

В.В. Ковалишин, канд. техн. наук, доцент  
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСУ ДИСПЕРГОВАНОЇ ВОДИ ДО ОСЕРЕДКУ ПОЖЕЖІ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ КАНАЛАХ ВЕЛИКОЇ ДОВЖИНИ

Викладено теоретичні основи переносу диспергованої води, як аерозолі, в протяжних каналах з урахуванням дії сили тяжіння і втрат крапель рідини на стінках каналу. Отримано аналітичні залежності швидкості осаджування крапель рідини та концентрації рідкої фази в потоці повітря по довжині і висоті каналу, що дозволяє робити науково обґрунтований прогноз доставки необхідної кількості диспергованої води до осередку пожежі для його ефективного гасіння.

**Ключові слова:** канал, пожежа, гасіння, диспергована вода, вогнегасна концентрація

**Постановка проблеми.** Незважаючи на традиційний засіб гасіння пожеж дисперговою водою в тунелях, гірських виробках і в різних приміщеннях не повністю вирішені питання транспортування крапель рідини до осередку пожежі та ефективність їх впливу на процеси горіння. Як відзначається в роботі [4], "проблему більш ефективного використання води не можна вважати вирішеною".

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Як показує стан питання [1-5], експериментально доведена ефективність використання диспергованої води (від тонкорозпиленої до туманоподібної) потребує і подальших експериментальних досліджень та розвитку розрахункових методів. Створення досить точних математичних моделей гасіння пожеж дає змогу відмовитися від великої кількості натурних спостережень, замінивши їх чисельними експериментами та аналітичними розрахунками.

**Виклад основного матеріалу.** Виділимо деяку ділянку каналу  $x_n$  за місцем подачі води із струменевим закінченням крапель, за яким під дією сили тяжіння вони осідають на грунт каналу (рис.1).

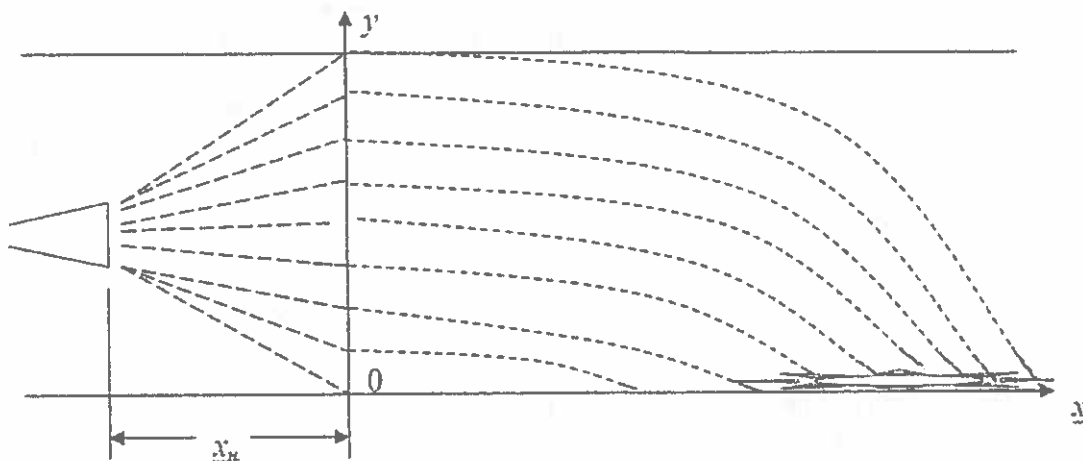


Рис. 1. Схема подачі диспергованої води до осередку пожежі

Найбільший практичний інтерес викликає динаміка крапель рідини в потоці повітря до осередку пожежі в протяжному каналі, оскільки доставка вогнегасної концентрації рідини великою мірою залежить від відстані до зони горіння. Знехтуємо початковою ділянкою  $x_n$

порівняно з усією довжиною польоту крапель рідини і будемо надалі розглядати стаціонарний режим руху окремих крапель рідини.

Проекції граничної швидкості польоту крапель визначаються з рівняння їх динаміки в стаціонарному режимі, коли похідні швидкості за часом звертаються в нуль, що дозволяє записати для ламінарного, турбулентного і змішаного режимів руху [6]:

$$0 = -g \sin \alpha + \frac{3}{4d_k} \frac{\rho_1}{\rho_2} (0,5|u_1 - u_2| + 24\nu/d_k)(u_1 - u_2)$$

$$0 = -g \cos \alpha - \frac{3}{4d_k} \frac{\rho_1}{\rho_2} (0,5|v_2| + 24\nu/d_k)v_2, \quad (1)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  
 $\alpha$  – кут нахилу каналу до горизонту, град;  
 $d_k$  – діаметр крапель рідини, м;  
 $\rho_1$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_2$  – щільність рідини, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\nu$  – кінематична в'язкість повітря, м<sup>2</sup>/с;  
 $u_1$  – швидкість руху повітря уздовж каналу, м/с;  
 $u_2$  – поздовжня складова швидкості руху крапель рідини, м/с;  
 $v_2$  – вертикальна складова руху крапель, м/с.

Розв'язуючи систему рівнянь відносно проекцій швидкості руху крапель рідини, отримуємо

$$u_2 = u_1 + 24\nu/d_k - \sqrt{(24\nu/d_k)^2 + \frac{8d_k g \sin \alpha \rho_2}{3 \rho_1}};$$

$$v_2 = 24\nu/d_k - \sqrt{(24\nu/d_k)^2 + \frac{8d_k g \cos \alpha \rho_2}{3 \rho_1}}. \quad (2)$$

Аналіз отриманих формул (2) показує, що наявність опору рухові крапель рідини призводить до зменшення їх поздовжньої швидкості в каналі з нахилом вгору та до збільшення швидкості в каналі з нахилом вниз. У той же час в горизонтально розташованому каналі поздовжня швидкість краплі збігається зі швидкістю повітря, а наявність поперечної негативної швидкості призводить до зміщення краплі вниз, поки вона не опиниться на ґрунті. Це зміщення, як показує формула (2), тим більше, чим більша маса або діаметр краплі. Таким чином, більш важка і ближче розташована до дна каналу крапля швидше припинить своє існування і зіллється з тими краплями, які вже знаходяться на дні каналу.

Для зручності моделювання динаміки рідкої фази в потоці повітря представимо формули (2) в безрозмірному вигляді. Розділимо ліву і праву частини формул (2) на параметр поздовжньої швидкості  $u_1$  і отримаємо

$$\bar{u}_1 = u_2/u_1 = 1 + 24\nu/u_1 d_k - \sqrt{(24\nu/u_1 d_k)^2 + \frac{8d_k g \sin \alpha \rho_2}{3u_1^2 \rho_1}};$$

$$\bar{v}_2 = v_2/u_1 = 24\nu/u_1 d_k - \sqrt{(24\nu/u_1 d_k)^2 + \frac{8d_k g \cos \alpha \rho_2}{3u_1^2 \rho_1}}. \quad (3)$$

Тут в правій частині формул (3) присутні критерії подібності. Одним з критеріїв подібності є число Рейнольдса

$$Re = u_1 d_k / \nu. \quad (4)$$

За інший критерій подібності приймемо ставлення динамічних сил повітря до сил гравітації і в'язкості

$$K = \frac{\rho_1 u_1^2}{\rho_2 g h} \frac{u_1 h}{\nu}, \quad (5)$$

де  $h$  – висота каналу, м.

Тоді в критеріальному вигляді замість (3) можна записати

$$\begin{aligned} \bar{u}_1 &= u_2 / u_1 = 1 + 24 / Re - \sqrt{(24 / Re)^2 + \frac{Re \sin \alpha}{0,375K}}; \\ \bar{v}_2 &= 24 / Re - \sqrt{(24 / Re)^2 + \frac{Re \cos \alpha}{0,375K}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Задавши значення одному критерію і змінюючи значення іншого критерію, можна простежити, як змінюється поле швидкостей рідкої фази. У якості вихідних параметрів приймемо: швидкість потоку заздалегідь відому і яка знаходиться в межах  $u_1 = 1-4$  м/с; прискорення вільного падіння  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>; кінематичну в'язкість повітря  $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с; щільність повітря  $\rho_1 = 1,3$  кг/м<sup>3</sup>; щільність води  $\rho_2 = 1000$  кг/м<sup>3</sup>. У цьому випадку гравітаційний критерій буде знаходитися в межах:  $K = 8,8 - 563$  і залежить, по суті, тільки від швидкості повітря. Як приклад візьмемо критерій  $K = 30$ , що відповідає швидкості повітря  $u_1 = 1,5$  м/с. Приймемо кут нахилу каналу до горизонту  $\alpha = 30^\circ$  і будемо міняти критерій Рейнольдса. Для діаметрів крапель рідини  $d_k = (10-200) \cdot 10^{-6}$  м критерій Рейнольдса в цьому випадку буде перебувати в межах  $Re = 1 - 20$ . Таким чином, згідно (6) режим руху крапель знаходиться в ламінарній і перехідній області.

Використовуючи отримані результати, можна визначити шлях, який проходять краплі рідини, або дальність їх польоту. Проте дальність польоту не інформує про вміст вологи в довірному перерізі каналу, що необхідно для оцінки вогнегасної концентрації диспергованої води на заданій відстані від місця її подачі. Тому метою подальших досліджень є моделювання переносу і розподілу дрібнодисперсної рідини по висоті і довжині каналу. В умовах квазістаціонарного процесу рівняння переносу диспергованої води, як аерозолі, має вигляд [7]

$$u_1 \frac{\partial Z}{\partial x} + v_2 \frac{\partial Z}{\partial y} = D_2 \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} - \gamma Z, \quad (7)$$

де  $Z$  – концентрація рідкої фази (аерозолі) у потоці повітря, кг/м<sup>3</sup>;  
 $D_2$  – коефіцієнт турбулентних пульсацій крапель в потоці повітря, м<sup>2</sup>/с;  
 $\gamma$  – параметр швидкості втрат крапель на стінках каналу і при випаровуванні, 1/с;  
 $x$  – поздовжня координата, яка відраховується від місця подачі диспергованої води у напрямку до осередку пожежі, м;  
 $y$  – вертикальна координата, яка відраховується від покрівлі каналу до ґрунту, м.  
 Гранична умова для рівняння (7) може бути представлена у вигляді:

$$Z_0(0, y) = \begin{cases} Z_0, & \text{якщо } 0 < y < h; \\ 0, & \text{якщо } 0 > y > h. \end{cases} \quad (8)$$

Тут  $Z_0$  – початкова концентрація рідкої фази в потоці повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $h$  – висота каналу, м.  
 Шляхом ряду перетворень отримано аналітичне рішення рівняння (7) з граничною умовою (8):

$$Z(x, y) = \frac{Z_0}{2} \exp(-\gamma x / u_1) \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{h + v_2 x / u_1 - y}{2 \sqrt{D_2 x / u_1}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{v_2 x / u_1 - y}{2 \sqrt{D_2 x / u_1}} \right) \right], \quad (9)$$

Введемо безрозмірні змінні:

$\bar{Z} = Z / Z_0$  – відносна концентрація води в потоці повітря;

$\bar{y} = y / h$  – відносна вертикальна координата;

$\bar{x} = x / h$  – відносна відстань від місця подачі води;

$Pe = u_1 h / D_2$  – число Пекле турбулентного перемішування;

$V = v_2 / u_1$  – відносна швидкість вертикального перемішування рідкої фази;

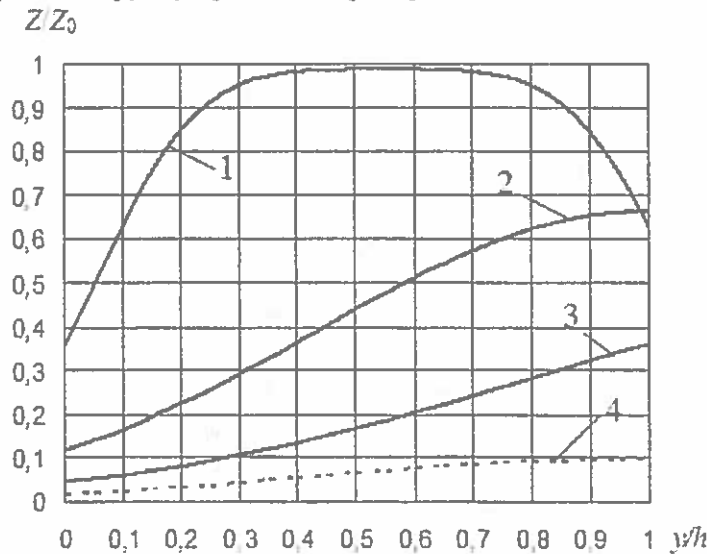
$G = \gamma h / u_1$  – критерій втрат рідини через зіткнення зі стінками каналу і при випаровуванні.

Використовуючи ці змінні, приведемо формулу (9) до вигляду

$$\bar{Z}(\bar{x}, \bar{y}) = 0,5 \exp(-G\bar{x}) \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{1 + \sqrt{V\bar{x} - \bar{y}}}{2\sqrt{\bar{x}/Pe}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{\sqrt{V\bar{x} - \bar{y}}}{2\sqrt{\bar{x}/Pe}} \right) \right]. \quad (10)$$

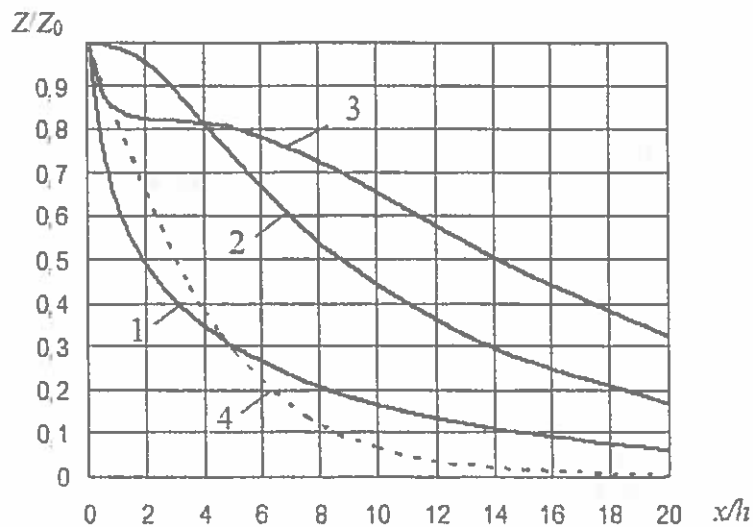
Формула (10) зручна для розрахунків, оскільки дає змогу узагальнити отримані при моделюванні результати і, перебуваючи в діапазоні значень незалежних змінних  $1 \leq \bar{y} \leq 1$  і  $0 < \bar{x} < \infty$ , отримувати значення функції у вузькій межі  $0 < \bar{Z} \leq 1$ , використовуючи при цьому всього три критерії подібності:  $Pe$ ,  $G$  і  $V$ .

На рис.2 представлені результати моделювання розподілу концентрації рідкої фази по висоті каналу від покрівлі до ґрунту при таких критеріях подібності:  $Pe = 100$ ;  $G = 0,01$ ;  $V = 0,02$ .



**Рис. 2.** Розподіл концентрації рідкої фази по висоті каналу поблизу місця подачі диспергованої води (1 –  $x = h$ ) і на відстанях (2 –  $x = 10h$ , 3 –  $x = 20h$ ) до зони горіння і в зоні горіння на відстані (4 –  $x > 20h$ )

На рис.3 представлені результати моделювання розподілу концентрації рідкої фази вздовж каналу при тих же подібних критеріях.



**Рис. 3.** Розподіл концентрації рідкої фази вздовж каналу під його дахом (1), посередині (2) і у ґрунті (3) до зони горіння і в зоні горіння посередині каналу (4 – штрихова лінія)

Результати моделювання показують, що для аерозолів (диспергованої води) один і той же закон розподілу як по висоті, так і вздовж каналу поза зоною горіння. Деякий провал кри-

вої 3 на рис. 3 поблизу місця подачі диспергованої води пояснюється перевагою кінетичної енергії повітря над силами тяжіння крапель рідини. Тут профіль концентрації рідкої фази по висоті каналу майже симетричний відносно центра (рис. 2, крива 1), де знаходиться максимум. У зоні горіння через випаровування крапель різко знижується їх вміст у потоці повітря.

**Висновок.** Отримані кількісні результати теорії у вигляді аналітичних рішень не суперечать загальним уявленням про поведінку рідкої фази в полі сили тяжіння і можуть бути використані при прогнозі дальності подачі вогнегасної концентрації води на осередок пожежі в каналах великої протяжності.

#### Список літератури:

1. Филиппов В. Д. Математическая модель тушения пожаров жидкостными аэрозолями в жилых помещениях / В.Д. Филиппов, С.И. Пучков // Средства противопожарной защиты: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1993. – С. 61–72.
2. Теплофизические проблемы противопожарной защиты конструкций распыленной водой / Лебедев А.А., Пучков С.И., Надточий О.В., Кошмаров Ю.А. // Обзор информ. – М.: ВНИИПО, 1991. – 90 с.
3. Пучков С.И. Способ тушения пожара в кабельном туннеле / С. И. Пучков, А. А. Лебедев // Средства противопожарной защиты: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1993. – С. 49–61.
4. Ball J., Pietrzak L. Investigation to improve the Effectiveness of Water in the suppression of compartment Fires // Fire Research. – 1978. Vol 1., № 4 – 5. P. 291 – 300.
5. Ющенко Ю.Н. Параметры локализации подземных пожаров // Ю.Н. Ющенко, А.Ю. Коляда // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2010. – С. 89–95.
6. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1970. – 904 с.
7. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей / Е. П. Медников. – М.: Наука, 1980. – 176 с.

*Ковальшин В.В.*

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА ДИСПЕРГИРОВАННОЙ ВОДЫ К ОЧАГУ ПОЖАРА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КАНАЛАХ БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖНОСТИ

Изложены теоретические основы переноса диспергированной воды, как аэрозоля, в протяжённых каналах с учётом действия силы тяжести и потерь капель жидкости на стенках канала. Получены аналитические зависимости скорости осаждения капель жидкости и концентрации жидкой фазы в потоке воздуха по длине и высоте канала, что позволяет делать научно обоснованный прогноз доставки к очагу пожара необходимого количества диспергированной воды для его эффективного тушения.

**Ключевые слова:** канал, пожар, тушение, диспергированная вода, огнегасящая концентрация

**MATHEMATICAL MODEL OF DISPERSIVE WATER TURBULENT TRANSFER  
TO THE CENTER OF CONFLAGRATION IN PROCESS CHANNELS  
OF GREAT LENGTH**

The theoretical basis of transfer of dispersive water as a spray in process channels taking into account the effect of power of attraction and water drops loss on the channel walls is stated. Analytical dependence of liquid drops precipitation speed and concentration of liquid phase in the air flow along the channel length and width is obtained, which allows making scientifically grounded prediction of required amount of dispersive water supply to the center of conflagration and effective extinguishing.

*Key words:* channel, fire, firefighting, dispersive water, extinguishing concentration.

