень ве-

* E-mail: ramanokuneff@ya.ru (R. Okunev)

лики, по сравнению с толщиной, а между слоями материалов присутствует полный тепловой контакт [1, 2].

Целью работы является разработка методики расчета толщины теплоизоляционной подкладки ККИЗ с учетом теплообмена отдельных участков фигуры человека.

Материалы, используемые в теплоизоляционной подкладке, могут быть разнообразными и обладать низкой теплопроводностью. Анализируя различные виды материалов с учетом теплофизических, технико-экономических показателей, доступности для приобретения на рынках Республики Беларусь, установлено, что в качестве таких материалов можно использовать синтетический утеплитель Isosoft и полотно объемное термоскрепленное (синтепон) поверхностных плотностей 150 г/м^2 и 100 г/м^2 . Характеристика материалов дана в таблице 1.

В основу методики расчета толщины теплоизоляционной подкладки положена методика расчета толщины теплоизоляции для цилиндрической поверхности [4].

Сущность методики заключается в том, что фигура человека разбивается на простые фигуры (цилиндры) с характерными размерами, взятыми по ГОСТ 23167-91 «Фигуры военнослужащих типовые. Размерные признаки для проектирования военной одежды» [3].

Методика расчета толщины теплоизоляционной подкладки включает в себя следующие этапы:

1. Определение необходимых величин размерных признаков и определение их диамет-

ральных выражений.

2. Установление требований, предъявляемых к ККИЗ.

3. Определение коэффициентов теплопроводности выбранных образцов материалов.

4. Расчет значений теплоотдачи для соответствующего режима эксплуатации костюма.

5. Расчет толщины теплоизоляционной подкладки.

Типовая фигура военнослужащего для расчета принята по второй полнотной группе по следующим размерным признакам, см: рост – 170; обхват груди – 100; обхват талии – 88. Величины размерных признаков, использованных для расчета, представлены в таблице 2.

Расчет изоляции выполняют по обычным формулам теплопередачи [4].

Температура на поверхности костюма исходя из требований, предъявляемых к ККИЗ, задана равной $t_k = 70 \text{ }^\circ\text{C}$; температура внутреннего теплоизоляционного ККИЗ на поверхности не более $t_{ног} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$; температура среды равна наружной температуре тела человека, $t_{cp} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$; скорость ветра – $v_в = 0,2 \text{ м/с}$.

Условия использования костюма могут быть разными, поэтому коэффициент теплоотдачи $\alpha [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})]$ определим для нескольких вариантов эксплуатации.

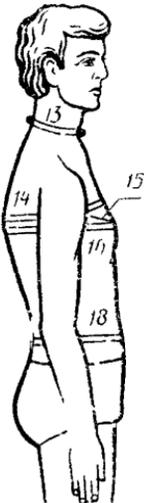
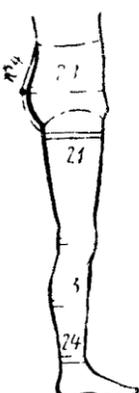
Для костюмов, находящихся на открытом воздухе [4]:

$$\alpha = 11,6 + 7\sqrt{v_в} \quad (1)$$

Таблица 1 – Характеристика материалов

Наименование	Характеристика материала
Isosoft	– температура эксплуатации – до минус $35 \text{ }^\circ\text{C}$; – поверхностная плотность – от 40 до 300 г/м^2 ; – стоимость – 5,8–8,0 BYN за 1 пог. м; – доступен для приобретения в Республике Беларусь в неограниченном количестве
Полотно объемное термоскрепленное (синтепон)	– температура эксплуатации – до минус $25 \text{ }^\circ\text{C}$; – поверхностная плотность – от 40 до 1500 г/м^2 ; – стоимость – от 2,5 BYN за 1 пог. м; – доступен для приобретения в Республике Беларусь в неограниченном количестве

Таблица 2 – Величины размерных признаков типовых фигур военнообязанных 2-й полнотной группы

Номер размерного признака на чертеже	Размерный признак	Чертеж	Величина размерного признака, см	Диаметральное выражение размерного признака, м $d_{вн} \cdot 10^{-2}$
13	Обхват шеи		41,1	13,09
15	Обхват груди второй		104,9	33,41
28	Обхват плеча		32,4	10,32
21	Обхват бедра		57,3	18,25

где $v_в$ – скорость ветра, м/с.

В условиях вынужденной и естествен-

ной конвекции коэффициент теплоотдачи $\alpha [Вт/(м^2 \cdot К)]$ определяем по более универ-

сальной формуле [4]

$$\alpha = 2,56 \sqrt{\frac{\nu_e + 0,33}{0,33}} \sqrt[4]{t_{нов} - t_{cp}}, \quad (2)$$

где $t_{нов}$, t_{cp} – температуры внутреннего теплоизоляционного ККИЗ на поверхности и температура среды, °C.

Для определения толщины теплоизоляции цилиндрической поверхности можно воспользоваться формулой [4]

$$\frac{d_n}{d_{вн}} \ln \frac{d_n}{d_{вн}} = \frac{2\lambda_{уз}(t_k - t_{нов})}{\alpha d_{вн}(t_{нов} - t_{cp})}, \quad (3)$$

где d_n , $d_{вн}$ – наружный и внутренний (наружный диаметр изолируемой поверхности) диаметр теплоизоляционной подкладки, м; $\lambda_{уз}$ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м · °C).

По значению $\frac{d_n}{d_{вн}} \ln \frac{d_n}{d_{вн}}$ определяют $\frac{d_n}{d_{вн}}$ и далее толщину теплоизоляционной подкладки находят по выражению [2]

$$\delta = \frac{d_{вн}}{2} \left(\frac{d_n}{d_{вн}} - 1 \right). \quad (4)$$

Для эффективной работы теплоизоляционной подкладки необходимо, чтобы $d_{m.n} \leq d_{вн}$, где $d_{m.n} = 2\lambda_{уз} / \alpha$; $d_{m.n}$ – критический диаметр теплоизоляционной подкладки, м; $d_{вн}$ – внешний диаметр размерного признака (внутренний диаметр теплоизоляционной подкладки), м; α – коэффициент теплоотдачи во внешнюю среду, Вт/(м² · К); $\lambda_{уз}$ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м · °C).

Теплопроводность выбранных материалов определялась на лабораторной установке, показанной на рисунке 1.

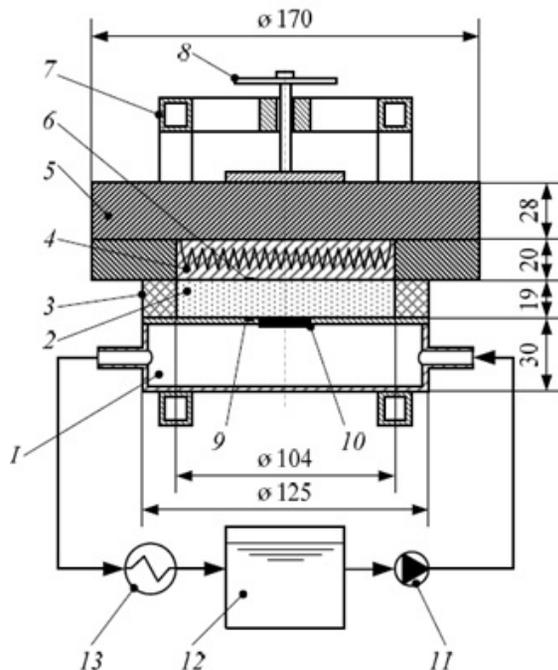


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки:

1 – водяной охладитель; 2 – исследуемый материал; 3 – теплоизоляционное кольцо; 4 – электронагреватель; 5 – текстолитовый диск; 6, 9 – датчики температуры; 7 – опорная рама; 8 – барашек; 10 – датчик плотности теплового потока; 11 – насос; 12 – бак холодной воды; 13 – воздушный охладитель контура холодной воды

Установка содержит массивный текстолитовый диск 5, выполняющий роль теплоизолятора, в котором имеется цилиндрическая глухая полость. В ней размещен электронагреватель 4, залитый металлом с высокой теплопроводностью, что обеспечивает создание равномерного температурного поля. Между нагревателем и водяным холодильником 1 расположено теплоизоляционное кольцо 3, которое применяется при исследовании теплопроводности сформированного пакета материалов. При изучении теплопроводности твердых тел кольцо удаляется, а на его место устанавливается изучаемый образец в форме диска. Тепловой поток, прошедший через диск, отводится водой холодного контура.

Вся система находится на опорной раме 7, позволяющей разъединять нагреватель и холодильник вращением барашка 8, а также зажимать опытный образец между ними, чтобы свести к минимуму контактное тепловое сопротивление.

Регулирование теплового потока электронагревателя происходит ступенчато. Для измерения температуры поверхности t_1 и t_2 опытного образца использованы датчики 6 и 9, которые установлены на наружной поверхности нагревателя и холодильника, а плотность теплового потока q фиксируется показывающим прибором по сигналу датчика теплового потока 10, установленного в середине заподлицо с наружной поверхностью холодильника.

Датчик теплового потока представляет собой гальваническую термобатарейку из нескольких сот последовательно соединенных термопар, сложенных бифилярно в спираль и залитую эпоксидным компаундом с различными добавками. Датчик имеет два вывода (по одному от каждого конца чувствительного элемента). Работа датчика основана на принципе «дополнительной стенки». Датчик закрепляется на теплообменной поверхности исследуемого объекта, образуя дополнительную стенку.

Тепловой поток, проходящий через датчик, создает в нем градиент температур и соответствующий термоэлектрический сигнал. Величина плотности теплового потока пропорциональна этому сигналу, что позволяет соответственно проградуировать прибор, измеряющий термоЭДС.

Абсолютная погрешность измерения температур $\pm 0,5$ °C, а плотности теплового потока ± 1 Вт/м².

Методика проведения эксперимента:

1. Подготовка образца круглой формы диаметром 100 мм.

2. В соответствии с ГОСТ 12023-2003 (ISO 5084:1996) «Материалы текстильные и изделия из них. Метод определения толщины» [5] при давлении на поверхности образца $(1 \pm 0,01)$ кПа измеряется толщина образца не менее 5 участков образца, определяется δ_{cp} как среднеарифметическое значение результатов измерений.

3. Исследуемый образец материала устанавливается внутрь установки и зажимается с помощью винтового механизма между нагревателем и датчиком теплового потока.

4. Включается циркуляция охлаждающей воды, обеспечивается расход $g = 0,015 - 0,020$ л/с.

5. Устанавливается мощность электронагревателя для поддержания температуры $t_1 = 70 \pm 3$ °C.

6. После наступления стационарного режима теплопередачи (когда значения температур и плотности теплового потока перестанут изменяться) фиксируются показания приборов.

7. Коэффициент теплопроводности λ определяется по формуле [6]

$$\lambda = \frac{q \cdot \delta}{t_1 - t_2}, \quad (5)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²; δ – толщина материала, м; t_1 – температура наружной поверхности нагревателя, °C; t_2 – температура наружной поверхности холодильника, °C.

8. Эксперимент повторяется не менее 5 раз, определяется среднеарифметическое значение коэффициента теплопроводности при 95 %-ном доверительном интервале.

Результаты исследований значений теплопроводности материалов представлены в таблице 3.

Результаты расчета толщины подкладки с теплоизоляционным материалом Isosoft (150 г/м²) при коэффициенте теплоотдачи, рассчитанного

Таблица 3 – Результаты исследований теплопроводности материалов ККИЗ

Наименование материала	Толщина материала, м, $\delta \cdot 10^{-3}$	Коэффициент теплопроводности, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$
Полотно объемное термоскрепленное (синтепон)	8,00	0,0567
Isosoft	8,00	0,0451

Таблица 4 – Результаты расчета толщины подкладки с теплоизоляционным материалом Isosoft (150 г/м²) при коэффициенте теплоотдачи, рассчитанном по формуле (1)

Номер размерного признака на чертеже	Размерный признак	α , $Вт/(м^2 \cdot К)$	$\frac{d_n}{d_{вн}} \ln \frac{d_n}{d_{вн}}$	$\frac{d_n}{d_{вн}}$	$d_{м.н} \cdot 10^{-3}$, м	$\delta \cdot 10^{-3}$, м
13	Обхват шеи	14,73	0,082	1,03	6,12	5,23
15	Обхват груди второй		0,032	1,10		5,01
28	Обхват плеча		0,104	1,06		5,16
21	Обхват бедра		0,059	1,08		5,48

Таблица 5 – Результаты расчета толщины подкладки с теплоизоляционным материалом Isosoft (150 г/м²) при коэффициенте теплоотдачи, рассчитанном по формуле (2)

Номер размерного признака на чертеже	Размерный признак	α , $Вт/(м^2 \cdot К)$	$\frac{d_n}{d_{вн}} \ln \frac{d_n}{d_{вн}}$	$\frac{d_n}{d_{вн}}$	$d_{м.н} \cdot 10^{-3}$, м	$\delta \cdot 10^{-3}$, м
13	Обхват шеи	8,26	0,199	1,19	10,90	12,43
15	Обхват груди второй		0,078	1,07		11,69
28	Обхват плеча		0,253	1,23		11,87
21	Обхват бедра		0,143	1,14		12,77

по формуле (1) и (2), даны в таблицах 4 и 5.

Результаты расчета толщины подкладки с полотном объемным термоскрепленным (100 г/м²) при коэффициентах теплоотдачи, рассчитанных по формулам (1) и (2), даны в таблицах 6 и 7.

Анализируя полученные данные таблиц 4–7, можно сделать следующие выводы:

– материал Isosoft обладает лучшими показателями теплопроводности в сравнении с полот-

ном объемным термоскрепленным (синтепон);

– рассчитанная толщина теплоизоляционной подкладки из материала Isosoft на 20–30 % меньше, чем из синтепона.

Предложенная методика расчета теплоизоляционной подкладки позволяет определить оптимальную толщину теплоизоляционной подкладки в пакете материалов с учетом топографии размещения, различных вариантов эксплуатации, что положительно сказывается на эр-

Таблица 6 – Результаты расчета толщины подкладки с полотном объемным термоскрепленным (100 г/м²) при коэффициенте теплоотдачи, рассчитанном по формуле (1)

Номер размерного признака на чертеже	Размерный признак	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$\frac{d_n}{d_{en}} \ln \frac{d_n}{d_{en}}$	$\frac{d_n}{d_{en}}$	$d_{m.n} \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	$\delta \cdot 10^{-3}, \text{ м}$
13	Обхват шеи	14,73	0,102	1,10	6,12	6,54
15	Обхват груди второй		0,040	1,04		6,71
28	Обхват плеча		0,130	1,13		6,39
21	Обхват бедра		0,073	1,07		6,55

Таблица 7 – Результаты расчета толщины подкладки с полотном объемным термоскрепленным (100 г/м²) при коэффициенте теплоотдачи, рассчитанном по формуле (2)

Номер размерного признака на чертеже	Размерный признак	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$\frac{d_n}{d_{en}} \ln \frac{d_n}{d_{en}}$	$\frac{d_n}{d_{en}}$	$d_{m.n} \cdot 10^{-3}, \text{ м}$	$\delta \cdot 10^{-3}, \text{ м}$
13	Обхват шеи	6,04	0,248	1,23	18,54	15,10
15	Обхват груди второй		0,097	1,11		18,37
28	Обхват плеча		0,015	1,29		15,00
21	Обхват бедра		0,016	1,17		15,50

гономике костюма в целом. Работа выполнялась в рамках финансируемого НИОКР по заданию «Разработка комбинированного костюма индивидуальной защиты с элементами положительной плавучести» государственной программы

научных исследований «Информатика, космос и безопасность». Результаты работы реализованы при создании макета теплоизоляционной подкладки на РУП «Униформ» г. Микашевичи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Довыденкова, В. П. (2017), Моделирование процесса переноса теплоты через участки околошовной зоны одежды специального назначения в условиях нестационарной теплопроводности, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2017, № 1 (32), С. 41–52.

REFERENCES

1. Dovydenkova, V. P. (2017), Modeling of the process of heat transfer through sections of the near-bone zone of special-purpose clothing in conditions of non-stationary thermal conductivity [Modelirovaniye protsessa perenosa tepla cherez uchastki okoloshovnoy zony odezhdy spetsial'nogo naznacheniya v

2. Довыденкова, В. П., Ольшанский, В. И., Дмитрикович, Н. М., Прохоров, А. П. (2013), Расчет теплофизических параметров материала верха специальной защитной одежды пожарных с применением средств автоматизированного вычисления, *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидации*, 2013, № 1 (33), С. 94–102.
3. ГОСТ 23167-91. *Фигуры военнослужащих типовые. Размерные признаки для проектирования военной одежды*, введ. 07.01.92, (1992), Москва, Издательство стандартов.
4. Акулич, П. В. (2010), Расчеты сушильных и теплообменных установок, *Белорусская наука*, Минск, 443 с.
5. ГОСТ 12023-2003 (ISO 5084:1996). *Материалы текстильные и изделия из них. Метод определения толщины*, введ. 01.12.05, (2005), Москва, Стандартинформ.
6. Михеев, М. А., Михеева, И. М. (1977), Основы теплопередачи, *Энергия*, Москва, 343 с.
2. Dovydenkova, V. P., Olshanskiy, V. I., Dmitry, N. M., Prokhorov, A. P. (2013), Calculation of thermophysical parameters of the material of the top of special protective clothing of firefighters with the use of means of automated calculation [Расчет теплофизических параметров материала верхней защитной одежды], *Emergencies: prevention and liquidation*, 2013, № 1 (33), pp. 94–102.
3. GOST 23167-91. *Military personnel figures are typical. Dimensional Signs for Military Clothing Design*, vved. 07.01.92, (1992), Moscow, Izdatel'stvo standartov.
4. Akulich, P. V. (2010), Raschety sushil'nykh i teploobmennyykh ustanovok [Calculations of drying and heat exchange plants], *Belarusian science*, Minsk, p. 443.
5. GOST 12023-2003 (ISO 5084:1996). *Textile materials and products. Method of determination of thickness*, vved. 01.12.05, (2005), Moscow, Standartinform.
6. Miheev, M. A., Miheeva, I. M. (1977), Foundations of Heat Transfer [Osnovy teploperedachi], *Energia*, Moscow, p. 343.

Статья поступила в редакцию 21. 02. 2020 г.