

ПРОЦЕСИ ТЕПЛООБМІНУ У ХІМІЧНОМУ ОХОЛОДЖУЮЧОМУ ПАКЕТІ

Приведена математична модель процесу теплообміну в хімічному охолоджуючому пакеті, на базі досліджень якого вибрані товщина і теплопровідність теплоізолюючої оболонки, що запобігає переохолодженню тіла постраждалого під час перегрівання та механічних травм

Згідно з Правилами безпеки, у вугільних шахтах допустима температура повітря в гірничих виробках, де постійно (протягом зміни) працюють люди, залежно від швидкості його руху і вологості повинна знаходитися в межах від 295 до 299 К (від + 22 до + 26 °С). Аналіз статистичних даних показує, що зараз в Україні 30 % шахт працюють в екстремальних мікрокліматичних умовах (температура повітря в виробках знаходиться в межах від 300 К (27 °С) до 310 К (40 °С), вологість до 100 %), а протяжність виїмкових полів 1000 м і більше – 40 % шахт, що нерідко приводить до перегрівання організму гірників, втрати їх здоров'я, іноді і життя, великих матеріальних витрат на лікування та виплату регресів.

Для надання допомоги гірничорятувальникам під час перегрівання та при механічних травмах (зняття больового синдрому) підрозділи ДВГРС оснащені комплектом засобів для екстреного охолодження постраждалих, до складу якого входять: гіпотермічний шолом з пелеріною, швидкороз'ємний комбінезон, теплоізолюючий контейнер з вододіяними охолоджуючими елементами (ОЕ-2) [1, 2].

Недоліком використання ОЕ-2 є необхідність застосування на шахтах морозильних установок, щоденна доставка заморожених ОЕ-2 в теплоізолюючих контейнерах в виробки до місця проведення робіт, що потребують значних матеріальних витрат.

НДІГС «Респіратор» розробив пакети, в яких холод виділяється в результаті ендотермічної реакції з поглинанням тепла під час змішування деяких солей (карбаміду, нітрату амонію, хлориду: кальцію, амонію, калію і так далі) з водою. Охолоджуючі пакети з хімічними інгредієнтами можна розмістити в будь-яких умовах, для них не вимагається спеціального оснащення для зберігання і транспортування, вони постійно готові до застосування, зберігають охолоджувальні властивості протягом тривалого часу зберігання.

Але, після активації (приведення в дію пакета) температура розчину T_{\min} миттєво знижується в межах від 265 К (- 8 °С) до 263 К (- 10 °С). При використанні пакета для попередження переохолодження тіла постраждалого, з однієї сторони, і забезпечення охолоджуючого ефекту, з другої сторони, температура T_0 на його зовнішній поверхні повинна бути в межах від 274 К (+ 1 °С) до 276 К (+ 4 °С).

Тому актуальним є завдання вибору матеріалу і товщини теплоізолюючого прошарку оболонки пакета (рис. 1), яка забезпечить температуру на його поверхні не нижчу від вказаного позитивного рівня.

Мета роботи – провести дослідження процесів теплообміну в системі «водно-сольовий розчин – теплоізолююча оболонка – навколишнє середовище» і визначити на базі їх результатів теплопровідність оболонки пакета (ступінь теплоізоляції розчину), при якій температура поверхні пакета не буде нижчою ніж 274 К (плюс 1 °С).

У математичному формулюванні завдання полягає в наступному.

Вирішити рівняння:

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

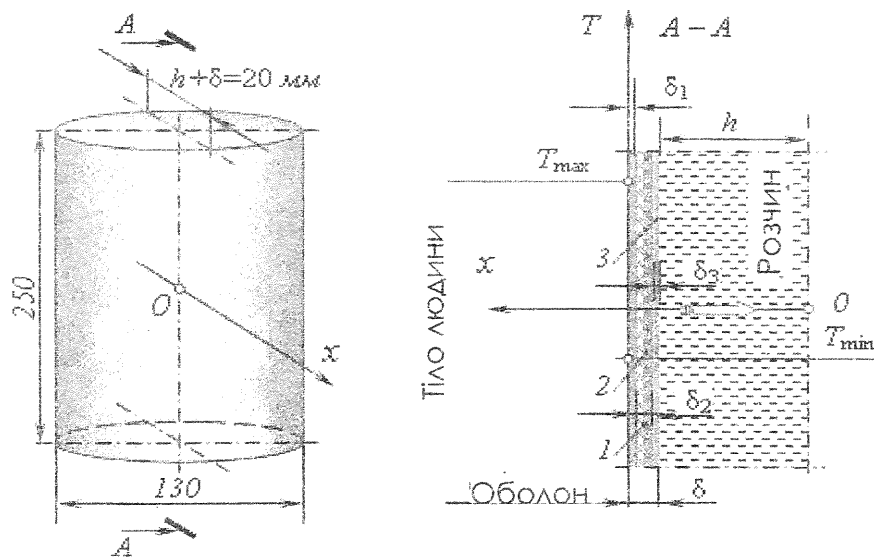


Рис. 1. Розрахункова схема пакета (без верхньої і нижньої торцевих частин, що звужуються)
 1 – зовнішній шар; 2 – теплоізолюючий прошарок; 3 – внутрішній шар оболонки;

з початковою умовою:

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

і граничною умовою:

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

де T – температура розчину, К; τ – час з моменту застосування пакета, с; a – температуропровідність розчину $\text{м}^2/\text{с}$; x – просторова координата, що відлічується від геометричної вертикальної осі об'єму пакета в серединному горизонтальному перетині пакета, де очікується найбільш низька температура (див. рис.1), м; λ – теплопровідність розчину, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; k – коефіцієнт теплопередачі навколишнього середовища розчину через оболонку пакету $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; T_c – температура навколишнього середовища, К; T_n – температура зовнішньої поверхні пакету, К; h – половина поперечного розміру пакету, м.

Зважаючи на симетричну постановку завдання, приймається, що в геометричному центрі об'єму розчину градієнт температури відсутній, тобто

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

Процеси теплопередачі через торцеві поверхні пакета, зовнішній і внутрішній шари його оболонки не враховуються, оскільки торці мають незначну, в порівнянні з бічною поверхнею, площу, а шари – малу товщину, якою можна нехтувати. Ці допущення дозволять отримувати розрахункові величини температури з певним запасом надійності.

Коефіцієнт теплопередачі k , необхідний для обчислення температури T_n , відповідно до теорії теплопередачі [3-5], в прийнятих допущеннях визначається за формулою

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

де α – коефіцієнт тепловіддачі навколишнього середовища зовнішній поверхні оболонки пакету $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; δ – товщина прошарку оболонки пакету, м; λ_τ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу прошарку $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

З виразу (5) виходить, що коефіцієнт теплопередачі оболонки пакета завжди менший від коефіцієнта тепловіддачі навколишнього середовища, оскільки в цей вираз входить число Біо (Bi_τ), що характеризує співвідношення між інтенсивностями тепловіддачі навколишнього середовища і теплопередачі теплоізолюючого прошарку

$$\text{Bi}_\tau = \frac{\alpha \cdot \delta}{\lambda_\tau} > 0. \quad (6)$$

Величина температури на поверхні пакету T_Π може бути визначена на підставі рівняння (3) таким чином. З урахуванням незначної величини товщини оболонки $\delta \sim 10^{-3}$ м, в порівнянні з геометричними розмірами пакету, похідна в лівій частині представляється так:

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=h} \approx \lambda \frac{T_\Pi - T_h}{\delta}, \quad (7)$$

де $T_h = T(h, \tau)$ – температура розчину біля внутрішньої поверхні оболонки пакета, К.

Після підстановки (7) у вираз (3), відносно T_Π отримуємо рівняння

$$\lambda \frac{T_\Pi - T_h}{\delta} = k \cdot (T_c - T_\Pi), \quad (8)$$

звідки

$$T_\Pi = \text{Bi}_\delta T_c + T_h, \quad (9)$$

де

$$\text{Bi}_\delta = \frac{k\delta}{\lambda} \quad (10)$$

число, що характеризує співвідношення між інтенсивностями теплопередачі через оболонку пакета і товщу розчину.

На підставі (9) можлива попередня оцінка шуканого ступеня теплоізоляції розчину. Оскільки в початковий момент (після активації) повинна виконуватися умова: $T_\Pi \geq T_0$, то з (9) слідує

$$T_0 \leq \text{Bi}_\delta T_c + T_{\min}. \quad (11)$$

Отже, для дотримання умови (11) необхідно

$$\text{Bi}_\delta \geq \frac{T_0 - T_{\min}}{T_c}. \quad (12)$$

Наприклад, при $T_0 = 4^\circ\text{C} = 277\text{ К}$; $T_{\min} = -8^\circ\text{C} = 265\text{ К}$ і $T_c = 31^\circ\text{C} = 304\text{ К}$ $\text{Bi} = 3,95 \cdot 10^{-2}$

Відповідно до (5), це рівносильне

$$\frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda_\tau}} \cdot \frac{\delta}{\lambda} \geq 3,95 \cdot 10^{-2} \quad \text{або} \quad \lambda_\tau \geq \frac{\delta\alpha\beta\lambda}{\delta\alpha - \beta\lambda} \quad (13)$$

де $\beta = 3,95 \cdot 10^{-2}$.

Таким чином, необхідний ступінь теплоізоляції пакета залежить від коефіцієнта тепловіддачі навколишнього середовища його поверхні α .

Враховуючи, що теплопродуктивність організму людини при середньому фізичному навантаженні q_0 приблизно дорівнює 225 Вт/м^2 [5], відповідно до закону теплообміну Ньютона [3-5]

$$q_0 \approx \alpha(T_c - T_{\text{min}}), \quad (14)$$

і можна приблизно оцінити значення коефіцієнта теплообміну між тілом людини та поверхнею пакета, який дорівнює $5,921 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

На підставі (13), для цього коефіцієнта тепловіддачі, отримано, що при товщині прошарку $\delta = (4,5 \dots 5,0) \cdot 10^{-2} \text{ м}$ теплопровідність прошарку повинна бути відповідно не нижче $\lambda_r = 0,21 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)} \dots 0,12 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

Проте ці орієнтовні значення λ_r набуті безпосередньо для моменту активації пакета та зіткненні з тілом людини. Фактично пакет перебуває якийсь час в теплому повітряному рухомому середовищі і коефіцієнт тепловіддачі α значно вищий. Тому, для точнішого визначення необхідного ступеня теплоізоляції пакета і терміну його придатності необхідно знати динаміку температури розчину в період використання пакета. Ця динаміка представляється рішенням задачі (1) -(4), яка в безрозмірних змінних:

$$\xi = \frac{x}{h}; \quad \theta = \frac{T - T_c}{T_{\text{min}} - T_c}; \quad \text{Fo} = \frac{a\tau}{h^2} \quad (15)$$

(Fo – число Фур'є), формулюється у вигляді симетричного завдання охолодження розчину (рішення задачі нагрівання виходить в результаті вирахування θ з одиниці [3, 4]):

$$\frac{\partial \theta}{\partial (a\text{Fo})} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2}, \quad 0 \leq \xi < 1; \quad \text{Fo} > 0; \quad (16)$$

$$\theta(\xi, 0) = \theta_0 = 1; \quad (17)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right|_{\xi=0} = 0; \quad (18)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right|_{\xi=1} + \text{Bi} \theta_n = 0, \quad (19)$$

де

$$\text{Bi} = \frac{kh}{\lambda} \quad (20)$$

число Біо; $\theta_n = \theta|_{\xi=1}$ – безрозмірна величина температури на поверхні пакета, з урахуванням того, що в прийнятих допущеннях при незначній товщині оболонки $T_n \approx T(h, \tau)$.

Рішення задачі (16-19) знаходиться за допомогою методу розділення змінних Фур'є [3, 4] і має вигляд:

$$\theta(\xi, \text{Fo}) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-\mu_n^2 \text{Fo}} \cos(\mu_n \xi), \quad (21)$$

$$C_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n}; \quad (22)$$

$\mu_n, n=1 \dots \infty$ – константи, які визначаються з початкових умов, після їх розкладання в ряд Фур'є, і задовольняють рівнянню

$$\operatorname{ctg} \mu_n = \frac{\mu_n}{\operatorname{Bi}}. \quad (23)$$

Оскільки

$$\sin \mu_n = (-1)^{n-1} \sqrt{\frac{1}{1 + \operatorname{ctg}^2 \mu_n}} = (-1)^{n-1} \frac{\operatorname{Bi}}{\sqrt{\operatorname{Bi}^2 + \mu_n^2}}; \quad (24)$$

$$\cos \mu_n = (-1)^{n-1} \sqrt{\frac{\operatorname{ctg}^2 \mu_n}{1 + \operatorname{ctg}^2 \mu_n}} = (-1)^{n-1} \frac{\mu_n}{\sqrt{\operatorname{Bi}^2 + \mu_n^2}}, \quad (25)$$

то (22) перетвориться до наступного:

$$\theta(\xi, \operatorname{Fo}) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[(-1)^{n-1} \frac{2 \cdot \operatorname{Bi} \cdot \sqrt{\operatorname{Bi}^2 + \mu_n^2}}{\mu_n \cdot (\operatorname{Bi}^2 + \mu_n^2 + \operatorname{Bi})} \cos(\mu_n \xi) e^{-\mu_n^2 \operatorname{Fo}} \right], \quad (26)$$

Величина Bi в даних дослідженнях оцінюється за отриманими вище значеннями $\alpha = 5,921 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ і $\lambda_t = 0,21 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, при $h = 0,01 \text{ м}$; $\delta = 0,0045 \text{ м}$; $\lambda = 0,60 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Спочатку за формулою (5) обчислюється коефіцієнт теплопередачі, який дорівнює $\kappa = 5,254 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а потім з (20) – $\operatorname{Bi} = 0,0875$.

Якщо величина критерію Біо незначна ($\operatorname{Bi} \rightarrow 0$ – практично абсолютна теплоізоляція), то і $\alpha \rightarrow 0$, тобто процес тепловіддачі навколишнього середовища до пакета відбувається в умовах $\theta|_{\xi=1} \approx \theta_0$. При цьому $\mu_n \approx (n-1) \cdot \pi$. Оскільки при нескінченно малому аргументі $t: \sin t|_{t \rightarrow 0} = t$, то відповідно до (22), коефіцієнт C_1 для першого члена ряду рівний:

$$C_1 = \frac{2 \sin \mu_1}{\mu_1 + \cos \mu_1 \sin \mu_1} \Big|_{\mu_1 \rightarrow 0} = \frac{2 \frac{\sin \mu_1}{\mu_1}}{1 + \cos \mu_1 \frac{\sin \mu_1}{\mu_1}} \Big|_{\mu_1 \rightarrow 0} = \frac{2 \mu_1}{1 + \cos \mu_1 \mu_1} \Big|_{\mu_1 \rightarrow 0} = 1, \quad (27)$$

а останні ($n > 1$)

$$C_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \cos \mu_n \sin \mu_n} \Big|_{\mu_n \rightarrow (n-1)\pi} = \frac{2 \sin[(n-1)\pi]}{(n-1)\pi + \cos[(n-1)\pi] \cdot \sin[(n-1)\pi]} = 0. \quad (28)$$

Оскільки $\operatorname{tg} t|_{t \rightarrow 0} = t$, то з (23) витікає, що при малому Bi :

$$\mu_n^2 = \operatorname{Bi}. \quad (29)$$

Таким чином, коли $\operatorname{Bi}_i \rightarrow 0$, то на підставі (27-29) вираз для температури (21) перетвориться до вигляду:

$$\theta = \cos(\sqrt{\operatorname{Bi}} \xi) e^{-\operatorname{Bi} \operatorname{Fo}},$$

а оскільки це рішення задачі про охолодження розчину, то надалі приймається рішення:

$$\theta_t = 1 - \cos(\sqrt{\operatorname{Bi}} \xi) e^{-\operatorname{Bi} \operatorname{Fo}}. \quad (30)$$

Результати розрахунку відносної температури розчину залежно від числа Fo при різних Bi представлені на рис. 2.

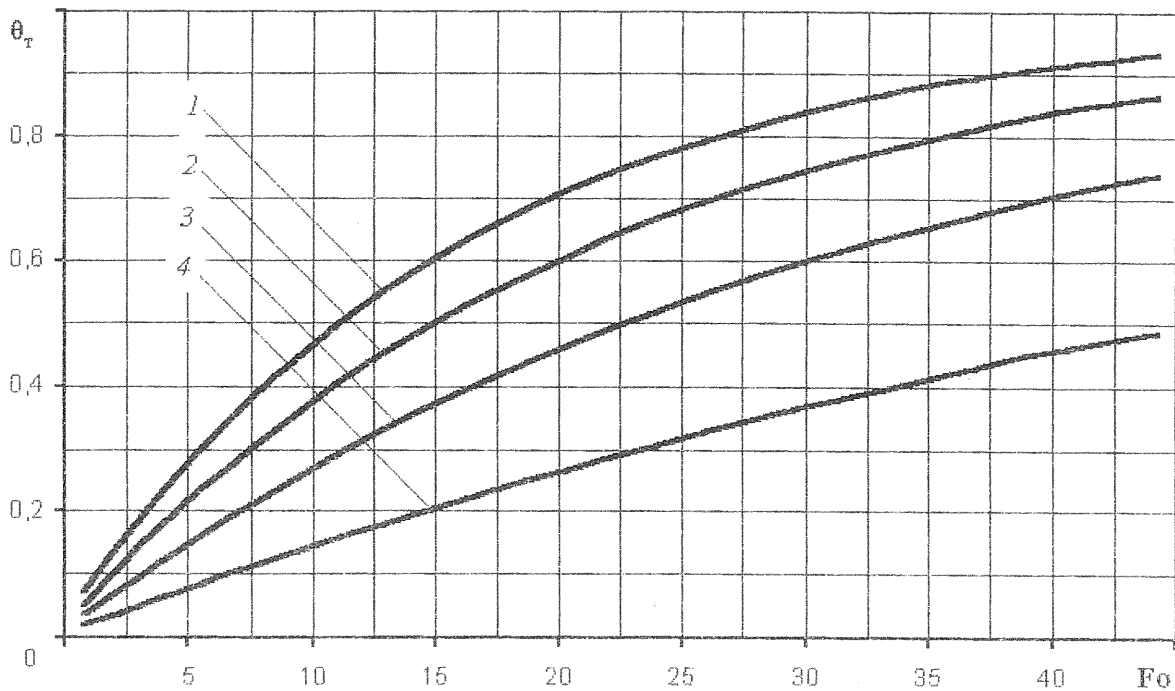


Рис. 2 – Результати моделювання динаміки температури розчину
 1 – $Bi = 0,60$; 2 – $Bi = 0,45$; 3 – $Bi = 0,30$; 4 – $Bi = 0,15$

В результаті проведених досліджень сформульована математична задача визначення динаміки температури на поверхні пакета; отримані аналітичні вирази залежності температури пакета від початкової температури і температуропровідності розчину, теплопровідності оболонки пакета і температури навколишнього середовища; на підставі математичної моделі доведено, що для дотримання норм щодо температури поверхні пакета теплопровідність його оболонки повинна бути в межах $0,12...0,25 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, а товщина – $\delta = (2...4)\cdot 10^{-3} \text{ м}$.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Карпекін В.В. Определение параметров водоледяного аккумулятора холода для противотепловой одежды горноспасателей / В.В.Карпекін, И.Ф.Марийчук, Ю.В.Клименко // Наук. вісн. НГА України. – Дніпропетровськ, 2005. – №5. – С. 82-86.
2. 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.
3. Баскаков А.П. Теплотехника / А.П.Баскаков, Б.В.Берг, О.К.Витт. – М.: Энергоиздат, 1982. – 264 с.
4. Юдаев Б.Н. Теплопередача / Б.Н.Юдаев. – М.: Высшая школа, 1973. – 360 с.
5. Дмитриев А.П. Термодинамические процессы в горных выработках: Учебник для вузов / А.П.Дмитриев, С.А.Гончаров. – М.: Недра, 1983. – 312 с.