

УДК 622.867-51: 616–001–046.47

**А.О. Новиков** (д-р техн. наук, доц.)

Донецкий национальный технический университет, Донецк

**В.В. Мамаев** (д-р техн. наук, ст. науч. сотр.)

**В.О. Положий** (инж.)

**И.Ф. Марійчук** (канд. техн. наук, ст. науч. сотр.)

НИИГД «Респиратор», Донецк

### ТЕПЛООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМЕ «ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА – ОХЛАЖДАЮЩИЙ ПАКЕТ – ЧЕЛОВЕК»

Приведена математическая модель нестационарных теплообменных процессов между нагревающим микроклиматом, охлаждающим пакетом с водно-солевым раствором и пострадавшим при перегревании организма. Определены коэффициент теплопроводности и толщина оболочки пакета, а также количество и время применения пакетов для восстановления теплового состояния пострадавших до допустимых норм.

**Ключевые слова:** теплообмен, охлаждающий пакет, перегревание, пострадавший, температура, тепловое состояние.

**Постановка проблемы.** Во многих отраслях народного хозяйства Украины при производственных процессах, а также в результате ведения аварийно – спасательных работ подразделениями МЧС и ГВГСС возникают экстремальные микроклиматические условия (повышенная температура, влажность, повышенная или пониженная скорость движения воздуха, непригодная для дыхания атмосфера). Так, в настоящее время около 30 % шахт работает в условиях нагревающего микроклимата (температура воздуха превышает 26 °С и достигает 38 °С при влажности до 100 %), а протяженность выемочных полей 1000 м и более – 38 % шахт. Неблагоприятные микроклиматические условия возникают в металлургической, химической, стекольной, атомной отраслях промышленности, где температура воздуха на отдельных рабочих местах меняется от 40 °С до 200 °С в летний период, особенно при ремонте плавильных печей. Это приводит к перегреванию организма рабочих, потере здоровья, а иногда и жизни, большим затратам на лечение и выплату по профессиональному заболеванию.

Одним из наиболее эффективных мероприятий, направленных на предупреждение перегревания работников в этих условиях, является применение средств индивидуальной противотепловой защиты с использованием водолеяной системы охлаждения (жилетов, курток, костюмов), которыми оснащены подразделения ГВГСС. В случае непредвиденных обстоятельств дополнительно подразделения ГВГСС оснащены быстроразъемными костюмами экстренного охлаждения пострадавших при перегревании и механических травмах с водолеяными охлаждающими элементами (ОЭ), расположенными на внутренней их поверхности в решетчатых полиэтиленовых карманах [1].

Недостаток применения водолеяной системы охлаждения для оказания помощи пострадавшим при перегревании во многих случаях – необходимость иметь установки для замораживания ОЭ, средства для их доставки к месту ведения работ и хранения (теплоизолирующие контейнеры), костюм с транспортной сумкой, что приводит к дополнительным материальным затратам.

Альтернативой ОЭ в этом случае являются пакеты, в которых холод выделяется в результате эндотермической реакции с поглощением тепла при смешивании некоторых солей (карбамида, нитрата аммония, хлорида: кальция, аммония, калия и т.д.) с водой.

**Анализ основных исследований и публикаций.** На основании результатов исследований, проведенных в НИИГД «Респиратор» [2-6], определены состав, масса нитрата аммония, карбамида и воды, температура водно-солевого раствора в зависимости от температуры воздуха окружающей среды. Однако, как показали результаты экспериментальных исследований температура раствора резко снижается до 265...263 К (минус 8...10<sup>0</sup>С). При использовании пакета для предотвращения переохлаждения тела пострадавших, с одной стороны, и обеспечения охлаждающего эффекта, с другой стороны, температура  $T_n$  на его наружной поверхности по санитарным нормам в зависимости от температуры нагревающего микроклимата должна быть в диапазоне от 274 К (плюс 1<sup>0</sup>С) до 276 К (плюс 3<sup>0</sup>С).

**Постановка задачи.** В связи с этим актуальной задачей является выбор материала и толщины теплоизолирующей оболочки пакета (рис. 1), которые обеспечивают температуру на внешней его поверхности не ниже указанного положительного уровня  $T_0$ , а также определение количества применяемых пакетов для нормализации теплового состояния пострадавших при перегревании.

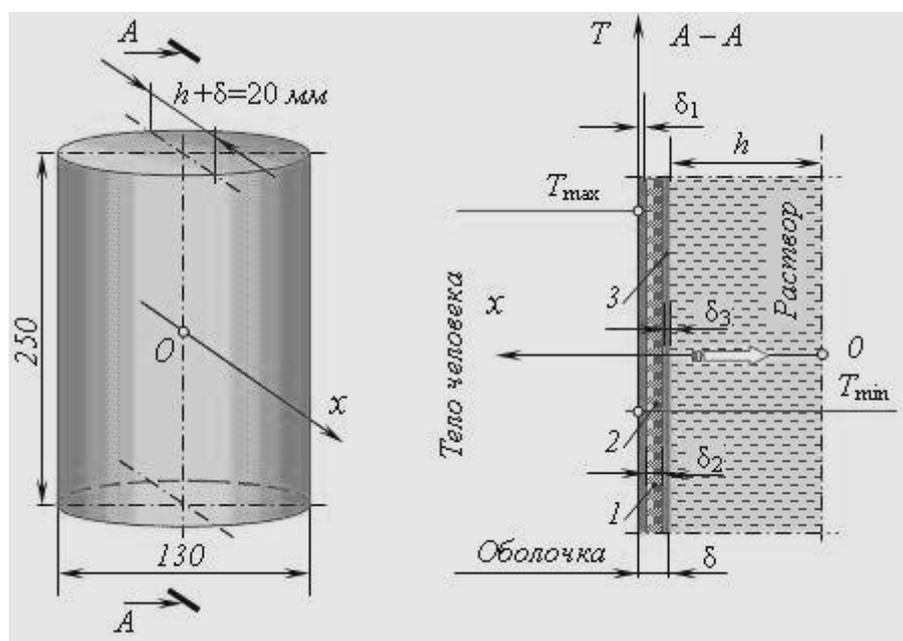


Рис. 1. Расчетная схема пакета  
(без верхней и нижней торцевых частей)  
1 – внешний слой ; 2 – теплоизолирующая оболочка  
3 – внутренний слой оболочки

Цель исследований – раскрытие закономерностей теплообменных процессов в системе «окружающая среда – охлаждающий пакет – человек», на основании результатов которой определить параметры теплоизолирующей оболочки, количество и время применения пакетов, обеспечивающих восстановление теплового состояния пострадавших до допустимых норм.

**Изложение основного материала.** В начале приведем исследования процесса теплообмена в охлаждающем пакете для выбора толщины и коэффициента теплопроводности его теплоизолирующей оболочки.

В математической формулировке задача заключается в следующем.

Решить уравнение:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad x > 0; \quad \tau > 0 \quad (1)$$

с начальным условием:

$$T(x, 0) = T_{\min}, \quad 0 \leq x \leq h \quad (2)$$

и граничным условием:

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=h} = k \cdot (T_c - T_n), \quad (3)$$

где  $T$  – температура раствора, К;  $\tau$  – время с момента применения пакета, с;  $a$  – температуропроводность раствора  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $x$  – пространственная координата, отсчитываемая от геометрической вертикальной оси объема пакета в срединном горизонтальном пересечении пакета, где ожидается наиболее низкая температура (см. рис. 1), м;  $\lambda$  – теплопроводность раствора  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $k$  – коэффициент теплопередачи окружающей среды раствора через оболочку пакета  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $T_c$  – температура окружающей среды, К;  $T_{\min}$  – минимальная температура раствора, К;  $h$  – половина поперечного размера пакета, м.

Ввиду симметричной постановки задачи, принимаем, что в геометрическом центре объема раствора градиент температуры отсутствует, то есть

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0. \quad (4)$$

Процессы теплопередачи через торцевые поверхности пакета, внешний и внутренний слои его оболочки не учитываем, поскольку торцы имеют незначительную, по сравнению с боковой поверхностью, площадь, а слои – малую толщину, которой можно пренебречь. Эти допущения позволяют получать расчетные величины температуры с определенным запасом надежности.

Коэффициент теплопередачи  $k$ , необходимый для вычисления температуры, в соответствии с теорией теплопередачи, в принятых допущениях определяется по формуле

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda_\delta}} = \frac{\alpha}{1 + \frac{\alpha \delta}{\lambda_\delta}}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи окружающей среды внешней поверхности оболочки пакета  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $\delta$  – толщина прослойки оболочки пакета, м;  $\lambda_\delta$  – коэффициент теплопроводности материала оболочки  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Из выражения (5) следует, что коэффициент теплопередачи оболочки пакета всегда меньше коэффициента теплоотдачи окружающей среды, поскольку в это выражение входит число Био ( $Bi_\tau$ ), что характеризует соотношение между интен-

сивностью теплоотдачи окружающей среды и теплопередачи теплоизолирующей оболочки:

$$\text{Bi}_T = \frac{\alpha \delta}{\lambda_T} > 0.$$

Величина температуры на поверхности пакета  $T_{\Pi}$  может быть определена на основании уравнения (3) таким образом. С учетом незначительной величины толщины оболочки, по сравнению с геометрическими размерами пакета, производную в левой части представляем таким образом:

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=h} \approx \lambda \frac{T_{\Pi} - T_h}{\delta}, \quad (6)$$

где  $T_h = T(h, \tau)$  – температура раствора на внутренней поверхности оболочки пакета, К.

После подстановки (6) в выражение (3), относительно  $T_{\Pi}$  получаем уравнение:

$$\lambda \frac{T_{\Pi} - T_h}{\delta} = k(T_c - T_{\Pi}),$$

откуда:

$$T_{\Pi} = \text{Bi}_{\delta} T_c + T_h, \quad (7)$$

где

$$\text{Bi}_{\delta} = \frac{k \delta}{\lambda} -$$

число, которое характеризует соотношение между интенсивностью теплопередачи через оболочку пакета и толщину раствора.

На основании (7) возможная предварительная оценка искомой степени теплоизоляции раствора. Поскольку в начальный момент (после активации) должно выполняться условие:  $T_{\Pi} \geq T_0$ , то из (7) следует

$$T_0 \leq \text{Bi}_{\delta} T_c + T_{\min}. \quad (8)$$

Следовательно, для соблюдения условия (8) необходимо, чтобы

$$\text{Bi}_{\delta} \geq \frac{T_0 - T_{\min}}{T_c}.$$

Например, при  $T_0 = 3^{\circ}\text{C} = 276\text{ K}$ ;  $T_{\min} = -8^{\circ}\text{C} = 265\text{ K}$  и  $T_c = 31^{\circ}\text{C} = 304\text{ K}$ ,  $\text{Bi}_{\delta} = 3,95 \cdot 10^{-2}$ .

В соответствии с (5) это равносильно

$$\frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda_T}} \cdot \frac{\delta}{\lambda} \geq 3,95 \cdot 10^{-2} \quad \text{или} \quad \lambda_T \geq \frac{\delta \alpha \beta \lambda}{\delta \alpha - \beta \lambda}, \quad (9)$$

где  $\beta = 3,95 \cdot 10^2$ .

Таким образом, необходимая степень теплоизоляции пакета зависит от коэффициента теплоотдачи окружающей среды его поверхности  $\alpha$ .

Учитывая, что теплопродуктивность организма человека при средней физической нагрузке  $q_0$  составляет приблизительно  $225 \text{ Вт/м}^2$ , в соответствии с законом теплообмена Ньютона [7]:

$$q_0 \approx \alpha \cdot (T_c - T_{\min}).$$

Тогда приблизительно значение коэффициента теплообмена  $\alpha$  между телом человека и поверхностью пакета равно  $5,921 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$

На основании (9) для этого коэффициента теплоотдачи получено, что при толщине оболочки  $\delta = (0,45 \dots 0,50) 10^{-2} \text{ м}$  ее теплопроводность должна быть соответственно не ниже  $\lambda_T = (0,21 \dots 0,12) \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ . Этим требованиям удовлетворяет пенофенол толщиной  $0,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  с коэффициентом теплопроводности  $0,15 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ .

Исследования по определению количества применения пакетов и времени восстановления теплового состояния пострадавших при перегревании организма проводили в тепловой камере НИИГД «Респиратор» с температурой воздуха плюс  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , влажностью  $96 \%$  и скоростью движения  $1 \text{ м/с}$  при участии испытателей-горноспасателей, которые имеют опыт работы в условиях нагревающего микроклимата, прошли медицинский осмотр, получили разрешение на проведение исследований и изучили руководство по эксплуатации пакетов. Исследования проводили по методике, изложенной в работе [8], которая состоит в следующем.

У испытателей регистрировали температуру ядра тела ректально на глубине около  $0,12 \text{ м}$  на электронном цифровом медицинском термометре типа ТЕМЦ-1, кожные температуры – 12-ти канальной электронной термостанции с погрешностью  $0,1^\circ\text{C}$ , а с помощью системы преобразования электрокардиосигналов в звуковые определяли частоту сердечных сокращений (ЧСС). В качестве физической нагрузки испытуемые выполняли работу на вертикальном эргометре, ступеньке (степ-тест), по переноске кирпичей и укладыванию их в штабель с режимом: работа –  $10 \text{ мин}$ , отдых –  $5 \text{ мин}$ , что соответствует тяжелой работе, до достижения предельных значений ЧСС –  $170 \text{ мин}$  или ректальной температуры  $38,6^\circ\text{C}$ .

После достижения предельных значений ЧСС или ректальной температуры испытуемые, не выходя из камеры, самостоятельно приводили в действия 6 пакетов и прикладывали к наиболее чувствительным к теплосъему участкам тела: по два пакета к стопам ног, в области межгрудинной поверхности и сердца, с помощью фиксирующего устройства – кистей рук и к шее в области сонных артерий.

Результаты теоретических и данные экспериментальных исследований приведены на рис. 2, откуда следует, что наибольшее их совпадение получено при  $Bi = 1,44 \cdot 10^{-2}$  (кривая 1).

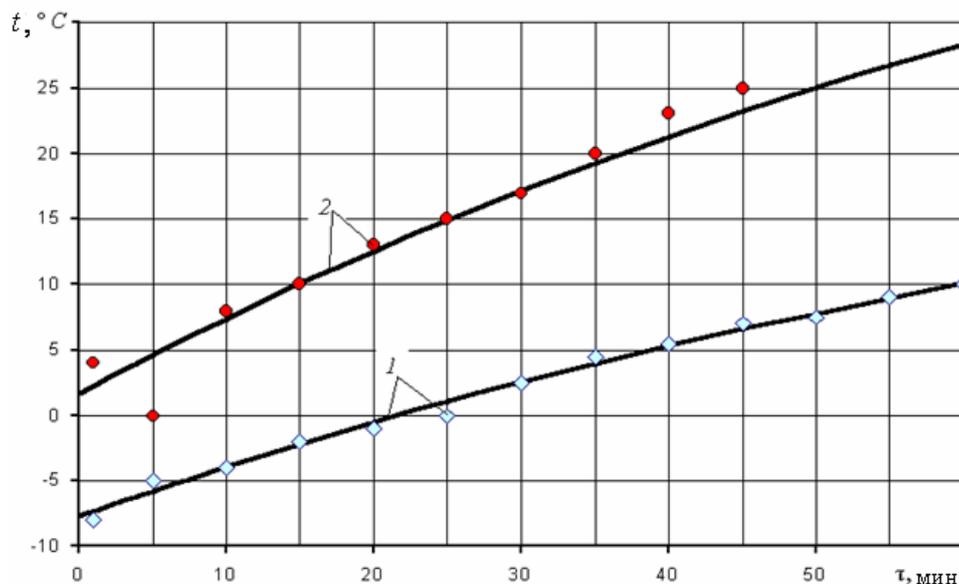


Рис. 2. Динамика температуры раствора и поверхности пакета  
 1 – температура раствора; 2 – температура поверхности пакета  
 — - - результаты теоретических исследований;  
 ◆ ● - данные экспериментов

Зависимость ЧСС и ректальной температуры в процессе эрготермической нагрузки и охлаждения испытуемых пакетами приведен на рис. 3 и 4, откуда следует (см. рис. 4), что через 3 минуты ректальная температура практически не изменяется и принимает допустимое значение ( $38^{\circ}\text{C}$ ) не более, чем чрез 22 мин, на 27 мин –  $37,6^{\circ}\text{C}$ , ЧСС через одну мин – допустимое значение ( $140 \text{ мин}^{-1}$ ), а на 30-й мин –  $70 \text{ мин}^{-1}$ .

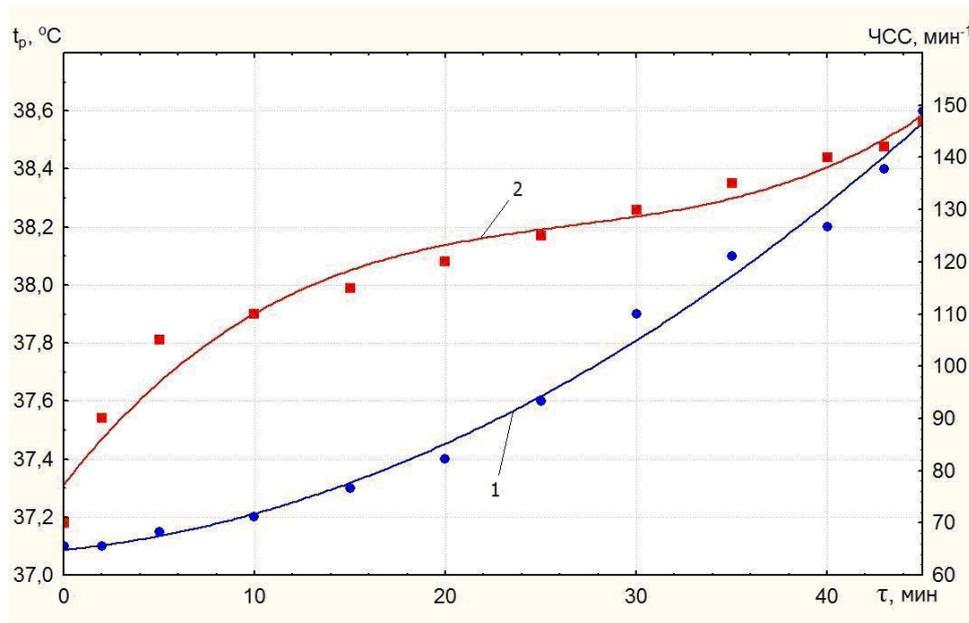


Рис. 3. Зависимость ректальной температуры (1) и ЧСС (2) испытуемых в процессе эрготермической нагрузки: ●, ■ - данные экспериментов

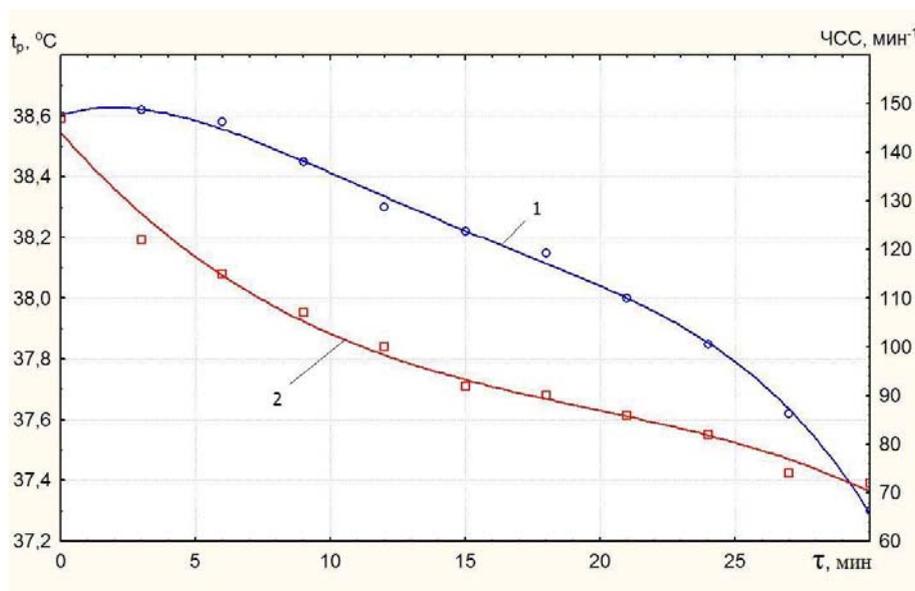


Рис. 4. Зависимость ректальной температуры (1) и ЧСС (2) испытуемых в процессе экстренного охлаждения пакетами ПХО:  $\square$ ,  $\circ$  - данные экспериментов

Динамика ректальной температуры  $t_p^H$ , °C и ЧСС<sup>H</sup>, мин<sup>-1</sup> испытуемых в процессе эрготермической нагрузки описывается аппроксимирующими уравнениями

$$t_p^H = 0,576 \cdot 10^{-3} \tau^2 + 0,6831 \cdot 10^{-2} \tau + 37,0865 \quad (R = 0,9823),$$

$$\text{ЧСС}^H = 0,1984 \cdot 10^{-2} \tau^3 - 0,15647 \tau^2 + 4,63465 \tau + 77,4371 \quad (R = 0,9871),$$

а в процессе экстренного охлаждения, соответственно с индексом «0»

$$t_p^0 = -0,85 \cdot 10^{-5} \tau^4 + 0,478 \cdot 10^{-3} \tau^3 - 0,878 \cdot 10^{-2} \tau^2 + 0,028948 \tau + 38,6 \\ (R = 0,9972),$$

$$\text{ЧСС}^0 = -0,434 \cdot 10^{-2} \tau^3 + 2,7713 \tau^2 - 6,7527 \tau + 145,797 \quad (R = 0,9988),$$

где  $\tau$  - время, мин.

Несмотря на то, что охлаждение испытуемых пакетами проводили в условиях нагревающего микроклимата тепловой камеры, а в костюме КЭОП – при изоляции от внешней среды, время достижения допустимого значения ректальной температуры в первом случае в 1,4 раза меньше, чем во втором.

Пакеты химические охлаждающие (ПХО) можно эффективно использовать для снижения болевого синдрома при механических травмах пострадавших.

Таким образом, использование пакетов ПХО позволяет оказывать доврачебную помощь пострадавшим при перегревании организма и механических травмах непосредственно в условиях нагревающего микроклимата, а следовательно, сохранить их здоровье и жизнь, снизить затраты на лечение и выплату по профессиональному заболеванию.

## Выводы

Разработана математическая модель нестационарных теплообменных процессов в системе «окружающая среда – охлаждающий пакет – человек», на основании которой определены параметры оболочки пакета, предотвращающие переохлаждение тела пострадавших при перегревании. Установлено количество примененных пакетов и время, необходимые для восстановления теплового состояния пострадавших до допустимых норм в результате экстренного охлаждения наиболее чувствительных к теплосъему участков тела.

## Список литературы

1. Онасенко А.А. Комплект средств экстренного охлаждения пострадавших при перегревании / А.А. Онасенко, В.А. Вольский, И.Ф. Марийчук // Уголь Украины. – 2005. – №3. – С. 32-34.
2. Положий В.О. Метод расчета температуры водно-солевого раствора в охлаждающем пакете / В.О. Положий // Уголь Украины. – 2008. – № 4. – С. 31-33.
3. Положий В.О. Обоснование состава и массы химических ингредиентов охлаждающего пакета / В.О. Положий, И.Ф. Марийчук, Н.И. Шилинговский // Уголь Украины. – 2010. – № 6. – С. 28-31.
4. Положий В.О. Теплообменные процессы в охлаждающем пакете с химическими ингредиентами / В.О. Положий, И.Ф. Марийчук, Т.А. Лазаренко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. НИИГД «Респиратор». – 2009. – Вып. 46. – С. 134-141.
5. Теплообменные процессы в пакете для оказания помощи пострадавшим при перегревании и механических травмах / В.О. Положий, И.Ф. Марийчук, Ю.А. Петренко и др. // Вісті Донецького гірничого інституту: Зб. наук. праць ДонНТУ. – 2010. – № 1. – С. 95-100.
6. Положий В.О. Эндотермические процессы в охлаждающем пакете с водно-солевым раствором / В.О. Положий, И.Ф. Марийчук // Пути повышения безопасности горных работ в угольной отрасли: тезисы докладов II Междунар. науч.-практ. конф., 2007. – Макеевка: МакНИИ, 2007. – С. 69-70.
7. Басаков А.П. Теплотехника / А.П. Басаков, Б.В. Берг, О.К. Витт. – М.: Энергоиздат, 1982. – 264 с.
8. Онасенко А.А. Разработка средств индивидуальной противогазотепловой защиты горнорабочих: дис. ... кандидата тех. наук: 05.26.01 / Онасенко Александр Александрович. – Макеевка, 2010. – 186 с.

*Надійшла до редколегії 28.03.2012*

О.О. Новіков, В.В. Мамаєв, В.О. Положий, І.П. Марійчук

Донецький національний технічний університет, Донецьк

НДІГД «Респиратор», Донецьк

### ТЕПЛООБМІННІ ПРОЦЕСИ В СИСТЕМІ «ДОВКІЛЛЯ – ПАКЕТ, ЩО ОХОЛОДЖУЄ – ЛЮДИНА»

Приведена математична модель нестационарних теплообмінних процесів між нагріваючим мікрокліматом, охолоджуючим пакетом з водно-солевою розчиною і постраждалим від перегрівання організму. Визначені коефіцієнт теплопровідності і товщина оболонки пакету, а також кількість і час вживання пакетів для відновлення теплового стану постраждалих до припустимих норм.

Ключові слова: теплообмін, охолоджуючий пакет, перегрівання, постраждалих, температура, тепловий стан.

A. Novikov, V. Mamayev, V. Poloziy, I. Mariyчук

Donetsk National Technical University, Donetsk

RIRP «Respirator», Donetsk

### HEATEXCHANGE PROCESSES IN SYSTEM «ENVIRONMENT – THE COOLING PACKAGE – THE PERSON»

The mathematical model of non-stationary heatexchange processes is given. The factor of heat conductivity and thickness of a cover of a package, and also quantity and time of application of packages for restoration of a thermal condition of victims to admissible norms are defined.

Keywords: the heat exchange cooling a package, overheating, the victim, temperature, a thermal condition.