

Богдан ШТАЙН, к.т.н.

## Проверка эффективности индивидуальной защиты спасателя во время действий в случае промышленных аварий

### *Analysis of the Effectiveness of the Rescuers Individual Protection during Action in Case of Industrial Accidents*

### *Badanie efektywności ochrony osobistej ratowników podczas działań w przypadku awarii przemysłowej*

В статье приведены результаты проведенных теоретических исследований тепломассопереноса в отдельных элементах пакета специального материала газохимзащитной одежды спасателя для оценки морозоустойчивости и уровня защиты при воздействии низких температур с учетом микроклимата подкостюмного пространства в среде «низкая температура – защитная одежда – человек». Принцип заключается в определении достижения предельной температуры в подкостюмном пространстве между агрессивной средой и телом человека с учетом теплофизических показателей аккумулированным телом человека. На основе теоретических исследований предложены пути усовершенствования метода оценивания морозоустойчивости пакета средств индивидуальной защиты спасателей в условиях действия низких температур при аварии с выбросом (утечкой) аммиака. Принцип определения морозоустойчивости пакетов защитной одежды заключается в определении индекса морозоустойчивости. С его помощью можно провести оценку эффективности газохимзащитной одежды спасателей в условиях приближенных к эксплуатационным при авариях в помещениях автоматизированных холодильных установках.

**Ключевые слова:** газохимзащитная одежда, спасатель, низкая температура, морозоустойчивость, аммиак

## Summary

The article presents the results of theoretical research in heat mass transfer in individual elements of the rescuer's special material package gas-chemical-safe suit, frost-resistance and level of protection at low temperature considering microclimate under suit space within the «low temperature – protective clothing – a man». The principle is to identify the achievements of the anger-suit limit temperature in the space between the aggressive environment and the human body taking into account the thermal performance of accumulated human body. Based on theoretical studies, there were suggested ways to improve the method of assessing frost-resistance of personal protective clothing in case of low-temperature effect with the ammonia release (spout). The principle definition of the frost-resistance protective clothing packages determines the index of frost-protective. It is very helpful in the evaluation of the effectiveness of gas-chemical protective rescuers' clothes in conditions close to operational failures at the premises of automated refrigerators.

**Keywords:** gas-chemical protective clothing, rescuer, low temperature, frost-resistance, ammonia

## Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań teoretycznych, dotyczących wymiany ciepła i masy w oddzielnych elementach pakietu materiałów specjalnych gazoszczelnego ubrania ratownika. Dzięki nim można oszacować zdolność zachowania swoich właściwości ochronnych od niskich temperatur, biorąc pod uwagę mikroklimat przestrzeni pod ubraniem w środowisku: niska temperatura – ubranie ochronne – człowiek.

Zasada polega na określaniu osiągnięcia temperatury granicznej między środowiskiem agresywnym, a ciałem człowieka, uwzględniając wskaźniki cieplne akumulowane ciałem.

Na podstawie teoretycznych badań zaproponowano sposoby doskonalenia metod oceny pakietu ochronnego ubrania przy zachowywaniu właściwości ochronnych od niskich temperatur podczas awarii z amoniakiem. Zasada określenia właściwości ochronnych od niskich temperatur pakietu materiałów polega na określaniu indeksu stabilności mroźnej. Z jego pomocą możliwa jest ocena efektywności gazoszczelnego ubrania w warunkach podobnych do eksploatacyjnych podczas awarii w pomieszczeniach z zautomatyzowanymi instalacjami chłodzeniowymi.

**Słowa kluczowe:** gazoszczelne ubranie, ratownik, niska temperatura, amoniak

**Актуальность темы.** Чрезвычайные ситуации с выбросом (утечкой) аммиака, на сегодняшний день являются проблемой, как для Украины, так и для мирового сообщества. В отечественном промышленном комплексе функционирует 1004 объекта, в технологическом процессе которых используется или хранится более 300 тыс. тонн опасных химических веществ. Почти 80% аммиачно-холодильных установок находятся в неудовлетворительном состоянии из-за отсутствия в Украине производства комплектующих, физического и морального их старения. Холодопроизводительность действующих аммиачно-холодильных установок (АХУ) значительно ниже, чем их аналогов, применяемых в странах Евросоюза, и приводит к применению, в технологиях, значительно, больших объемов аммиака.

Последствия таких чрезвычайных ситуаций могут быть катастрофическими особенно в период проведения антитеррористической операции на востоке Украины. Реальная опасность подтверждается случаями чрезвычайных ситуаций, сопровождающихся большим количеством пострадавших на примере техногенной аварии, произошедшей 6 августа 2013 на заводе ОАО «Концерн Стирол», который расположен в городе Горловка Донецкой области, в результате чего произошел выброс аммиака в воздух. В результате аварии шесть человек погибли и пострадали 26 человек, которые обратились за медицинской помощью, 25 из них были госпитализированы [1].

Снижению уровня безопасности химических производств способствует несовершенство нормативно-правовой базы, которая не обеспечивает в новых экономических условиях стабильного функционирования производств, стимулирование мероприятий по уменьшению риска возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС).

Кроме объектов хранения и применения в технологическом процессе в Украине существует еще один потенциально опасный объект – амиакогон, который проложен по южной территории нашего государства. Магистральный амиакогон «Тольятти-Одесса» введен в эксплуатацию в ноябре 1976 года. Общая протяженность амиакогона 2 417 км, в том числе по территории Украины – 1018 км.

При этом в зонах возможного поражения проживает 20,6% населения страны. В то же время анализ чрезвычайных ситуаций с выбросом опасных химических веществ дает возможность утверждать, что активное участие в их ликвидации спасателей приводит к резкому уменьшению возможных последствий. Учитывая это, исследования эффективности и надежности специальной защитной одежды в зависимости от условий его использования, непосредственно влияют на качество и эффективность выполнения поставленных задач по ликвидации чрезвычайных ситуаций на амиакогоне и объектах по использованию аммиака, обеспечит уменьшение производственного травматизма среди спасателей.

В этом направлении было выполнено значительное количество научно-исследовательских работ. В первую очередь необходимо выделить работы таких ученых как: А.А. Мичка, О.С. Засорнова, Т.О. Польки – Украина, В.И.Логина – Россия, William E. Mell – Великобритания, Anna Marszajek – Республика Польша [2-4].

Несмотря на имеющуюся теоретическую базу и достигнутые практические результаты, вопрос объективной оценки защитных показателей качества специальных материалов газохимзащитной одежды спасателей в условиях приближенных к эксплуатационным, и раскрытие особенностей которой, определения времени защиты костюма с учетом метаболического тепла человека являются актуальными.

**Цель исследований** заключается в совершенствовании метода и технических средств оценки морозоустойчивости эффективности пакета специальных материалов, предназначенных для применения в газохимзащитной одежде спасателя, как средства его индивидуальной защиты, для определения безопасного времени эксплуатации.

**Теоретические исследования.** Теоретические исследования тепломассопереноса в отдельных элементах пакета специального материала газохимзащитной одежды спасателя для оценки морозоустойчивости и уровня защиты при воздействии низких температур (до  $-40^{\circ}\text{C}$ ) с учетом микроклимата подкостюмного пространства в среде «низкая температура – защитная одежда – человек». Принцип заключается в определении достижения предельной температуры ( $18^{\circ}\text{C}$ ) в подкостюмном пространстве между агрессивной средой и телом человека с учетом теплофизических показателей аккумулированных телом человека.

Было определено, что в условиях чрезвычайной ситуации на АХУ основная нагрузка по защите от агрессивной среды принимает газохимзащитная одежда спасателя (1-й слой), пакет материалов защитной одежды спасателя, который состоит из 3-х слоев, что придает дополнительную защиту от низкой температуры. Газохимзащитная одежда практически обеспечивает герметичную среду между человеком и газовоздушной средой, а удержание температуры в подкостюмном пространстве обеспечивает защитная одежда пожарного общего назначения (2-4-й слои), которая в свою очередь, обеспечивая минимизацию снижения температуры тела человека. Подкостюмное пространство (5-й слой) между человеком и защитной одеждой демпфирует остаточную тепловую нагрузку, которая выделяется из человека, определенной густотой теплового потока  $q_p \approx 260 \text{ Вт/м}^2$  [5].

Считаем, что ось  $x$  перпендикулярна поверхности пакета и рассматриваем одномерную задачу теплопроводности, характеризующую прохождение теплоты через 4 слоя общей толщиной  $\delta$  м. Особенностью задачи является то,

что снижение температуры через пакет сопровождается герметичностью слоя (1-й слой), что не допускает прохождения вещества (массы частиц газа из внешней среды). Поэтому среда воздуха (промежуток) между пакетом и телом человека выступает как ловушка для паровоздушной смеси. Общеизвестно, что из тела человека выделяется пот, испарения которого создают дополнительное давление, которое затрудняет проникновение газовой среды. Таким образом, тепло, аккумулированное телом ( $\Delta T = 34^\circ\text{C}$ ) и внешней средой, накапливается в воздушной прослойке междукостюмного пространства. При действии отрицательных температур частицы демпфирующей паровоздушной смеси, в этот промежуток, из внешней среды через пакет пытаются высвободиться, но не выходят из него. Это приводит к росту давления в воздушном промежутке между телом человека и комбинезоном. Прохождение молекул вещества (газа) через пакет описано как диффузное соотношение.

Действие низкотемпературной внешней среды на слои спецодежды (пакета) охарактеризуют четыре фазы:

- Поглощение теплоты внешним поверхностным или межфазным слоем и последующая передача энергии внутрь материала каждого из четырех слоев;
- Охлаждение материала каждого из четырех слоев без разрушения;
- Режим стационарной теплопроводности, или изменение агрегатного состояния (испарение, сублимация или термодеструкция и каждый из этих процессов может приводить к полному или частичному разрушению слоя)
- Нагревание (релаксация) материала после снятия внешней низкотемпературной нагрузки.

В результате тепловых воздействий температурное поле пакета и среды, между телом человека и пакетом, может нелинейно меняться во времени. Моделирование процессов распространения теплоты и диффузных частиц в системе «пакет одежды» – «прослойка между пакетом и телом спасателя» с учетом теплоты проведен с использованием нелинейного балансового соотношения термодиффузии (подход неравновесной термодинамики).

Математическая модель физических процессов представлена в виде двух дифференциальных одномерных уравнений теплопроводности и диффузии с начальными (при  $\tau = 0$ ,  $x = x_1$ ,  $x = x_2$ ,  $x = x_3$ ,  $x = x_4$ ,  $x = x_5$ ) в декартовой системе координат где:

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial m_c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial m_c}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (2)$$

где  $c$  – массовая удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К);  $t$  – время, с;  $\rho$  – объемная плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $T$  – температура материала К;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $a_T = \lambda/(c\rho)$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $m_c$  – массовая концентрация (масса компонента в расчете на единицу массы смеси, безразмерная величина);  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $D_T$  – коэффициент, который характеризует изменение диффузионного потока между диффузией и теплопроводностью.

Принятыми решениями математической модели процесса тепломассопереноса, которая описана дифференциальным уравнением (2) является присоединение к его условиям обозначенности.

В соответствии с проведенным анализом моделей ГХЗО их максимальная толщина составляет не более 0,006 м, поскольку увеличение его толщины приводит к ухудшению эргономических показателей.

Уравнения (1) запишем в виде:

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (4)$$

Для уравнения теплопроводности на внешней стороне пакета использовано граничное условие второго рода (при  $x = 0$ , рис. 1).

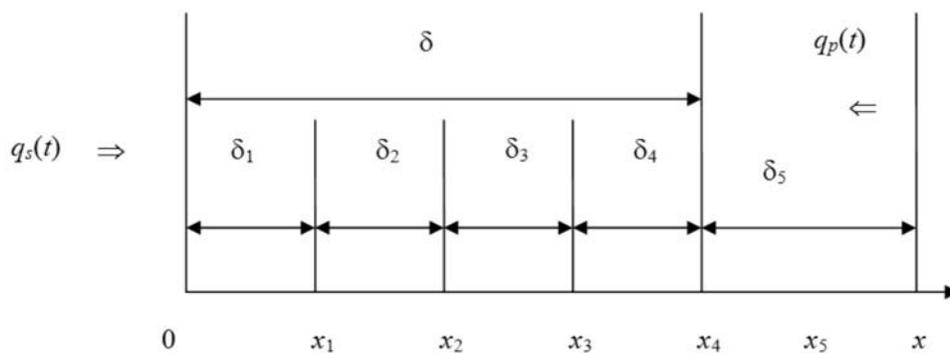


Рис.1. Схема слоев компоновки средств индивидуальной защиты, толщиной  $\delta$  (м), и действия температурных потоков окружающей среды  $q_s(t)$  и тела человека  $q_p(t)$

Это условие состоит в задании плотности теплового потока для каждой точки внешней поверхности тела (пакета) как функции времени  $t$ , то есть:

$$q_s(t) = f(t), (x=0). \quad (5)$$

Условие 2-го рода (5) означает, что криволинейной зависимости температуры может соответствовать любая ордината на внешней поверхности пакета (при  $x=0$ ), но обязательно заданный градиент параметра  $T$  ( $q_s(t) \sim gradT$ ). Простой (частичный) вариант граничного условия второго рода состоит в постоянстве (независимости от времени) плотности теплового потока:

$$q_s(t) = q_{sc} = const. \quad (6)$$

Введем обозначения температур  $T_i$  и концентраций диффундирующего вещества  $m_{ci}$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5$ ) в областях пакета ( $0 \leq x \leq x_p$ ,  $\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4$ ) и вне его:

$$\begin{aligned} \text{область (1): } & 0 \leq x \leq x_p, \delta_1 = x_p - 0, T_{10} \leq T_1 \leq T_{11}, T_{10} - \text{при } x = 0, T_{11} - \text{при } x = x_p; \\ \text{область (2): } & x_1 \leq x \leq x_2, \delta_2 = x_2 - x_1, T_{21} \leq T_2 \leq T_{22}, T_{21} = T_{11} - \text{при } x = x_1; \\ \text{область (3): } & x_2 \leq x \leq x_3, \delta_3 = x_3 - x_2, T_{32} \leq T_3 \leq T_{33}, T_{32} = T_{22} - \text{при } x = x_2; \\ \text{область (4): } & x_3 \leq x \leq x_4, \delta_4 = x_4 - x_3, T_{43} \leq T_4 \leq T_{44}, T_{43} = T_{33} - \text{при } x = x_3; \\ \text{область (5): } & x_4 \leq x \leq x_s, \delta_5 = x_s - x_4, T_{45} = T_5 = T_5(t) - \text{при } x > x_4; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{область (1): } & 0 \leq x \leq x_p, m_{c10} \leq m_{c1} \leq m_{c11}; \\ \text{область (2): } & x_1 \leq x \leq x_2, m_{c21} \leq m_{c2} \leq m_{c22}, m_{c21} = m_{c11} \text{ при } x = x_1; \\ \text{область (3): } & x_2 \leq x \leq x_3, m_{c32} \leq m_{c3} \leq m_{c33}, m_{c32} = m_{c22} \text{ при } x = x_2; \\ \text{область (4): } & x_3 \leq x \leq x_4, m_{c43} \leq m_{c4} \leq m_{c44}, m_{c43} = m_{c33} - \text{при } x = x_3; \\ \text{область (5): } & x_4 \leq x \leq x_s, m_{c45} = m_{c5} = m_{c5}(t) - \text{при } x > x_4. \end{aligned} \quad (8)$$

В соотношениях (7), (8)  $T_i(x, t)$ ,  $m_{ci}(x, t)$  – температуры и концентрации диффундирующих веществ (газов), которые соответствуют областям с индексами  $i = 1, 2, \dots, 5$  соответственно,  $T_{ij}(t)$ ,  $m_{cij}(t)$  – предельные температуры и концентрации газов, в которых первый индекс соответствует номеру области, второй – индексу границы ( $x_i$ ) промежутки  $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$  – в общем случае не равны между собой ( $\delta_1 \neq \delta_2 \neq \delta_3 \neq \delta_4$ ).

Область (7) ( $x_4 \leq x \leq x_s$ ) четко не определена ( $\delta_5$  – переменная величина), поскольку это область (воздушная прослойка с бельем или без нее) между телом человека и защитной одеждой (пакетом).

Следовательно, понятие характеристической функции полуоткрытого интервала, где  $x$  – толщина узла,  $m$  (рис. 2).

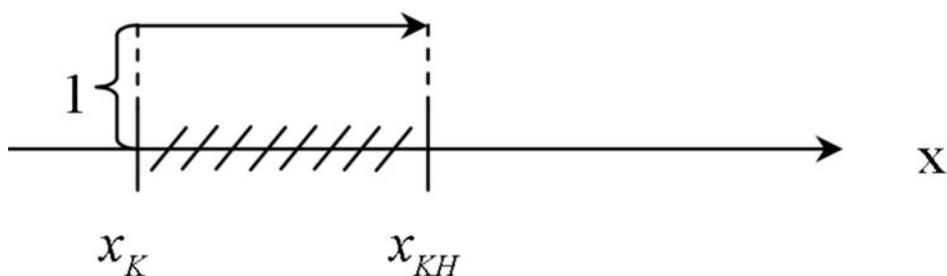


Рис. 2. Схема распределения интервала в определенном узле

Для граничного узла 1 уравнение розничной сетки имеет вид:

$$\lambda = \sum_{K=0}^{n-1} \lambda_K * \theta_K \quad (9)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности в определенном узле,  $Bm/m \cdot K$ ;

$$\theta_K = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in [x_K, x_k) \\ 0, & \text{если } x \notin [x_K, x_k). \end{cases}$$

Введен вектор  $\bar{T} = \begin{pmatrix} T \\ T^{[1]} \end{pmatrix} = (T, T^{[1]})^T$ , где через  $T^{[1]}$  обозначено  $(\lambda T')$  (тепловой поток). Непосредственной проверкой убеждаемся, что дифференциальное уравнение (1) эквивалентно равносильно системе 1-го порядка:

$$\begin{pmatrix} T \\ T^{[1]} \end{pmatrix}' = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{\lambda}{\lambda} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T \\ T^{[1]} \end{pmatrix} \quad (10)$$

К системе (10) следует добавить начальное условие:

$$\begin{pmatrix} T \\ T^{[1]} \end{pmatrix} \Big|_{x=x_0} = \begin{pmatrix} T^0 \\ -q \end{pmatrix} \quad (11)$$

На промежутке  $[x_K, x_k)$  система (11) имеет вид:

$$\begin{pmatrix} T_K \\ T_K^{[1]} \end{pmatrix}' = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \lambda_K & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_K \\ T_K^{[1]} \end{pmatrix} \quad (12)$$

Решение (12) проводим построением системы матрицы Коши:

$$1) \quad \begin{vmatrix} -K & 1 \\ 0 & -K \end{vmatrix} = K^2 = 0, \quad K_1 = 0, K_2 = 0; T_K = C_1, \\ T_K^{[1]} = C_2 x;$$

2) Интегральная матрица имеет вид:

$$Y_K(x) = \begin{pmatrix} 1 & x \\ 0 & \lambda_K \end{pmatrix},$$

$$3) \quad Y_K^{-1}(S) = \frac{1}{\lambda_K} \cdot \begin{pmatrix} \lambda_K & -S \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{S}{\lambda_K} \\ 0 & \frac{1}{\lambda_K} \end{pmatrix}$$

$$4) \quad B_K(x, S) = \begin{pmatrix} 1 & x \\ 0 & \lambda_K \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\frac{S}{\lambda_K} \\ 0 & \frac{1}{\lambda_K} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \left(-\frac{S}{\lambda_K} + \frac{x}{\lambda_K}\right) \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{x-S}{\lambda_K} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Итак:

$$B_K(x, S) = \begin{pmatrix} 1 & \frac{x-S}{\lambda_K} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

Учитывая систему (13), записываем дифференциальное уравнение (1), который будет иметь вид:

$$\bar{y}' = B(x, x_0) \cdot \bar{y}^0 \quad (14)$$

Замечание:  $B(x_3, x_2) \cdot B(x_2, x_1) = B(x_3, x_1)$  (условие «гармоничности»). На основе этого свойства, когда  $x \in [x_K, x_{K+1})$ ,

$$B(x, x_0) = B_K(x, x_K) \cdot B_{K-1}(x_K, x_{K-1}) \cdot B_{K-2}(x_K, x_{K-2}) \cdot \dots \cdot B_0(x_1, x_0) \quad (15)$$

Легко убедиться, что для произвольного количества множителей для,

$$B(x, x_0) = \begin{pmatrix} 1 & \frac{x-x_K}{\lambda_K} + \frac{x_K-x_{K-1}}{\lambda_{K-1}} + \dots + \frac{x_1-x_0}{\lambda_0} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \left[ \frac{x-x_K}{\lambda_K} + \sum_{i=0}^{K-1} \frac{x_{i+1}-x_i}{\lambda_i} \right] \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

Тогда, согласно (14) решение задачи (11), (12) имеет вид:

$$\begin{aligned} \bar{T}(x) &= B(x, x_0) \cdot \begin{pmatrix} T^0 \\ -q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \left[ \frac{x-x_K}{\lambda_K} + \sum_{i=0}^{K-1} \frac{x_{i+1}-x_i}{\lambda_i} \right] \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T^0 \\ -q \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} T^0 - q \cdot \left[ \frac{x-x_K}{\lambda_K} + \sum_{i=0}^{K-1} \frac{x_{i+1}-x_i}{\lambda_i} \right] \\ q \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (17)$$

Тогда, температура  $T_K(x)$  на промежутке  $[x_K, x_{K+1})$  такая:

$$T_K(x) = T^0 - q \left[ \frac{x-x_K}{\lambda_K} + \sum_{i=0}^{K-1} \frac{x_{i+1}-x_i}{\lambda_i} \right] \quad (18)$$

где  $T_K(x)$  - температура в определенной точке, К;  $T^0$  - температура действия, К;  $q$  - плотность теплового потока, кВт / м<sup>2</sup>;  $\lambda_i$  - коэффициент теплопроводности в и-м узле, Вт / м·К.

Расчет температур необходимо осуществлять в конце. После расчетов получают числовые данные, характеризующие изменение температуры пакета защитной одежды в каждом материале определенных узлов.

Для анализа процесса распространения теплоты в системе «спец. одежда – спасатель» использовано граничное условие второго рода, которое заключается в задании плотности теплового потока для каждой точки внешней поверхности тела (пакета) как функции времени  $t$ .

Моделирование распространения теплоты в системе «низкая температура – защитная одежда – человек» разделено на два этапа: на первом описано снижение теплоты в многослойном пакете, на втором – распространение теплоты в композиционной среде между пакетом и телом человека, которое разделено

на две области (область воздуха, в которой растет давление продифундированной парообразной среды, и пористая среда между телом спасателя и пакетом), что даст нам возможность более подробно, с учетом медико-биологических аспектов человека, определить время защиты спасателя при эксплуатации ГХЗО.

**Основные результаты исследований.** На основе теоретических исследований предложены пути усовершенствования метода оценивания морозоустойчивости пакета средств индивидуальной защиты спасателей в условиях действия низких температур (до  $-40^{\circ}\text{C}$ ) при аварии с выбросом (утечкой) аммиака. Принцип определения морозоустойчивости пакетов защитной одежды заключается в определении индекса морозоустойчивости ( $I_{зах}^K$ ). С его помощью можно провести оценку эффективности ГХЗО спасателей, в условиях приближенных к эксплуатационным при авариях в замкнутом пространстве АХУ.

На основе метода для оценки криозащитных свойств материала (пакета) предложено использовать ряд характеристик:

- снижение температуры на изнаночной поверхности испытательного образца пакета материалов до значения  $18^{\circ}\text{C}$  (соответствует предельной температуре относительно комфортного ощущения человека  $T_{пра}$ )
- превышение температуры на изнаночной поверхности образца пакета материалов спецодежды по заранее определенному сроку действия – 60с (эта характеристика (кривая Stoll [6]) может быть отнесена к дополнительным, но она дает практическое представление о защитных свойствах)
- защитный индекс морозоустойчивости: отношение количества тепла, блокированного материалом (пакетом), к количеству тепла, действующего по заранее определенному времени, которое вычисляют по формуле:

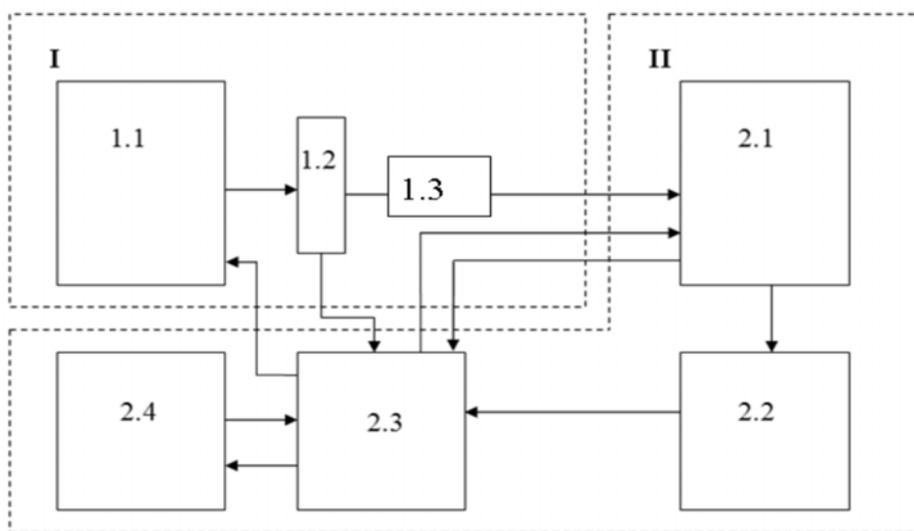
$$I_{зах}^K = \frac{\Delta(T^0 - T_{пра})}{\tau_{зах}^{\max}} \quad (19)$$

где  $I_{зах}^K$  – индекс морозостойкости;  $T^0$  – температура действия,  $^{\circ}\text{C}$   $T_{пра}$ ; граничная температура относительно комфортного ощущения человека,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau_{зах}^{\max}$  – максимальное время пребывания спасателя в условиях действия низких температур, мин. При учете разниц температур  $58^{\circ}\text{C}$ , индекс морозоустойчивым должен составлять в пределах  $1,3 \leq I_{зах}^K \leq 2,9$ .

Если выполнена аппроксимация зависимости (18), то возможно аналитически рассчитать критерии уравнений (19) определив исходные температурные показатели действия. Уравнение (19) дает возможность упростить расчет оценки эффективности пакетов материала во время действие низких температур.

Для определения температуры на изнанке исследуемых материалов разработан прибор «Оценивания криозащитных свойств» (ОКЗС-КД2) для исследования морозоустойчивости пакета средств индивидуальной защиты

используемых при ликвидации аварии с утечкой (выбросом) аммиака. Прибор выполнен в соответствии с рекомендациями насчет общей схемы теплофизических приборов. Согласно этих рекомендаций, прибор содержит криокамеру с хладагентом, компрессорную установку (I) и электроизмерительный (II) блок (рис. 3).



**Рис. 3.** Структурная блок-схема прибора ОКЗС-КД2 для оценки морозоустойчивости пакета защитной одежды; I герметичная криокамера, которая содержит:

1.1 – радиатор; 1.2 – преобразователи температуры; 1.3 – испытательный образец пакета средств индивидуальной защиты; II электроизмерительный блок состоит из 2.1 системы внешнего сканирования выворотной поверхности испытательного образца; 2.2 – устройства приема и обработки результатов; 2.3 – устройства синхронизации и записи информации; 2.4 – ПК

Принцип работы прибора ОКЗС-КД2 заключается в преобразовании световой волны в электрическую и определения времени защиты спасателя при эксплуатации средств индивидуальной защиты и достижения предельной ( $18^{\circ}\text{C}$ ) температуры на изнаночной поверхности испытательного образца при воздействии низких температур (до  $-40^{\circ}\text{C}$ ). Особым отличием современного технического средства является то, что в камере сканирования имитируются условия подкостюмного пространства с определенной температурой поверхности кожи человека ( $\Delta T = 34^{\circ}\text{C}$ ), которую аккумулирует тело человека.

Схема разработанного пилотного образца прибора для оценки уровня эксплуатационных свойств специальных материалов ГХЗО спасателей изображена на рис. 4.

Прибор состоит из трех частей: камеры испытания (I), камеры сканирования или имитации подкостюмного пространства (II), системы приема обработки и хранения результатов.

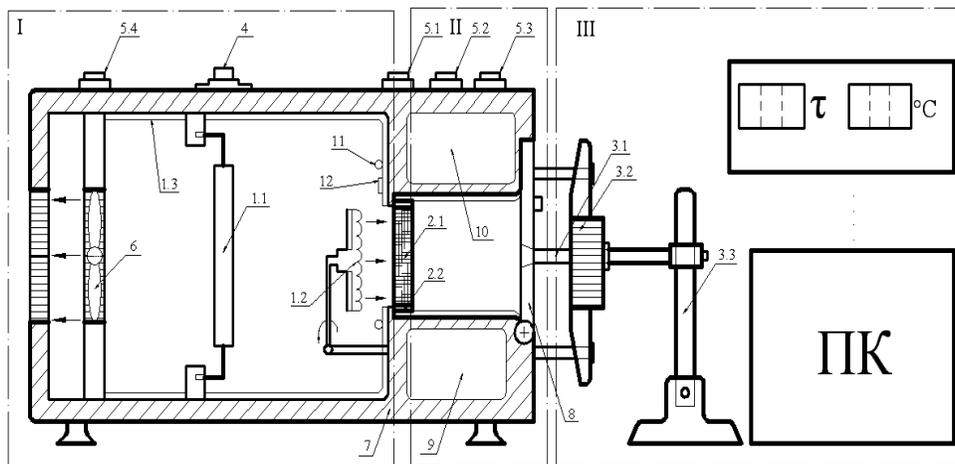


Рис. 4. Схема прибора ОКЗС-КД2:

- 1.1 – радиатор; 1.2 – преобразователи температуры; 1.3 – камера охлаждения;
- 2.1 – испытательный образец; 2.2 – панель крепления испытательного образца;
- 2.3 – керамическая пластина с обмоткой для нагрева имитационной камеры под костюмного пространства; 3.1 – зеркальная система сканирования; 3.2 – устройство внешнего сканирования; 3.3 – штатив крепления; 4 – регулятор температуры;
- 5.1-5.4 – выключатели режимов работы; 6 – вытяжной вентилятор; 7 – корпус;
- 8 – дверцы; 9, 10 – приборы контроля; 11 – датчики контроля температуры

С целью автоматизации полученных экспериментальных результатов определения температурных режимов, разработан алгоритм и программа расчета индекса морозоустойчивости  $I_{зах}^K$  для ПК (рис. 5).

Полученные данные регистрируются на диске ПК. После окончания, результаты эксперимента отражаются в графическом интерфейсе.

Программа определения критериев оценки средств индивидуальной защиты от воздействия низких температур содержит две пиктограммы, которые предназначены для обработки данных в регулярной или стационарной стадии эксперимента изображена на рис. 6.

Разработанный метод и прибор для оценки морозостойкости пакета ГХЗО спасателя, используемой при ликвидации аварий с выбросом (утечкой) аммиака, сочетает в себе взаимосвязь теоретических и экспериментальных исследований по определению температурных режимов подкостюмного пространства. Предложенная методология является основой для определения времени защиты спасателя при эксплуатации ГХЗО на ранних стадиях его формирования.

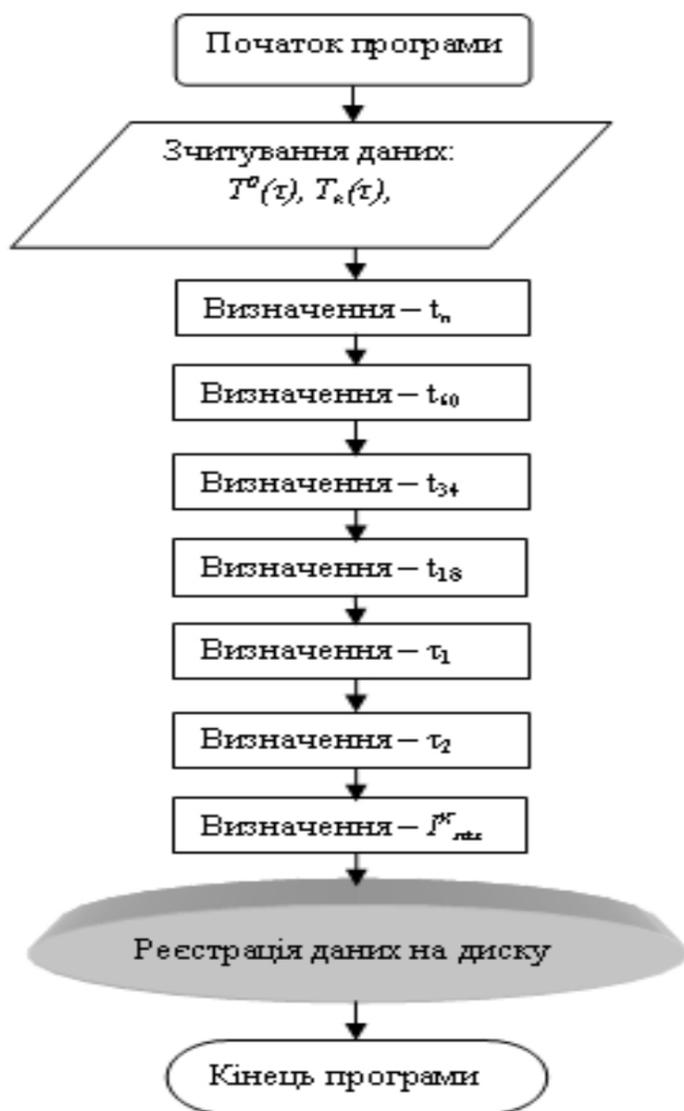


Рис. 5. Алгоритм определения морозостойчивости материалов (пакета)

Разработанный прибор оценивания защитных показателей качества (ОКЗС-КД2), дает возможность определить достижение предельной температуры на всей площади изначальной поверхности испытательного образца при непосредственном воздействии низкой температуры с учетом метаболического тепла человека ( $\Delta T = 34^\circ\text{C}$ ) в реальном времени. Предложенный метод приближен к реальным эксплуатационным условиям выполнения спасателем задач по назначению.

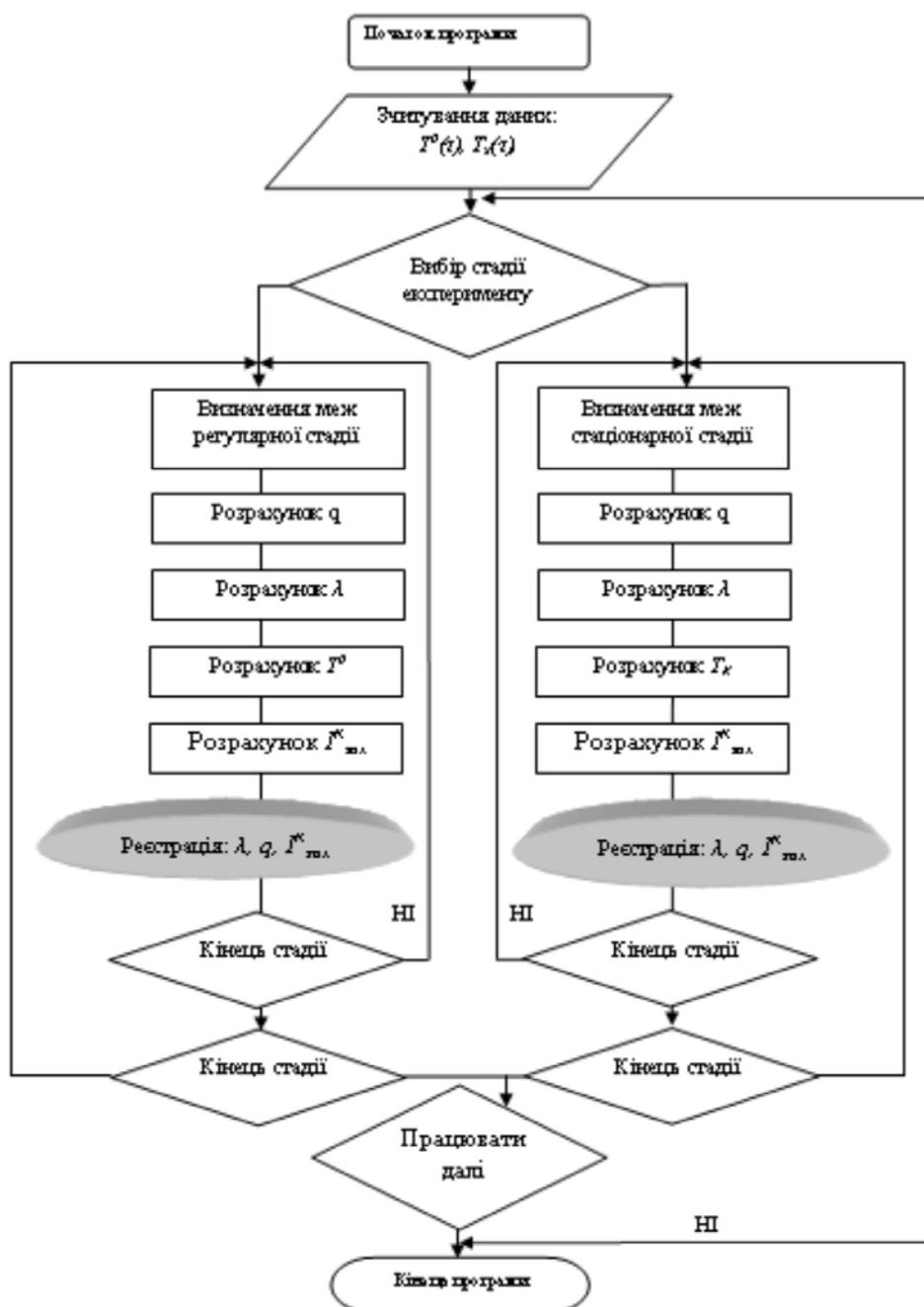


Рис. 6. Алгоритм определения критериев оценки показателей качества материалов (пакета)

**Экспериментальные исследования.** Результаты экспериментальных исследований по определению влияния процессов тепломассопереноса на пакет специальных материалов ГХЗО с комплектом боевой одежды пожарных (БОП [7]) на защите спасателя от действия низких температур.

Для исследования выбраны современные материалы, которые компонируют пакет ГХЗО и сертифицированы в Украине. Материалы отличающиеся по своему сырьевому составу, толщиной, поверхностной плотностью и другими физико-механическими свойствами. Морозоустойчивые свойства исследуемых материалов ГХЗО наведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Структура специальных материалов для пакетов, которые исследуются

Перечень контролирующих показателей текстильных материалов	Структура пакетов					
	Пакет 1			Пакет 2		
	верхний шар	утеплитель	подклад-ковый	верхний шар	утеплитель	подклад-ковый
Толщина материалов $m$ : $x_1$ $x_2$ $x_3$	0,0015	- 0,0057	- 0,00035	0,0022	- 0,0102	- 0,0008
Коэффициент теплопроводности $Bt/m\cdot град$ : $\lambda_1$ $\lambda_2$ $\lambda_3$	0,028	- 0,034 -	- - 0,023	0,039	- 0,042 -	- - 0,037
Густота теплового потока $q_p, Bt/m^2$	262,3			192,3		
Температура, °C: $T_2$ $T_3$	+ 16,4 - 37,6			+ 22,0 - 35,2		
Тепловое сопротивление, $m^2\cdot град/Bt$ : $R_1$ $R_1$	0,2364 -			- 0,3209		
Коэффициент теплопередачи, $Bt/m^2\cdot град$ : $K_1$ $K_2$	4,23 -			- 3,12		

Проведенными исследованиями установлено, что пакет №2 защищает от воздействия низких температур лучше, чем пакет №1.

Исследования показали, что при толщине утепляющего слоя  $1,14 \cdot 10^{-2}$  м (увеличили в два раза), плотность теплового потока составляет  $151,2 \text{ Вт/м}^2$ , то есть уменьшилась на  $111,11 \text{ Вт/м}^2$ . А температура повысилась от  $16,4^\circ\text{C}$  до  $23^\circ\text{C}$  на изнаночные поверхности материала.

Результаты экспериментальных исследований дают основание утверждать, что зависимость коэффициента теплопроводности специальных материалов ГХЗО средней температуры испытательных образцов составляет  $3,12 - 4,23 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ . При сравнении с расчетными результатами, относительная погрешность составляет  $\pm 4\%$ , что свидетельствует об объективности определения морозоустойчивым с помощью усовершенствованного метода и технических средств.

В результате проведенных исследований оценивания морозоустойчивости пакета материалов ГХЗО спасателя получены зависимости изменения температур поверхности испытательного образца и подкостюмного пространства. Результаты эксперимента приведены на рис. 7 и обобщены в таблице 2.

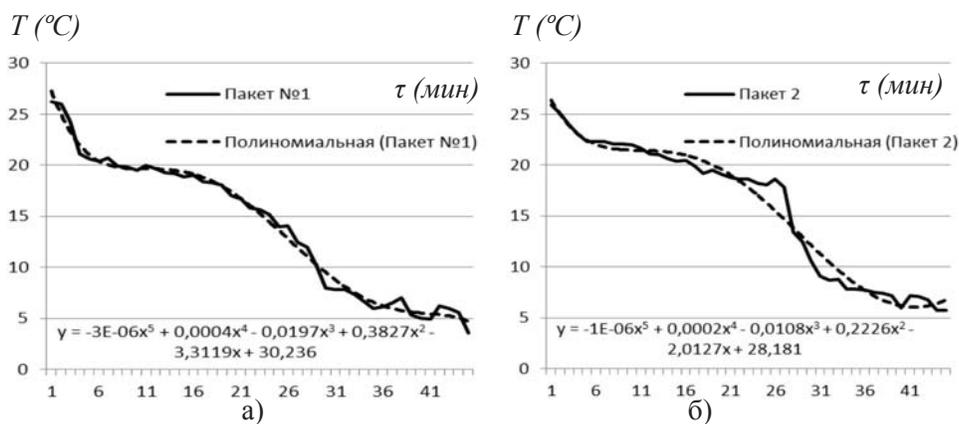


Рис. 7. График зависимости температуры обратной поверхности пакета ГХЗО от времени: а – результаты испытаний пакета №1; б – результаты испытаний пакета №2

Результаты испытаний проводились в количестве 5 испытательных образцов и обобщены с помощью ПК.

В результате оценки морозостойкости пакета материалов газохимзащитой одежды с БОП определено, что эффективной защитой при воздействии низких температур является пакет №2, и защита спасателя составляет  $26,8 \text{ мин}$ .

**Таблица 2.** Критерии морозоустойчивых характеристик пакетов материалов газохимзащитой одежды

Временные показатели качества	Кодовое обозначение СИЗ			
	Пакет №1	Пакет №2	Пакет №1, + БОП	Пакет №1, + БОП
Время достижения граничной температуры 18°C в подкостюмном пространстве при действии температуры -40°C, с	468	504	1182	1608
Индекс морозостойкости $I_{зах}^K$	5,13	6,9	2,94	2,16

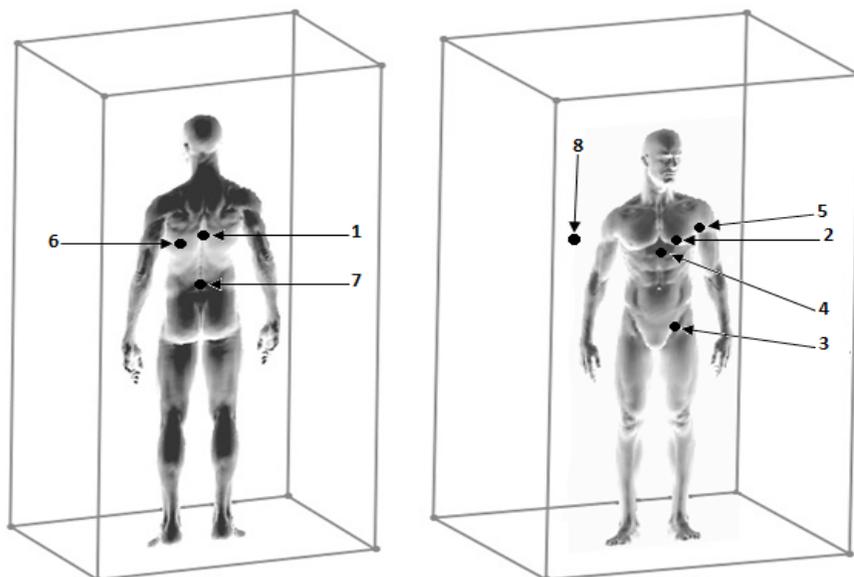
Реализация полигонных исследований комплекта защитной одежды, для научного обоснования эффективности: применения и времени защиты спасателя, при эксплуатации ГХЗО в условиях действия низких температур проводилась с помощью разработанного прибора Преобразователь измерительный интеллектуальный (ПВИ-111А) (рис. 8).



**Рис. 8.** Прибор ПИИ- 111А

Полигонные испытания проводились в помещениях промышленных холодильных установок ООО «Лимо» г. Львов.

Термоэлементы малой инерционности размещены в подкостюмном пространстве между человеком и защитной одеждой по схеме как показано на рис 9.



**Рис. 9.** Схема размещения термоэлементов:

1,7 – спина; 2,4 – грудь; 3 – пах; 5 – между пахом; 6 – левая часть спины (область сердца), 8 – внешняя температура

Испытания проводились с участием четырех волонтеров каждый из которых выполнял комплекс упражнений, которые характерны при выполнении аварийно-спасательных работ в ограниченном пространстве АХУ.

Для проведения исследований избран, сертифицирован в Украине ГХЗО: Изолированный защитный костюм №1, Изолированный защитный костюм №2 - Украина; Vautex SL-S фирмы MSA AUER - Германии из; Trelchem SUPER-Швеция. Температура в камере испытания промышленного холодильника составляла от  $-36,1^{\circ}\text{C}$  до  $-41,6^{\circ}\text{C}$ .

Обобщенные результаты эксперимента показали, что быстрее достижения предельной температуры в подкостюмном пространстве происходит в участках паха и груди (3,4 термоэлемент) в диапазоне 17,3-37,8 мин, с использованием соответствующих костюмов. По принципу предложенной методологии определения времени защиты спасателя рассчитан индекс морозоустойчивости для каждого из костюмов. Результаты расчетов приведены на рис.10, результаты исследований приведены в таблице 3.

Таким образом из графика зависимости температуры подкостюмного пространства (рис. 10) и в соответствии с расчетами индекса морозоустойчивости установлено, что костюм отечественного производства ИРК №1 не обеспечивает надежной защиты спасателя в условиях действия низких температур и составляет 17,3 мин. Зато эффективным ГХЗО определено Vautex SL-S

Германия, где время защиты спасателя составляет 37,8 мин, ИРК №2 - 28,7 мин, Trelchem SUPER - 31,5 соответственно.

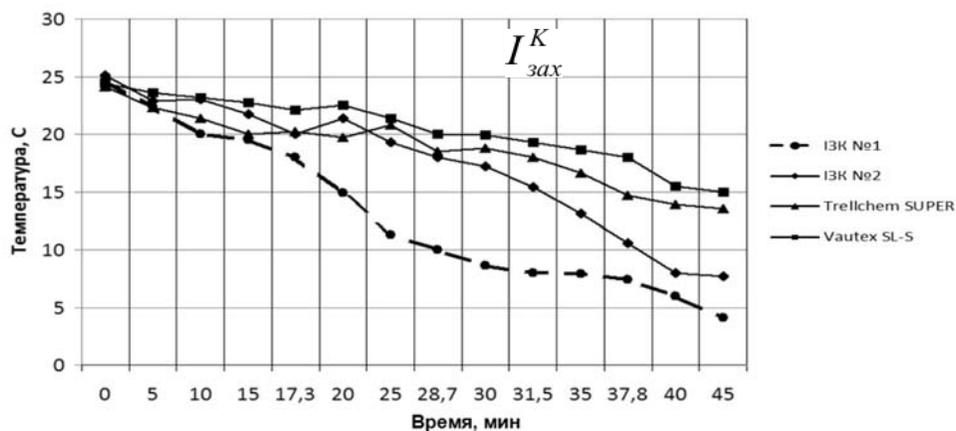


Рис. 10. График зависимости температуры подкостюмного пространства от времени переживания спасателя в условиях действия низкой температуры до  $-40^{\circ}\text{C}$

Таблица 3. Эксплуатационная эффективность использования газохимзащитной одежды в условиях низких температур

№ з/п	Название ГХЗО	Показатель	
		время защиты спасателя, мин	$I_{зах}^K$ $1,3 \leq I_{зах}^K \leq 2,9$
1.	ИРК №1	17,3	3,35
2.	ИРК №2	29,1	2,02
3.	Vautex SL-S	38,2	1,5
4.	Trelchem SUPER	31,5	1,84

**Выводы:** В статье приведены результаты решения актуальной научно-технической задачи по раскрытию особенностей определения времени защиты спасателя при эксплуатации газохимзащитной одежды в условиях действия низких температур в зависимости от температурных режимов подкостюмного пространства с помощью разработанного метода и технических средств.

1. С помощью предложенной математической модели раскрыт механизм влияния процессов тепломассопереноса и диффузии на пакет материалов газохимзащитной одежды спасателя. Теоретически обоснована зависимость времени защиты спасателя при эксплуатации костюма в условиях низких температур с учетом метаболического тепла человека ( $q_p \approx 260 \text{ Вт/м}^2$ ,  $\Delta T = 34^{\circ}\text{C}$ ), и предельной температуры комфорта микроклимата подкостюмного пространства ( $18^{\circ}\text{C}$ );

2. Экспериментально установлено, что при воздействии низкой температуры  $-40^{\circ}\text{C}$  на материал верхнего пакета газохимзащитной одежды, время защитного действия должно находиться в пределах 20-45 мин, что соответствует индексу морозоустойчивости  $1,3 \leq I_{защ}^K \leq 2,9$  соответственно;

3. Экспериментально определено время защиты спасателя в ГХЗО в зависимости от действия низкой температуры от  $-36,1^{\circ}\text{C}$  до  $-41,6^{\circ}\text{C}$ . Установлено, что при условии выполнения аварийно-спасательных работ средней нагрузки, время пребывания спасателя до момента его замены на позиции в ограниченном пространстве АХУ зависит от типа защитной одежды так: в ИРК №2 отечественного производства время защиты спасателя составляет *28,7 мин*; Vautex SL-S Германия – *37,8 мин*; Trelchem SUPER – *31,5 мин* соответственно.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [uk.wikipedia.org/wiki/Аварія\\_в\\_Горлівці\\_2013](http://uk.wikipedia.org/wiki/Аварія_в_Горлівці_2013).
- [2] Засорнов О.С.: Методичні аспекти розробки установки для дослідження термозахисних властивостей матеріалів для спецодягу // О.С.Засорнов, О.М.Сарана / Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах – 1999, - №3. – С. 161-163.
- [3] Болібрux Б.В.: Удосконалення методів оцінки показників якості спеціальних матеріалів одягу пожежників: дис. канд. техн. наук: 21.06.02 / Болібрux Борис Васильович. – 2004., – 173 с.
- [4] Засорнов О.С.: Розробка методу і оцінка теплозахисних властивостей матеріалів для спецодягу: дис. на здоб. наук. ступ. канд. техн. наук. 05.02.01 / О.С. Засорнов; Київський Нац. ун-т технологій та дизайну – К., 2004. – 262 с.
- [5] Умрюхин Е.А.: Медико-биологические аспекты интеллектуальной деятельности. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 34–47 с.
- [6] Stoll A.M. and Chianta M.A.: “Method and Rating System for Evaluation of Thermal Protection”, Aerospace Medicine, Vol 40, 1969, pp.1232–1238.
- [7] ДСТУ 2273:2006. Пожежна техніка. Терміни та визначення: чинний з 2007-04-01. – К.: УкрНДІПБ МНС України, 2006. – 44 с.
- [8] Пат. 90944 України. МПК(2009) G01N 3/18. Прилад для оцінки термозахисних властивостей матеріалів / Штайн Б.В., Болібрux Б.В. заявник та патентовласник Штайн Б.В., Болібрux Б.В. – № а 2008 11628; заявл. 29.09.08; опубл. 10.06.10, Бюл. № 11.
- [9] Пат. 53322 України. МПК(2009) G01N 33/36. Спосіб оцінки теплозахисних характеристик спеціальних матеріалів теплозахисного одягу пожежника / Штайн Б.В., Болібрux Б.В. заявник та патентовласник Львівський державний університет безпеки життєдіяльності. – № u 2010 00416; заявл. 18.01.10; опубл. 11.10.10, Бюл. № 19.