

УДК 677.07:536.2

КУРГАНСЬКА М.М. *, ВАСИЛЕНКО В.М. *,
КУРГАНСЬКИЙ А.В. *, САКОВЕЦЬ В.В.** , МАЛІЙ А.О.** ,
ОПАНАСЕНКО К.В.*

* Київський національний університет технологій та дизайну

** Головне управління розвитку та супроводження матеріального забезпечення ЗСУ

ПРОГНОЗУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІЗОЛЯЦІЇ КОМПЛЕКТІВ ОДЯГУ В УМОВАХ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР

Мета. Визначення впливу динамічних чинників на ізоляцію комплектів одягу в умовах низьких температур при зниженні компенсаторних втрат.

Методика. Аналітичний огляд та систематизація науково-технічної інформації щодо визначення динамічної характеристики ізоляції комплектів одягу та враховуючи ДСТУ Б EN ISO 7730, ISO 9920.

Результати. Проаналізовано вплив рухів людини, швидкості вітру та кута його впливу при визначенні динамічної характеристики ізоляції, також вплив кількості шарів комплекту на продуктивність виконання завдань.

Наукова новизна. Запропоновано шляхи удосконалення процесу проектування комплектів спеціального одягу, що враховують ефекти зміни динамічних характеристик ізоляції та коригуючі коефіцієнти руху повітря у пакетах та рух тіла людини.

Практична значимість. Прискорення прогнозування максимального часу перебування в умовах низьких температур. Рекомендації щодо удосконалення існуючих спеціальних комплектів для захисту від холоду.

Ключові слова: комфорт, спеціальний одяг, захист від холоду, динамічна характеристика ізоляції.

Вступ. Базовою функцією одягу для захисту від холоду є захист працівника від надмірної втрати тепла, розширення діапазону терморегуляторного контролю організму та зменшення метаболічної вартість терморегуляції. При цьому потрібно враховувати фізичну активність людини, кліматичні умови, в яких передбачається його експлуатація. Відповідно, не допускається перегрів людини, накопичення вологи у підодяговому просторі, відсутність регулювання ізоляції комплекту.

Розглядаючи засоби захисту працівника від негативного впливу низьких температур, які відокремлюють людину від оточуючого середовища, не можливо нівелювати їх впливом на організм суб'єкту. Також важливим аспектом є біофізика спеціальних захисних комплектів. Сучасним поглядом є поділення досліджень на лабораторні та польові етапи, відповідно, з використанням обладнання та участю людей (рис.1) [1]. Нажаль переважна більшість розробок та робіт з удосконалення існуючих комплектів одягу спеціального призначення проводяться оминаючи рівні 2,4,5. Рішення фізіолого-гігієнічних питань здебільшого, а також питань біофізики, підміняється результатами анкетного опитування, що є вкрай суб'єктивним.

Безперечно захист від холоду не обмежується лише використанням одягу, тому потрібне розгляду повний комплект захисного спорядження з точки зору його єдності як комплексу. Урахування впливу кількісних та якісних показників всіх складових елементів дозволить оперативно прогнозувати час безперервного використання комплектів та проводити фізіолого-гігієнічне їх обґрунтування.

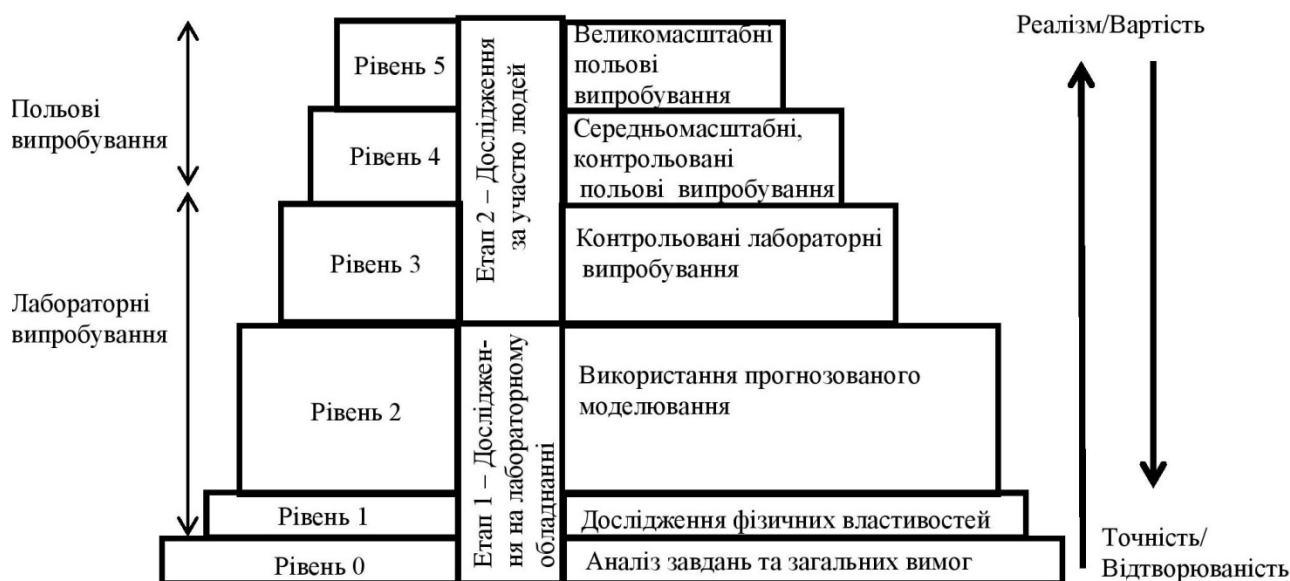


Рис. 1. Шість етапів при розробці та оцінці комплектів одягу [1]

На величину теплового опору одягу впливають такі основні чинники: температура повітря; вітер; повітропроникність пакета матеріалів; інтенсивність м'язової роботи, яка визначається енерговитратами людини; час перебування на холоді (відкритому повітрі), зріст, маса, поверхня тіла, вік людини та ін.

Сучасні дослідження щодо ефективності термоізоляційного шару, його властивостей базуються на встановленні величин ректальної температури тіла, середньозваженої температури шкіри, вологовтрат, середньої температури шкіри тощо. Коректне визначення цих величин у польових умовах буде ускладнене значною кількістю датчиків, дротів під одягом і, відповідно, ресурсами енергозабезпечення, що при довготривалих дослідженнях призводить до анулювання результатів, через зброї у системі «військовослужбовець-підсистема біофізичного моніторингу».

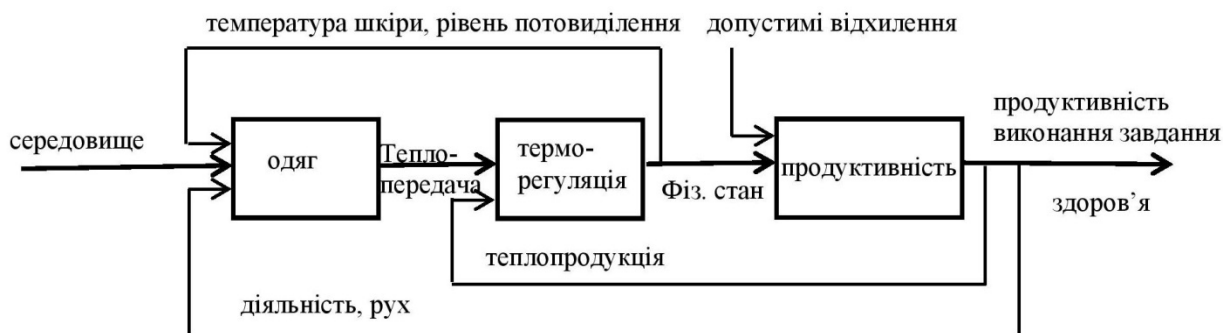


Рис. 2. Загальна схема розрахункових кроків щодо взаємодії навколишнього середовища, одягу та активності [2]

Дослідження вказують [2], що витрати енергії на виконання завдання збільшуються приблизно на 4% для кожного шару одягу. Таким чином, кількість шарів одягу повинна бути мінімальною.

Тому слід запропонувати алгоритм визначення реального термічного стану людини спираючись на розташуванні датчиків температури та відносної вологості найближче до

першого зовнішнього захисного пакету, чи шару матеріалу [3]. Відповідно необхідно оптимізувати кількість датчиків при максимальній точності мапи меж комфортності у реальному часі.

Постановка завдання. На теперішній час відсутні нормативи щодо комплектів одягу для різних погодних умов з урахуванням нових матеріалів, що застосовуються при виготовленні одягу спеціального призначення, як це вже є у країн-учасників та партнерів НАТО [4]. Слід також враховувати вплив інтенсивності рухів людини на метаболізм суб'єкту та, відповідно, враховувати вагомість застосування показника максимальної аеробної продуктивності при відборі суб'єктів для проведення досліджень та оцінювання ступеню їх тотожної навантаження під час руху [5].

Проведення досліджень у динаміці, включно з рівнем 2, супроводжується суттєвим впливом вітру та рухливості людини на опір теплопередачі одягу (ДСТУ Б EN ISO 7730), що вимагає застосування коригувальних коефіцієнтів [6]. Також слід враховувати направленість вітру відносно спини людини.

У більшості типів комплектів одягу є отвори (наприклад, коміри, манжети), через які відбувається певний повітряний обмін з навколишнім середовищем. Коли робота виконується, цей повітряний обмін може збільшитись або зменшитись [7]. Крім того, одяг може бути стиснений вітром, що зменшує його товщину, і вітер може проникати через тканини або отвори та збільшити обмін повітря мікроклімату з зовнішнім середовищем (рис.3).

Результати дослідження. При дванадцяти сегментарній циліндричній моделі тіла людини [8] симетричні половини тіла розглядаються як один сегмент. Кожен сегмент може бути додатково розділений на підсегменти, якщо це необхідно, так що кожен сегмент складається з частини поверхні тіла, яка має рівномірну температуру та рівномірно одягнена. Слід також враховувати локальні коефіцієнти з метою уникнення локального охолодження, що враховують величину необхідної ізоляції. Одномірні розрахунки теплообміну проводяться для визначення втрат тепла від кожного підсегменту за допомогою:

$$\dot{Q}_T = A_i \frac{(T_{si} - T_a)}{R_i},$$

де \dot{Q}_T - швидкість втрати тепла для підсегменту i ; A_i - площа поверхні шкіри для підсегменту i ; T_{si} - температура шкіри для підсегменту i ; T_a - температура повітря навколишнього середовища; R_i - термічний опір повітряних шарів та підсегменту ізоляції одягу i .

Термічний опір визначається як сума окремих опорів підсегментів одягу:

$$R_i = A_o \left[\sum_{j=1}^n \left(\frac{R_{aj}}{A_{j-1}} + \frac{R_{cj}}{A_j} \right) \right] + \frac{R_a}{A_n},$$

де R_i - термічна стійкість повітряних шарів та ізоляційного підсегменту одягу j ; A_o - площа поверхні шкіри; R_{aj} - термостійкість j -го повітряного шару; R_{cj} - термостійкість j -го шару тканини; A_j - площа поверхні для j -го шару тканини; R_a - термостійкість зовнішнього повітряного шару; n - кількість шарів тканини.

Модель також обчислює теплову стійкість повітряного шару:

$$R_{aj} = \frac{1}{h_R + h_a/h_{aj}}$$

де R_{aj} - терmostійкість j -го повітряного шару; h_R - коефіцієнт лінійного опромінення, який припадає на пряме випромінювання між шарами; h_a - теплопровідність повітря; h_{aj} - товщина j -го повітряного шару.

Авторами [7,9] запропоновані алгоритми корекції значень ізоляції для ефектів руху повітря та руху тіла (швидкість рухів людини).

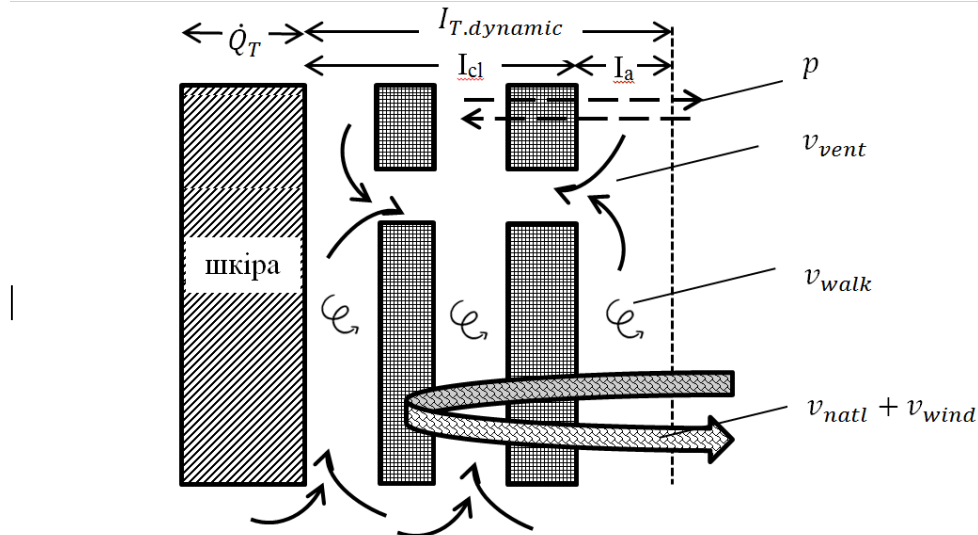


Рис. 3. Динамічна модель ізоляції одягу [10]

Проведення досліджень на другому етапі (зі використанням людей) потребує врахування їх фізичних параметрів. Авторами [11] запропоновано рівняння для визначення загальної площі поверхні тіла A_D , m^2 :

$$A_D = 0,007184 \times H_t^{0,725} \times W_t^{0,425},$$

де H_t - зріст людини, м; W_t - обхват тіла людини, м

При цьому визначення необхідної величини термоізоляції у статиці визначається рівнянням:

$$I_{T,static} = \frac{A_T(\bar{T}_s - T_a)}{\dot{Q}_T} C,$$

де $I_{T,static}$ - загальна ізоляція одягу з урахуванням повітряного шару, clo; A_T - загальна площа поверхні тіла, m^2 ; \bar{T}_s - усереднена температура шкіри, $^{\circ}C$; T_a - температура повітря навколишнього середовища, $^{\circ}C$; \dot{Q}_T - загальна швидкість втрати тепла для тіла; C - константа, $6,45 \text{ clo} \times \text{Вт}/\text{м}^2 \times ^{\circ}C$.

Коли рух людини відбувається навпроти вітру, відносна швидкість повітря для людини визначається сумою швидкості руху людини та повітря. З вітром зі спини відносна швидкість повітря є абсолютною величиною різниці між швидкістю руху людини і вітру. Для всіх інших кутів швидкість повітря може бути розрахована як (ISO 9920):

$$v_{wind} = \sqrt{[v_{walk} - v_a \times \cos(\alpha)]^2 + [v_a \times \sin(\alpha)]^2},$$

де v_a - абсолютна швидкість повітря, $m \times s^{-1}$; v_{walk} - швидкість руху, $m \times s^{-1}$; α - кут між напрямом руху людини та повітря (0° , якщо обидва розташовані в одному напрямку).

$$v_{eff} = v_{natl} + v_{wind},$$

де v_{natl} - швидкість вітру природної конвекції ($= 0.07 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$ при сидінні і $0.11 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$ при стоянні), зовнішня швидкість вітру ($\text{м} \times \text{с}^{-1}$), v_{wind} - еквівалентна швидкість руху повітря ($\text{м} \times \text{с}^{-1}$).

Швидкість руху людини (v_{walk} , $\text{м} \times \text{с}^{-1}$), яка може бути визначено рівнянням [12,13]:

$$v_{walk} = \frac{0,47}{1056 + F \times H - 0,114} \times 0,44704,$$

де F - частота кроків, кроки/хв; H - зріст людини, м.

Зауважимо, що чим більша швидкість вітру тим менший ефект від рухів людини [14]. Для спеціального захисного одягу від понижених температур (при $1,49 \text{ кло} < I_T < 3,46 \text{ кло}$) рівняння для визначення результуючої динамічної характеристики ізоляції $I_{T,r}$ буде мати вигляд:

$$I_{T,dynamic} = corr I_T \times I_{T,static} = \\ = \left[e^{-\{-0,0512 \times (v_{eff} - 0,4) + 0,794 \times 10^{-3} (v_{eff} - 0,4)^2 - 0,0639 \times v_{walk}\} \times p^{0,1434}} \right] \times I_{T,static},$$

де v_{eff} - швидкість вітру відносно людини, $\text{м} \times \text{с}^{-1}$; w - швидкість руху людини, $\text{м} \times \text{с}^{-1}$; p - повітропроникність, $\text{л} \times \text{м}^{-2} \times \text{с}^{-1}$ (ДСТУ ENV 342-2001). Умовами рівняння є: $0 < v_{walk} < 1,2 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$ і $0,4 < v_{eff} < 182 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$; $1 < p < 1000 \text{ л} \times \text{м}^{-2} \times \text{с}^{-1}$; $r^2 = 0.968$; $SEE = 0.048$.

Також слід визначити базову ізоляцію комплекту одягу (при $0,2 \text{ кло} > I_{cl} < 1,8 \text{ кло}$) за допомогою наступних емпірично визначених зав'язків (ISO 9920):

$$I_{cl} = 0,919 + 0,255 \times m - 0,00874 \times A_{COV,0} - 0,00510 \times A_{COV,1},$$

де I_{cl} - внутрішня ізоляція одягу, кло; m - вага одягу (без взуття), кг; $A_{COV,0}$ - площа поверхні тіла, не покрита одягом, у відсотках від загальної площі поверхні тіла; $A_{COV,1}$ - площа поверхні тіла, покрита одиничним шаром одягу, як відсоток від загальної поверхні тіла.

Слід також враховувати, що запропоновані вирази не враховують суб'єктивний тепловий комфорт, у цьому випадку допускаються незначні доповнення до комплектів.

Висновки. Прогнозування динамічних характеристик ізоляції комплектів одягу в умовах низьких температур дозволить підвищити надійність виконання точних операцій та оптимізувати компенсаторні заходи одразу після виконання завдань. Застосування даного методу дозволить досягти прискореного прогнозування максимального часу перебування в умовах низьких температур при невідомих чи не коректних біофізичних характеристиках пакетів.

Література

1. Havenith G. Laboratory assessment of cold weather clothing // Textiles for cold weather apparel, Woodhead Publishing in Textiles. – 2009. – P. 217-243.
2. Lotens W. A. Heat transfer from humans wearing clothing : дис. – TNO, 1993.
3. Курганський А. В. Принцип зонально-диференційованого розташування елементів бездротових сенсорних мереж моніторингу

References

1. Havenith G. (2009) [Laboratory assessment of cold weather clothing]. Textiles for cold weather apparel, Woodhead Publishing in Textiles. P. 217-243. [In English]
2. Lotens W. A. (1993) [Heat transfer from humans wearing clothing] TNO, 1993. [In English]
3. Kurganski A.V., Bereznenko S.M., Kurganska M.M. (2016) *Pryntsyp zonalno-dyferentsiiovanoho roztašuvannia elementiv bezdrotovykh sensorykh*

мікроклімату під одягом / А. В. Курганський, С. М. Березненко, М. М. Курганська // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки. - 2016. - № 5 (102). - С. 118-125.

4. Ducharme M. B., Brajkovic D. Guidelines on the risk and time to frostbite during exposure to cold winds. – Defence research and development Toronto (CANADA), 2005.

5. Курганська М. М. Оцінювання сумісності елементів перспективних комплектів бойового спорядження: аеробна продуктивність організму суб'єктів / М. М. Курганська, С. М. Березненко, А. О. Малій, А. В. Курганський, В. М. Василенко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки. - 2017. - № 1 (106). - С. 59-65.

6. Havenith G. Heat balance when wearing protective clothing //Annals of Occupational Hygiene. – 1999. – Т. 43. – №. 5. – С. 289-296.

7. Havenith G. et al. Clothing evaporative heat resistance-proposal for improved representation in standards and models //Annals of Occupational Hygiene. – 1999. – Т. 43. – №. 5. – P. 339-346.

8. Holmér I. et al. Clothing convective heat exchange—proposal for improved prediction in standards and models //Annals of Occupational Hygiene. – 1999. – Т. 43. – №. 5. – С. 329-337.

9. McCullough E. A., Jones B. W., Huck J. A comprehensive data base for estimating clothing insulation //Ashrae Trans. – 1985. – Т. 91. – №. 2. – P. 29-47.

10. Parsons K. C. et al. The effects of wind and human movement on the heat and vapour transfer properties of clothing //Annals of Occupational Hygiene. – 1999. – Т. 43. – №. 5. – P. 347-352.

11. Potter A. W. et al. Mathematical prediction of core body temperature from environment, activity, and clothing: The heat strain decision aid (HSDA) //Journal of Thermal Biology. – 2017. – Т. 64. – P. 78-85.

12. Hong S. M. Hong's Psychological Reactance Scale: A further factor analytic validation //Psychological Reports. – 1992. – Т. 70. – №. 2. – P. 512-514.

13. Pan N., Gibson P. (ed.). Thermal and moisture transport in fibrous materials. – Woodhead Publishing, 2006.

14. Havenith G., Nilsson H. O. Correction of

meresh monitorynhu mikroklimatu pid odiahom [The principle of area-differentiated arrangement of wireless sensor network for microclimate monitoring under clothing space] BULLETIN of the Kyiv National University of Technologies and Design «Technical Science Series». no. № 5 (102). P. 118-125. [in Ukrainian]

4. Ducharme M. B., Brajkovic D. (2005) [Guidelines on the risk and time to frostbite during exposure to cold winds] Defence research and development Toronto (CANADA). [In English]

5. Kurganska M.M., Berezenko S.M., Maliy A.O., Kurhanskyi A.V., Vasylenko V.M. (2017) *Otsiniuvannia sumisnosti elementiv perspektyvnykh komplektiv boiovoho sporiadzhennia: aerobna produktyvnist orhanizmu sub'iektiv* [The future combat uniform systems: interoperability evaluation of subsystems with soldier's aerobic capacity] BULLETIN of the Kyiv National University of Technologies and Design «Technical Science Series». no. 1 (106). P. 59-65. [in Ukrainian]

6. Havenith G. (1999) [Heat balance when wearing protective clothing] Annals of Occupational Hygiene. T. 43. no. 5. P. 289-296. [In English]

7. Havenith G. et al. (1999) [Clothing evaporative heat resistance-proposal for improved representation in standards and models] Annals of Occupational Hygiene. T. 43. no. 5. P. 339-346. [In English]

8. Holmér I. et al. (1999) [Clothing convective heat exchange-proposal for improved prediction in standards and models] Annals of Occupational Hygiene. T. 43. no. 5. P. 329-337. [In English]

9. McCullough E. A., Jones B. W., Huck J. (1985) [A comprehensive data base for estimating clothing insulation] Ashrae Trans. T. 91. no. 5. P. 29-47. [In English]

10. Parsons K. C. et al. (1999) [The effects of wind and human movement on the heat and vapour transfer properties of clothing] Annals of Occupational Hygiene. T. 43. no. 5. P. 347-352. [In English]

11. Potter A. W. et al. (2017) [Mathematical prediction of core body temperature from environment, activity, and clothing: The heat strain decision aid (HSDA)] Journal of Thermal Biology. T. 64. P. 78-85. [In English]

12. Hong S. M. (1992) [Hong's Psychological Reactance Scale: A further factor analytic validation] Psychological Reports. T. 70. no. 2. P. 512-514. [In English]

13. Pan N., Gibson P. (ed.). (2006) [Thermal and moisture transport in fibrous materials]. Woodhead Publishing. [In English]

14. Havenith G., Nilsson H. O. (2004) [Correction of

clothing insulation for movement and wind effects, a meta-analysis // European journal of applied physiology. – 2004. – Т. 92. – №. 6. – P. 636-640.

clothing insulation for movement and wind effects, a meta-analysis] European journal of applied physiology. Т. 92. no. 6. P. 636-640. [In English]

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОЛЯЦИИ
КОМПЛЕКТОВ ОДЕЖДЫ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР**
КУРГАНСКАЯ М.Н. * ВАСИЛЕНКО В.Н. * КУРГАНСКИЙ А.В. *, САКОВЕЦ В.В. **,
МАЛИЙ А.О.***, ОПАНАСЕНКО К.В. *

*Киевский национальный университет технологий и дизайна

** Главное управление развития и сопровождения материального обеспечения ВСУ

Цель. Определение влияния динамических факторов на изоляцию комплектов одежды в условиях низких температур при снижении компенсаторных потерь.

Методика. Аналитический обзор и систематизация научно-технической информации по определению динамической характеристики изоляции комплектов одежды в соответствии с ДСТУ Б EN ISO 7730, ISO 9920.

Результаты. Проанализировано влияние движений человека, скорости ветра и угла его влияния при определении динамической характеристики изоляции, также влияние количества слоев на производительность выполнения задач.

Научная новизна. Предложены пути совершенствования процесса проектирования комплектов специальной одежды, учитывающие интенсивность охлаждающего фактора, эффекты изменения динамических характеристик изоляции и корректирующие коэффициенты движения воздуха в пакетах и движения тела.

Практическая значимость. Ускорение прогнозирования максимального времени пребывания в условиях низких температур. Рекомендации по совершенствованию существующих специальных комплектов для защиты от холода.

Ключевые слова: смарт одежда, специальная одежда, комфортность, беспроводные сенсорные сети, мониторинг микроклимата.

**PREDICTION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THERMAL INSULATION
PROPERTIES OF WINTER CLOTHING SETS**
KURGANSKA M.M. *, VASILENKO V.M. *, KURGANSKIY A.V. *, SAKSOVETS V.V. **,
MALII A.O.***, OPANASENKO K.V. *

* Kiev National University of Technologies and Design

** General Directorate for Development and Monitoring of Material Support of the Armed Forces of Ukraine

Purpose. Determination of the influence of dynamic factors on thermal insulation properties clothing sets in low-temperature conditions while reducing compensatory losses.

Methodology. Analytical review and systematization of scientific and technical information on determining the dynamic characteristics of clothing isolation in accordance with DSTU B EN ISO 7730, ISO 9920.

Findings. The influence of human movements, wind speed and the angle of its influence on the determination of the dynamic characteristics of insulation, as well as the influence of the number of layers on the performance of the tasks, is analyzed.

Scientific novelty. The ways of improving the process of designing special clothing sets which take into account the effects of changes in the dynamic characteristics of insulation and corrective coefficients of air motion in packages and body movement are proposed.

Practical value. Acceleration of prediction of the maximum time of exposure in conditions of low temperatures. Recommendations for the improvement of existing special kits for protection from the cold.

Keywords: comfort, special clothes, protection from cold, dynamic characteristics of isolation.