

МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ В КАБЕЛЬНОМУ ТУНЕЛІ

Запропоновано вирішення задачі розподілу пожежних газів в об'ємі кабельного тунелю. Доведено, що дальність і тривалість поширення диму може перевищити ці показники для температури

При розробці заходів щодо протипожежного захисту кабельних тунелів і в оперативній обстановці, у період ліквідації пожежі, необхідно мати об'єктивні дані про закономірності розподілу швидкостей газових потоків і теплоти в межах аварійної ділянки тунелю. Розподіл температури й димових газів у просторі тунелю формуються під впливом депресії вентиляторів провітрювання і (або) теплових джерел тяги (природної конвекції). Одним з найбільш ефективних методів дослідження динаміки розподілу швидкостей повітряних потоків, продуктів горіння й теплоти, на рівні локальних характеристик, є математичне моделювання.

У даній роботі приймається, що процеси тепломасообміну й горіння в об'ємі аварійного об'єкта практично не залежать від однієї або двох просторових координат і є одномірними або двовимірними плоскими. Така постановка задачі можлива у випадку зосередження пожежного навантаження уздовж напрямку вентиляційного струменя, що характерно для кабельного тунелю (рис. 1.).

Основною проблемою моделювання динаміки розвитку пожежі на підставі математичної моделі конвективно-дифузійного переносу теплоти в кабельному тунелі (1-4) і поширення диму в його повітряному середовищі [10] є визначення функцій динаміки джерел:

$$\frac{\partial t}{\partial \bar{\tau}} + G \frac{\partial t}{\partial \xi} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + St \cdot (t_{\Omega} - t) + f(\bar{\tau}), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \hat{t}}{\partial \bar{\tau}} = \bar{F}u \left(\frac{\partial^2 \hat{t}}{\partial \bar{r}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial \hat{t}}{\partial \bar{r}} + \frac{\partial^2 \hat{t}}{\partial \xi^2} \right), \quad (2)$$

з крайовими умовами:
$$\frac{\partial \hat{t}}{\partial \bar{r}} \Big|_{\bar{r}=0} = Nu(t_{\Omega} - t), \quad (3)$$

$$t \Big|_{\bar{\tau}=0} = \hat{t} \Big|_{\bar{\tau}=0} = t \Big|_{\xi=\pm\infty} = \hat{t} \Big|_{\bar{r}=0} = \hat{t} \Big|_{\bar{r}=\pm\infty} = 0, \quad (4)$$

де $Pe = \frac{\rho_0 u_0 c_p l}{a} = \frac{G_0 c_p l}{\lambda S}$ – безрозмірний комплекс, аналог критерію Пекле;

$St = \frac{\alpha_r \Omega l}{c_{pv} G_0}$ – безрозмірний комплекс, аналог критерію Стантона;

$t_{\Omega} = \frac{T_{ст} - T_0}{\Delta T_{он}}$ – відносне значення температури стінок тунелю.

Вірогідність моделювання залежить у першу чергу від відповідності

$$f(\bar{\tau}) = \frac{\bar{I}_\tau \tau_0}{T^* - T_0} = \frac{\Theta}{\Theta_{\max}} - \text{функція теплового джерела, що змінюється в межах } 0 \dots 1;$$

$$\hat{\tau} = (\bar{T} - T_0) / (T^* - T_0) - \text{відносна величина температури масиву};$$

$$\bar{r} = (r - R) / l - \text{відносна величина відстані від стінок углиб масиву};$$

$$\bar{Fr} = \frac{\hat{a} \cdot \tau_0}{l^2} - \text{безрозмірний комплекс, аналог критерію Фур'є};$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\hat{\lambda}} - \text{безрозмірний комплекс, аналог числа Нуссельта},$$

і $\tilde{f}(\bar{\tau})$ фактичній динаміці тепловиділення й газовиділення.

Для визначення функції теплового джерела, представлені емпіричні дані про теплову потужність пожежі [9] апроксимувалися залежністю від часу виду:

$$\bar{\Theta} = a \cdot \tau^b \cdot e^{c\tau}, \quad (5)$$

де $\bar{\Theta} = \Theta / \Theta_{\max}$; a , b і c – константи.

В результаті для функції теплового джерела отримані параметри, представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати апроксимації динаміки температури у осередку пожежі функцією $f(\bar{\tau}) = a \cdot \tau^b \cdot e^{c\tau}$

Розмір зони ураження тунелю, м	Параметри функції		
	a	b	c
25	$4,926 \cdot 10^{-7}$	5,967	-0,1947
50	$8,671 \cdot 10^{-5}$	3,512	-0,0901
75	$5,266 \cdot 10^{-4}$	2,644	-0,0560
100	$1,262 \cdot 10^{-3}$	2,213	-0,0399

Аналіз розрахункових значень температури в осередку пожежі, отриманих з використанням даних табл. 1 (рис. 2) практично не відрізняється від цих показників за результатами інших досліджень [1, 2].

Наявність показників динаміки температури теплового джерела дозволило здійснити числове моделювання процесів поширення теплоти в кабельному тунелі. Із цією метою похідні, що входять в рівняння (1-4) за часом і просторовими координатами замінялися кінцево-різницеви аналогами [3, 4]. Похідні за часом були представлені різницями "вперед", перші похідні за просторовими перемінними різницями "проти потоку", а другі похідні – "центральними різницями". У результаті отриманий кінцево-різницевий аналог (1-4):

$$t_j^{n+1} = \left(1 + R_e + \frac{S_t}{1 + N_u}\right)^{-1} \left[R_e \cdot t_{j-1}^{n+1} + \hat{F}_x \cdot (t_{j+1}^n + t_{j-1}^n) + (1 - \hat{F}_x) \cdot t_j^n + \frac{S_t}{1 + N_u} t_{\Omega_j}^{n+1} \right]; \quad (6)$$

$$\hat{t}_{ij}^{n+1} = F_x \cdot (\hat{t}_{ij+1}^n + \hat{t}_{ij-1}^n) + (1 - 2 \cdot F_x - 2 \cdot F_r) \cdot \hat{t}_{ij}^n + F_r \cdot (\hat{t}_{i+1j}^n + \hat{t}_{i-1j}^n); \quad (7)$$

$$t_{\Theta_j}^{n+1} = \frac{\hat{t}_{1j}^{n+1} + N_u \cdot t_j^{n+1}}{1 + N_u}, \quad (8)$$

де $F_x = \frac{a \cdot \Delta \tau}{\Delta x^2}$, $\hat{F}_x = \frac{\hat{a} \cdot \Delta \tau}{\Delta x^2}$, $F_r = \frac{a \cdot \Delta \tau}{\Delta r^2}$, $\hat{F}_r = \frac{\hat{a} \cdot \Delta \tau}{\Delta r^2}$ – сіткові числа Фур'є;

$R_e = \frac{u_0 \cdot \Delta r}{\Delta x}$, $N_u = \frac{\alpha \cdot \Delta r}{\lambda}$ і $S_t = \frac{\alpha \cdot \Omega \cdot \Delta \tau}{\rho_0 \cdot c_p \cdot S}$ – сіткові числа Рейнольдса, Нуссельта й

Стантона.

Враховуючи одновимірну постановку задачі для температури повітря, функція джерела задавалася на межі повітря й масиву відповідними значеннями температури стінок тунелю в межах зони горіння.

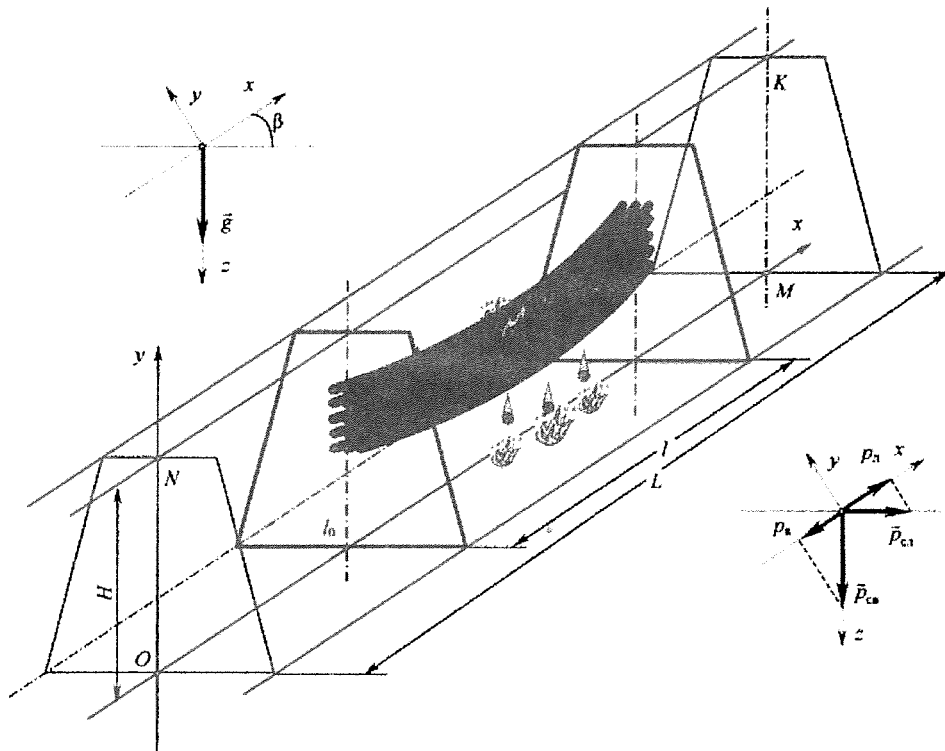


Рис. 1. Розрахункова схема аварійної ділянки кабельного тунелю:
x, y - просторові координати, м; P - тиск, Па;

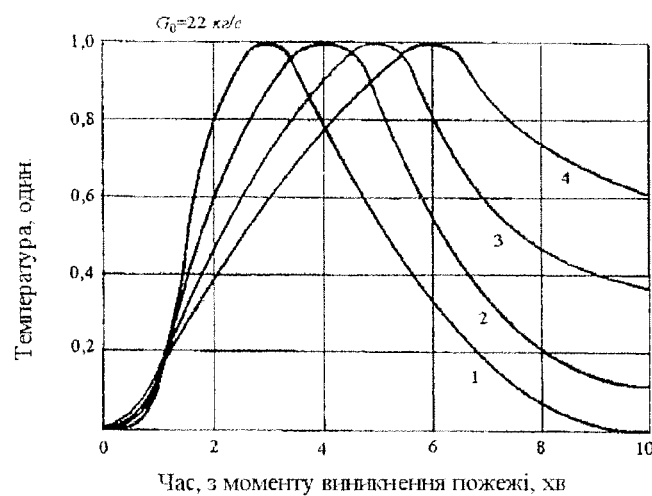


Рис. 2. Емпіричні дані про динаміку температури в осередку пожежі залежно від розміру зони ураження: 1 – 25 м; 2 – 50 м; 3 – 75 м; 4 – 100 м

Результати моделювання представлені на рис. (3-6). Отримана динаміка максимальної температури повітря (крива $x=0$ на рис. 3) відповідає результатам дослідних даних, представлених в [2]: через 3 хв середня в перерізі тунелю температура повітря досягає 400 °С, через 7 хв - 800 °С.

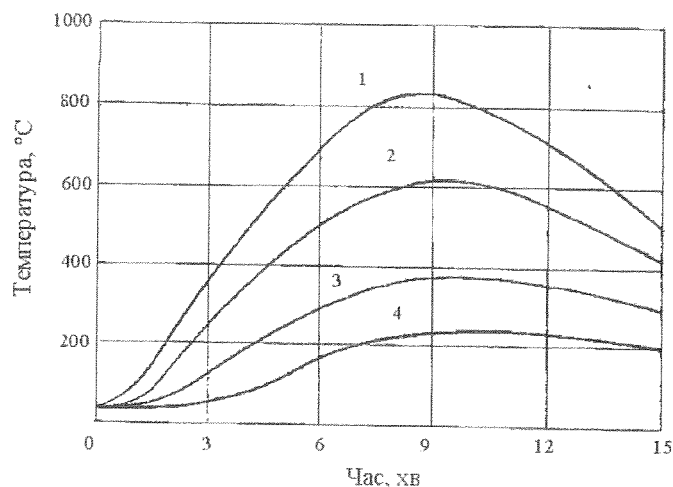


Рис. 3. Динаміка температури повітря в залежності від відстані до вогнища пожежі: 1 - в осередку пожежі; 2 - 5 м; 3 - 10 м; 4 - 15 м

На підставі цього був зроблений прогноз температури на відстанях 5, 10 та 15 м від осередку пожежі. Виявилося, що після загасання пожежі (тривалість пожежі становила 15 хв) температура повітря в цих перерізах може перевищувати 200 °С.

Температурний режим масиву при моделюванні цієї пожежі ілюструється графіками рис. 4. Звідки видно, що до початку стадії загасання пожежі (9 хв) температурний режим масиву залишається регулярним (температура із глибиною убуває за експонентним законом [5]), а потім починається тепловіддача масиву повітря.

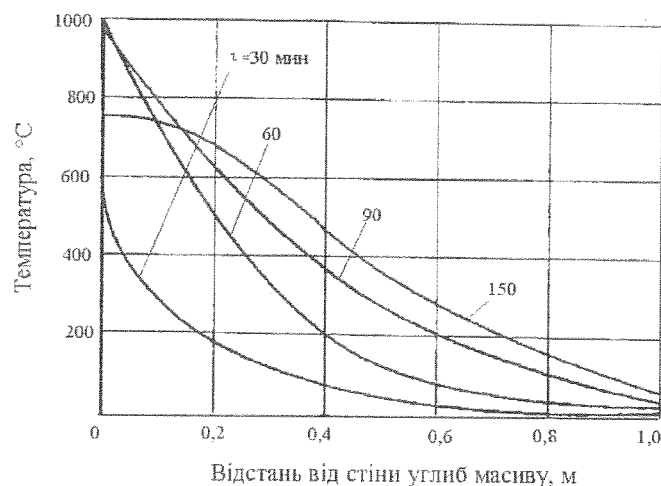


Рис. 4. Динаміка максимальної температури масиву

Створена математична модель дозволяє здійснювати прогноз динаміки температури повітряних потоків (пожежних газів), що виходять із осередку. Один з варіантів моделювання розподілу температури таких потоків представлений на рис. 5. У цьому випадку після завершення стаціонарного періоду пожежі температура починає знижуватися. Однак, у ході моделювання було зауважено явище "сплеску" (стрибка) температури в перші

хвилини після загасання пожежі (див. рис. 6). Виникаюча теплова хвиля просувається уздовж тунелю ще близько 30 хв після загасання пожежі. Це варто враховувати в ході ліквідації наслідків аварії.

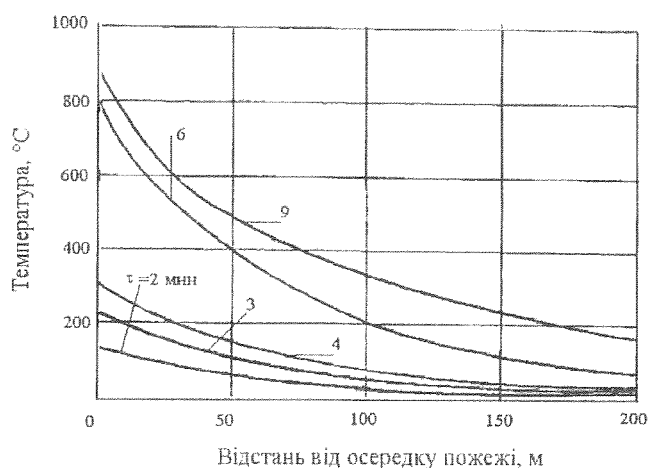


Рис. 5. Температурне поле в тунелі на різних стадіях розвитку пожежі

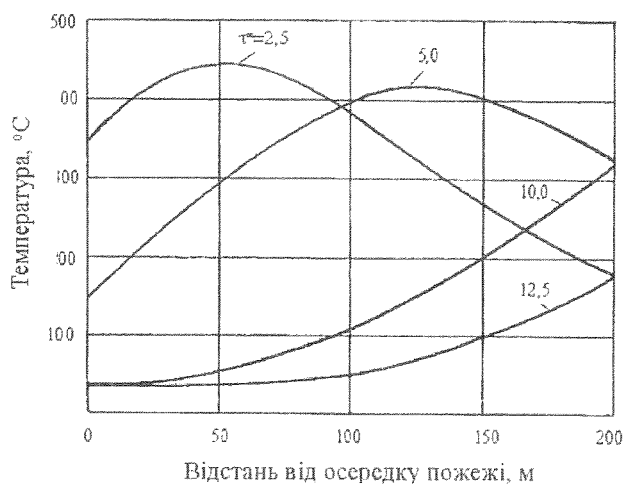


Рис. 6. Динаміка температури за вогнищем після загасання пожежі

Динаміка величин середньої й середньогармонійної температури, необхідних для обчислення теплових джерел тяги, показана на рис. 7. Звідки випливає, що відношення (T_k/T_0-1) , що визначає величини коефіцієнта інерційних сил k_i й числа Ричардсона (для локальної теплової депресії), досягає значення 3 (див.рис.7).

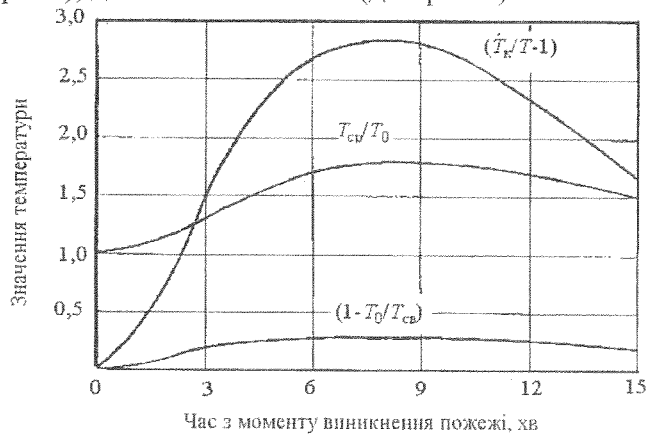


Рис. 7. Динаміка середньої температури в кабельному тунелі при пожежі

Максимальна величина коефіцієнта теплового опору – $k_r = T_{cp}/T_0 = 1,75$, а тепла депресія в стаціонарний період пожежі становить 75 % різниці висотних відміток граничних перерізів тунелю. Отже, теплові фактори пожежі істотно позначаються на аеродинаміці тунелю.

Представлена модель переносу теплоти може бути використана й для моделювання поширення димових газів в об'ємі тунелю. Із цією метою досить замість коефіцієнта температуропровідності a у виразі для числа Фур'є підставити коефіцієнт дифузії домішок ψ та проводити розрахунки вмісту диму відповідно до (6) (величина t еквівалентна C) при $St=0$ (відсутність поглинання диму масивом). У ході розрахунків правомірно прийняти динаміку джерела виділення димових газів в осередку подібній динаміці виділення теплоти.

Однак, у прийнятих допущеннях, вміст димових газів у вихідних з осередку пожежі повітряних потоках, є вирішенням задачі [6].

$$\psi \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = u_0 \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial C}{\partial \tau}, \quad (9)$$

$$\text{з крайовими умовами: } C|_{x=0, \tau>0} = f(\tau); C|_{\tau=0} = C|_{x=\pm\infty} = C_n, \quad (10)$$

де C_n – вміст домішок до виникнення пожежі.

$$\text{У результаті } C(x, \tau) = \frac{x}{2\sqrt{\pi\psi}} \int_0^\tau \frac{\tilde{f}(\eta) \cdot \exp\left[-\frac{1}{4\psi}\left(u_0\sqrt{\tau-\eta} - \frac{x}{\sqrt{\tau-\eta}}\right)^2\right]}{(\tau-\eta)^{3/2}} d\eta. \quad (11)$$

Один з результатів розрахунків по (11) із застосуванням формули чисельного інтегрування Симпсона представлений на рис. 8, де x – відстань від осередку пожежі.

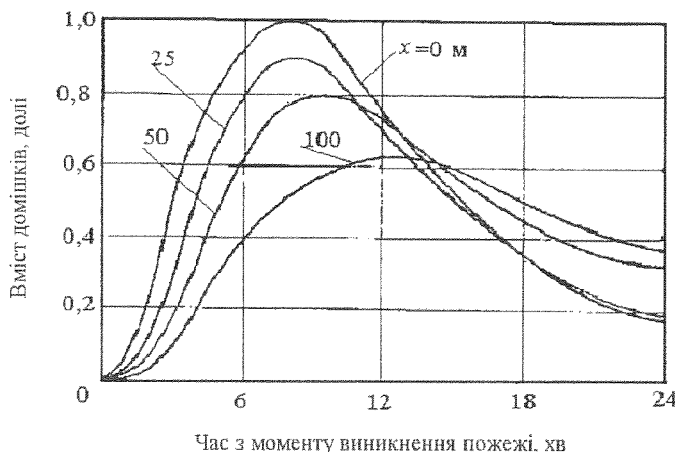


Рис. 8. Динаміка вмісту димових газів при пожежі в кабельному тунелі

При розрахунку використовувалися експериментальні дані про коефіцієнт дифузії діоксиду вуглецю в повітрі при його запуску в експериментальну штольню [7]. На відміну від представленої вище динаміки температури (рис. 3) – зміна вмісту димових газів за осередком пожежі відбувається з істотним запізнюванням у порівнянні з динамікою у вогнищі. Це свідчить про те, що зона поширення диму більша, ніж теплоти. Вірогідно визначити ступінь цього розходження можливо тільки після проведення експериментальних досліджень в умовах кабельних тунелів.

Таким чином, у результаті проведених теоретичних досліджень, створена числова модель конвективно-дифузійного переносу теплоти й димових газів у повітряних потоках кабельних тунелів (6-8) при пожежі. Встановлено, що після загасання пожежі виникає

високотемпературна теплова хвиля. Запропоновано аналітичне вирішення задачі розрахунку розподілу пожежних газів в об'ємі тунелю (11), відповідно до якого, дальність і тривалість поширення диму може перевищувати ці показники для температури. Однак, для підтвердження цих теоретичних висновків потрібне проведення експериментальних досліджень.

Висновки:

1. Побудовано математичну модель конвективно-дифузійного переносу теплоти й димових газів (1-4) у повітряних потоках кабельних тунелів при пожежах, що враховує аеродинамічні характеристики тунелю; співвідношення між інтенсивністю конвективного й дифузійного переносу теплоти; частку кількості теплоти, розповсюджуваної за рахунок теплообміну між повітрям і масивом, у загальній теплоємності повітряної маси; теплофізичні властивості навколишнього тунель масиву; відношення інтенсивності конвективного теплообміну до інтенсивності розсіювання теплоти в масиві та динаміку теплового джерела.

2. Досліджено процеси руху газових потоків у кабельному тунелі при пожежі, при цьому встановлена залежність очікуваної витрати газоповітряного потоку [8] від температури в тунелі.

3. Обґрунтовано можливість дестабілізації провітрювання тунелю (зміна напрямку руху газоповітряного потоку) при пожежі за рахунок локальної й глобальної теплової депресії, визначено час, необхідний для нормалізації режиму провітрювання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Болбат И.Е., Смоланов С.Н., Ревякин А.В. Исследование температурных условий в пожарной выработке при "нулевом" режиме вентиляции. – В сб. Известия Донецкого горного института, № 2 (4), 1996. – С. 39-44.
2. Руководство по определению параметров подземного пожара и выбору эффективных средств его тушения: Утв. ВУ ВГСЧ 09.09.85. – Донецк, 1985. – 96 с.
3. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
4. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкостей. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 150 с.
5. Ковалишин В.В., Бойко Т.В., Дмитровський С.Ю. Аналитические исследования тепломассообменных процессов в закрытых объектах большой длины при возникновении пожаров / Сб. тезисов докладов 3 Международной научно-практической конференции: Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы. – Минск, 2006. – С. 157–159.
6. Рекомендации по оценке опасных зон повышенных температур и концентраций газов при пожарах в горизонтальных и наклонных выработках: Утв. ВУ ВГСЧ 18.08.80 / Донецк, 1980. – 17 с.
7. Баскаков А.П., Берг Б.В., Витт О.К. Теплотехника. – М.: Энергоиздат, 1982. – 264 с.
8. Руководство по выбору эффективных режимов проветривания шахт при авариях / ВНИИГД. – Донецк, 1986. – 123 с.
9. Бондарев В.Ф., Лесков А.А. Определение интенсивности тепловыделения при пожаре подвижного состава метрополитена в тоннеле // Борьба с пожарами на метрополитене: Сб. науч. трудов. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1992. – С. 62-70.
10. Дмитровський С.Ю. Математична модель динаміки температури при пожежі в кабельному тунелі // Пожежна безпека-2007: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, Черкаси 15-16 жовтня 2007 р.– Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2007. – С. 518-519.