

Таблица 1. Отдельные параметры ручных диспергирующих пожарных стволов, работающих на принципе гидравлических пульсаций

Диаметр отверстия форсунки, мм	Давление подачи, кг/см <sup>2</sup>	Расход воды, л/с	Дальность бойности, м	Потребляемая мощность, л.с.
4	10	0,57	14-15	1,08
	15	0,72		1,37
5	10	0,713	17-19	1,35
	15	0,852		1,62
6	10	1,0	18	1,9
	15	1,41		2,68
7	9,5	1,52	20-21	2,9
8	5,5	1,53	22-23	2,92

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов Ю.А., Росоха В.Е., Шаповалова Е.А. Моделирование процессов в пожарных стволах. – Харьков: Фолио, 2001. – 195 с.
2. Грицына И.Н. Эффективность тушения пожаров тонкораспыленной водой. Сб. науч. тр. Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности / под ред. Ю.А. Абрамова. – Харьков: ХВУ, 1997. – С. 22-29.
3. Грицына И.Н. Эффективность тушения пожаров тонкораспыленной водой. / Проблемы пожарной безопасности. Сб. науч. тр. – Харьков: ХИПБ, 1997. – С. 29-35.
4. ГОСТ 9923-67 Стволы пожарные ручные. – М., 1967.
5. Казаков М.В., Петров И.И., Реутт В.Ч. Средства и способы тушения пламени горючих жидкостей. – М.: Строиздат, 1977. – 113 с.
6. Пажжи Д.Г., Галустанов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. – М.: Химия, 1984. – 115 с.
7. Ю. Чишевский. “Тайфун” набирает силы. / Пожежна безпека. – 1997. № 7. С. 16-17.
8. В. Кравчуновский, А. Нода, В. Донец, А. Кремена Обеспечение пожарной безопасности высотных сооружений. / Бюлетень пожежної безпеки. – 2001. – № 3 (8). С. 14-15.

УДК 622.677.862.516

О.А.Гаврилко

#### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ПЕРЕНОСУ ТЕПЛА В ЗАХИСНОМУ ОДЯЗІ ПОЖЕЖНИХ І ГІРНИЧИХ РЯТУВАЛЬНИКІВ З ВОДНОЛЬОДЯНОЮ СИСТЕМОЮ ОХОЛОДЖЕННЯ

На основі розрахункової системи “Навколишнє середовище – захисний одяг – людина” і теорії тепломасопереносу в багатошарових системах отримано аналітичні залежності температури всередині захисного одягу і часу його захисної дії від теплофізичних параметрів шарів, кількості шарів і повітряних прошарків з врахуванням нестационарних процесів при фазовому переході хладагента водно-льодяною системою охолодження.

В наш час при розробленні засобів індивідуального проти теплового захисту пожежних ; гірничих рятувальників використовується метод стаціонарного теплового балансу [1]. Метод розроблений із передбаченням, що поглинання теплоти (від навколишнього середовища і людини) хладагентом костюма проходить миттєво. В реальних умовах у системі “Навколишнє середовище – захисний одяг – людина” стаціонарні стани процесів тепломасообміну

змінюється від нормальних умов до максимально допустимих санітарними нормами, як в період функціонування хладогента, так і після його танення (переходу в рідкий стан). Недоліком вказаного методу є ігнорування теплоємністю тонких шарів тканини і повітряних прошарків між ними, що може призвести до похибок у результатах розрахунків.

З метою розроблення нового, більш вірогідного методу розрахунку теплового стану системи “Навколишнє середовище – захисний одяг – людина”, розглядалась найбільш загальна розрахункова схема, представлена на рис. 1. Відповідності до неї, захисний одяг представляється зовнішнім і внутрішніми костюмами. До складу зовнішнього костюма входить: зовнішній шар 1 (прогумований теплостійкий матеріал); внутрішній шар 2 (теплоізоляційний матеріал – синтепон); підкладка 3 (сатин або бязь) і внутрішній шар 5 (комбінована тканина). По внутрішній поверхні шару 5, в сітчастих кишнях 7, містить хладогент 6 (водно-льодяні охолоджуючі елементи – ОЕ). Елементом розрахункової схеми є повітряні прошарки 4 і 8 між шарами зовнішнього костюма 3 і 5, а також між кишнями хладогента 7 і тілом людини 9. Стрілками показано напрями теплових потоків із навколишнього середовища і від тіла людини.

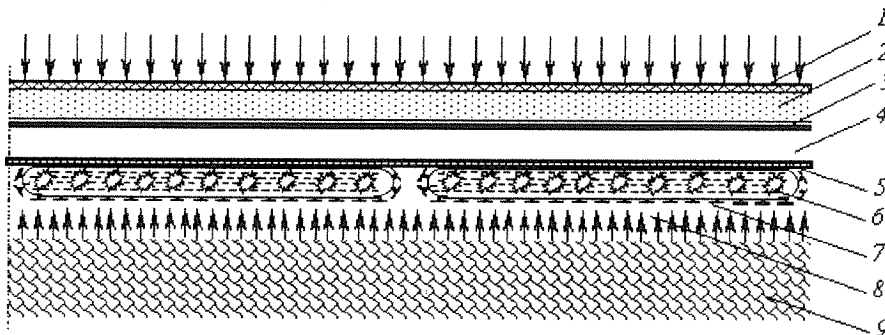


Рис. 1. Розрахунок схем системи “Навколишнє середовище – захисний одяг – людина”:  
1 – зовнішній шар; 2 – внутрішній шар; 3 – підкладка; 4, 8 – повітряні прошарки; 5 – внутрішній костюм; 6 – охолоджуючий елемент; 7 – сітчаста кишень; 9 – тіло людини.

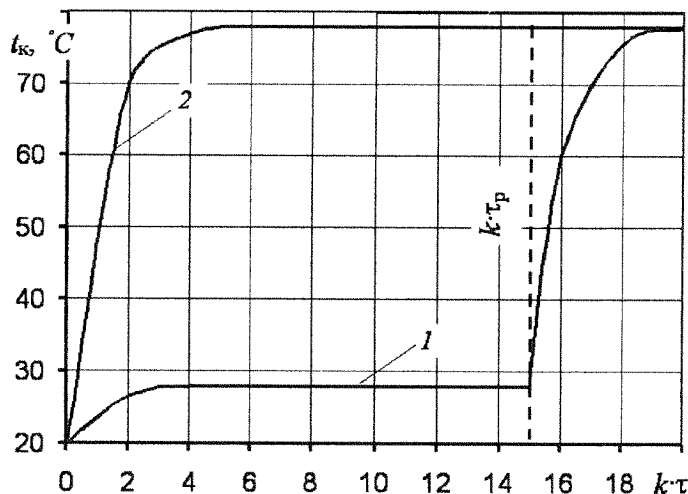


Рис. 2. Динаміка температури в підкостюмному просторі:  
1 – із застосуванням хладогента; 2 – без хладогента

Нестационарні процеси теплопередачі через багатшарову оболонку від оточуючого середовища до підкостюмного моделюються диференціальним рівнянням [2]:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2}, \quad (1)$$

де,  $\rho_i$ ,  $c_i$  и  $\lambda_i$  – щільність, теплова об'ємність, теплопровідність і – його шару середовища (повітря, води, матеріалу костюма) відповідно,  $кг / м^3$ ,  $Дж / (кг \cdot K)$  и  $Вт / (м^2 \cdot K)$ ;  $i$  – індекс, який вказує на значення перемінної в його шарі розрахункової схеми:  $i = 1 \dots 5$  – шар зовнішнього костюма,  $i = 6$  і  $7$  – хладогент і кишені,  $i = 8$  – повітряний прошарок і т.д.;  $T_i = T_i(x, \tau)$  – температура в межах  $i$  – його розрахункової схеми,  $K$ ;  $\tau$  – час з моменту теплової дії,  $c$ ;  $x$  – просторова координата, яка розраховується від зовнішньої поверхні костюма і до середини його матеріалу,  $м$ .

Як початкова умова для рівняння (1) використовується

$$T_i(x, 0) = T_0, \quad (2)$$

де,  $T_0$  – початкова температура ( $T_0 = 20^\circ C$ ).

Теплообмін на границі костюма (верхньої поверхні шару 1) представляється граничними умовами третього роду:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial x} = \alpha_1 [T_1(0, \tau) - T_c], \quad (3)$$

де,  $\alpha_1$  – сумарний коефіцієнт конвективного та променевого теплообміну між навколишнім середовищем і зовнішнім шаром,  $Вт / (м^2 \cdot K)$ , поданим у виді:

$$\alpha_1 = \alpha_{1к} + \sigma_1 (T_1 + T_c)(T_1^2 + T_c^2); \quad (4)$$

де,  $\alpha_{1к}$  – коефіцієнт конвективного теплообміну між навколишнім середовищем і зовнішнім шаром,  $Вт / (м^2 \cdot K)$ ;  $\sigma_1$  – коефіцієнт випромінювання,  $Вт / (м^2 \cdot K^4)$ ;  $T_c$  – температура навколишнього середовища (прийнята постійною сталою),  $K$ .

На границях між шарами 1-2, 2-3, 3-4 і 4-5 задаються граничними умовами четвертого роду:

$$T_i(\delta_i, \tau) = T_{i+1}(0, \tau); \quad \lambda_i \frac{\partial T_i(\delta_i, \tau)}{\partial x} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}(0, \tau)}{\partial x}; \quad (i = 1 \dots 4). \quad (5)$$

На нижній границі останнього шару одягу 5, як і на зовнішній границі задається гранична умова третього роду:

$$\lambda_5 \frac{\partial T_5(\delta_5, \tau)}{\partial x} = \alpha_5 [T_8(\delta_8, \tau) - T_5(\delta_5, \tau)], \quad (6)$$

де  $\alpha_5$  – сумарний коефіцієнт конвективного і променевого теплообміну між нижнім шаром внутрішнього костюма і внутрішньокостюмним простором 8,  $Вт / (м^2 \cdot K)$ , визначається аналогічно  $\alpha_1$  за формулою (4) при значеннях вхідних в неї перемінних для 5-го шару і  $T_c = T_8$ .

Температура  $T_8$  в підкостюмному просторі формується в результаті взаємодії двох змішаних тут теплових потоків, а саме: у внутрішнє середовище, потужність  $\tilde{\Phi}_c(x, \tau)$ ,  $Вт$ ; і від тіла людини, потужністю  $\tilde{\Phi}_r(x, \tau)$ ,  $Вт$ .

При цьому тепла потужність, поглинаюча ОЕ  $\tilde{\Phi}_n$ ,  $Вт$ , повинна бути рівна сумарній потужності вказаних теплових потоків:

$$\tilde{\Phi}_n = \tilde{\Phi}_c + \tilde{\Phi}_\tau. \quad (7)$$

Потужність теплового потоку, поглинаючого ОЕ, у відповідно до [4], залежить від швидкості переміщення границь “лід-вода” і кількості теплоти, затраченої на зміну агрегатного стану льоду. В даних дослідженнях ця залежність вважалась пропорційною коефіцієнту конвективного теплообміну між льодом і підкостюмним простором  $\alpha_n, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , різниця між температурою льоду  $T_n, \text{К}$ , і температурою в підкостюмному просторі  $T_8$ :

$$\tilde{\Phi}_n = \alpha_n S_n (T_8 - T_n), \quad (8)$$

де  $S_n$  – площа поверхні льоду,  $\text{м}^2$ .

З розрахунком (6-8) рівняння теплового балансу в підкостюмному просторі 8 має вид:

$$\alpha_n \frac{S_n}{S} (T_8 - T_n) = \alpha_5 [T_5(\delta_5, \tau) - T_8] + \frac{\tilde{\Phi}_\tau}{S}, \quad (9)$$

де  $S$  – площа поверхні костюма,  $\text{м}^2$ .

Таким чином, теплопередача від навколишнього середовища и тіла людини в підкостюмному просторі моделюється диференціальним рівнянням (1) з початковою умовою (2) і граничними умовами (3), (5) і (9).

На початку розглядають (установленні) розподіленні температури, які створюються в шарах костюма і підкостюмному просторі по закінченні тривалого проміжку часу ( $\tau \rightarrow \infty$ ). В цьому випадку вихідне рівняння (1) приводиться до стаціонарному виду (з нульовою правою частиною) і температура залежить тільки від просторової координати, а потужність теплового потоку, що проникає із навколишнього середовища – постійна у всіх шарах костюма:  $\tilde{\Phi}_c = \Phi_c = \text{const}$ . В результаті інтегрування (1) просторової перемінної з розрахунком граничних умов отриманих рішень:

$$T_1(0) = T_c - \frac{\Phi_c}{\alpha_1 S}; \quad T_{i+1}(0) = T_i(0) - \frac{\Phi_c \delta_i}{\lambda_i S}, (i = 1..4); \quad T_5(\delta_5) = T_8 + \frac{\Phi_c}{\alpha_5 S}. \quad (10)$$

Після сумування двох частин рівняння (10), потужність теплового потоку із навколишнього середовища в підкостюмний простір, обчислюється наступним чином:

$$\Phi_c = S(T_c - T_8) \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_5} \right), \quad (11)$$

де введено позначення  $\frac{\delta}{\lambda} = \sum_{i=1}^5 \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ .

Метою отримання рішення нестационарної задачі теплопередачі, права частина початкового рівняння (1) представлялась в кінцевих різницях, в результаті рівняння набуло такого вигляду:

$$\frac{dT}{d\tau} = a \frac{T_n - 2T + T_k}{\delta^2}, \quad (12)$$

де  $T = T(\tau)$  – середня температура в середині оболонки костюма (з першого по п'ятий шар),  $\text{К}$ ;

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}; \quad \lambda = \frac{\sum_{i=1}^5 \delta_i}{\sum_{i=1}^5 \delta_i / \lambda_i}; \quad \rho = \frac{\sum_{i=1}^5 \rho_i \delta_i}{\sum_{i=1}^5 \delta_i}; \quad c = \sum_{i=1}^5 c_i / 5 - \text{константи};$$

$T_H = T_1(0, \tau)$  і  $T_K = T_5(\delta_5, \tau)$  – температура на верхніх і нижніх границях костюма, відповідно.

Після представлення лівих частин граничних умов (3) і (6) в кінцевих різниціях, з розрахунку (9), отримаємо:

$$T_H = A_1 + B_1 T; \quad T_K = A_2 + B_2 T, \quad (13)$$

де,

$$A_1 = \frac{1}{1 + 2\bar{\lambda}_1} T_c; \quad B_1 = \frac{2\bar{\lambda}_1}{1 + 2\bar{\lambda}_1}; \quad \bar{\lambda}_1 = \frac{\lambda}{\delta \alpha_1};$$

$$A_2 = \frac{\bar{\alpha}_n T_n + \bar{\Phi}}{2(1 + \bar{\alpha}_n)\bar{\lambda} + \bar{\alpha}_n}; \quad B_2 = \frac{2(1 + \bar{\alpha}_n)\bar{\lambda}}{2(1 + \bar{\alpha}_n)\bar{\lambda} + \bar{\alpha}_n}; \quad \bar{\alpha}_n = \frac{\alpha_n S_n}{\alpha_5 S}; \quad \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\delta \alpha_5}; \quad \bar{\Phi} = \frac{\tilde{\Phi}_\tau}{\alpha_5 S},$$

при цьому температура в підкостюмному просторі:

$$T_n = T_8 = \frac{T_K + \bar{\alpha}_n T_n + \bar{\Phi}}{1 + \bar{\alpha}_n} = A_3 + B_3 T, \quad (14)$$

де,

$$A_3 = \frac{(\bar{\alpha}_n + \bar{\Phi}_n)(1 + 2\bar{\lambda}\delta/\sigma)}{2(1 + \bar{\alpha}_n)\bar{\lambda}\delta/\sigma + \bar{\alpha}_n/\alpha_5}; \quad B_3 = \frac{2\bar{\lambda}\delta/\sigma}{2(1 + \bar{\alpha}_n)\bar{\lambda}\delta/\sigma + \bar{\alpha}_n/\alpha_5}.$$

Після постановки (13) в (12) нестационарне рівняння набуває вигляду:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{a}{\delta^2} [A_1 + A_2 - (2 - B_1 - B_2)T], \quad (15)$$

а початкове рівняння  $T(0) = T_0$ . (16)

Рішення (15) з врахуванням (16):

$$T = T^* - (T^* - T_0)e^{-k\tau}, \quad (17)$$

де,  $T^* = T(\infty) = \frac{A_1 + A_2}{2 - B_1 - B_2}$  – температура в середині оболонки костюма при встановленому

режимі,  $K$ ;  $k = (2 - B_1 - B_2) \frac{a}{\delta^2}$  – параметр швидкості зміни температури між верхнім шаром костюма 1 і нижнім шаром 5.

У відповідності з (8) і (14) "холодного виробництва" системи в залежності від часу з моменту теплової дії рівна:

$$\tilde{\Phi}_n = \alpha_n S_n (A_3 + B_3 T - T_n). \quad (18)$$

Оскільки температура в підкостюмному просторі з часом підвищується, то згідно з (18) швидкість танення льоду збільшується до цілковитого переходу його в рідину.

В таблиці представлені результати розрахунку температури на границях оболонки костюма і в підкостюмному просторі за отриманими формулами (13), (14) і (17) по закінченні тривалого проміжку часу ( $\tau \rightarrow \infty$ ), коли настає стаціонарний тепловий режим і досягається максимальне значення температури.

Таблиця 1. Результати розрахунку установлених температур всередині оболонки костюма

$T_n, K(^{\circ}C)$	$T^*, K(^{\circ}C)$	$T_k, K(^{\circ}C)$	$T_n, K(^{\circ}C)$	Примітка
355,5(82,5)	345,8(72,8)	336,0(63,0)	302,0(29,0)	Із застосуванням хладагента ( $\tilde{\Phi}_n = 530 \text{ Вт}$ )
367,5(94,5)	364,6(91,6)	361,7(88,7)	351,7(78,7)	без застосування хладагента ( $\tilde{\Phi}_n = 0 \text{ Вт}$ )

Розрахунки проводились при наступних початкових даних [1]:

$$T_c = 373 \text{ K } (100^{\circ}\text{C}); \quad S = 4 \text{ м}^2; \quad \delta = 0,01 \text{ м}; \quad \lambda = 0,035 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$\alpha_1 = 4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \quad \alpha_5 = 2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Максимальна температура в підкостюмному просторі приймалася рівною  $T_n(\infty) = 302 \text{ K } (29^{\circ}\text{C})$ , а температура льоду  $T_n = 273 \text{ K } (0^{\circ}\text{C})$ . При цьому тепловий потік із навколишнього середовища становив  $\Phi_c \approx 274 \text{ Вт}$ . Теплопродукція організму людини приймалася рівною  $\Phi_r \approx 256 \text{ Вт}$  при веденні робіт середньої тяжкості [1].

В результаті очікувана максимальна температура всередині шарів одягу при функціонуванні хладагента  $T^* = 345,8 \text{ K } (72,8^{\circ}\text{C})$ , а без нього  $T^* = 364,6 \text{ K } (91,6^{\circ}\text{C})$ .

У відповідності з (18) можна розрахувати потужність потоку тепла  $\Phi_0$  і  $\Phi^*$  при таненні льоду в початковий момент часу ( $\tau = 0$ ) і після досягнення стаціонарного режиму теплопередачі ( $\tau = \infty$ ), а потім визначити необхідний запас льоду  $M_n, \text{ кг}$ , на заданий період часу  $\tau$  за формулою:

$$M_n = [\Phi^* \tau - (\Phi^* - \Phi_0)/(k \cdot e^{k\tau})]/q, \quad (19)$$

де,  $q$  – мінімальний запас холоду льоду, Дж/кг.

Якщо запас льоду відомий, то розв'язавши рівняння (19) відносно  $\tau$  з допомогою будь-якого ітераційного методу рішення не лінійних рівнянь, можна визначити час захисної дії системи охолодження  $\tau_p$  (період танення льоду).

Динаміка температури в підкостюмному просторі при наявності хладагенту і після його використання через період часу  $\tau_p$ , а також без застосування хладагента приведена на рис. 2.

Графіки побудовано з використанням представлених вище початкових даних.

Таким чином, розроблений метод дозволяє досліджувати процеси тепломасопереносу в підкостюмний простір з розрахунком дії зовнішнього середовища, теплового стану організму людини і фазового переходу в систему охолодження при різних розрахунках і кількості шарів з повітряними прошаруваннями в оболонці костюма. Це дозволяє визначити розподіл температури всередині оболонки костюма і час його захисної дії. Тому даний метод може бути використаний при проектуванні засобів індивідуального проти теплового захисту пожежних і гірничих рятувальників.