УДК 533.6.011.6:614.628

А.Г. Виноградов, канд. фіз.-мат. наук
Академія пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля, м. Черкаси

ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ FLOW VISION ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДЯНИХ ЗАВІС

Выполнены расчеты температурного поля конвективного воздушного потока в зоне пожара при его экранировании водяной завесой. Применение двух методов расчета (математическое моделирование и программный комплекс FlowVision) позволило выполнить сравнение полученных результатов и сделать выводы об их взаимном соответствии.

Calculations of a temperature field of a convective air stream in a fire zone are executed at its shielding by a aquatic curtain. Application of two methods of calculation (mathematical modeling and program complex FlowVision) has allowed to execute comparison of the received results and to draw conclusions on their mutual conformity

Вступ

Екранування теплових потоків за допомогою розпилених струменів води (водяних завіс) широко застосовується у практиці пожежної охорони. Раніше проведені теоретичні дослідження дозволили отримати низку математичних співвідношень для обчислення важливих параметрів процесу екранування конвективного теплового потоку [1–4]. Проте застосована при виведенні цих співвідношень математична модель є доволі спрощеною і не враховує окремі чинники, що діють у зоні пожежі в реальних умовах. Зокрема, не врахований вплив потоку рухомих крапель води на рух повітряних мас внаслідок їх в'язкої взаємодії. А це, в свою чергу, впливає на траєкторії крапель, на геометричні параметри водяної завіси, на швидкість крапель відносно повітря і, відповідно, на параметри процесу їх теплообміну. Найкращим методом визначення величини допущеної помилки є порівняння результатів теоретичних обчислень з даними експериментальних досліджень. На жаль, експериментальна перевірка теоретичної моделі на даний час є неможливою внаслідок відсутності відповідного лабораторного обладнання. Не вдалося також знайти інформацію про результати подібних експериментів у друкованих виданнях. Тому було прийняте рішення виконати порівняльний аналіз результатів теоретичних розрахунків даної моделі з результатами комп'ютерного моделювання за допомогою програмного комплексу FlowVision. Цей програмний комплекс дозволяє найбільш повним чином врахувати різноманітні чинники, що впливають на процеси руху і взаємодії водяних крапель та повітряних мас. Змінюючи параметри цих процесів та порівнюючи отримані результати з аналогічними результатами теоретичної моделі, можна зробити висновки щодо відносного впливу параметрів та щодо ступеня адекватності теоретичної моделі.

Постановка завдання

В роботі поставлено задачу виконати дослідження процесу екранування конвективного теплового потоку, зумовленого рухом повітряних мас, використовуючи 2 методи:

1) математичне моделювання за методикою, представленою в роботах [1–4];
2) комп'ютерне моделювання за допомогою програмного комплексу FlowVision. Отримані результати необхідно порівняти й зробити висновок щодо можливості використання отриманих в [1–4] математичних співвідношень для практичних розрахунків.

Математичне моделювання

Розглянемо процес теплообміну нагрітого до температури T_1 повітряного потоку і спрямованого перпендикулярно до нього потоку холодних дрібних крапель води (водяна завіса) з початковою температурою T_0 (рис. 1). Швидкості повітря і крапель позначимо, відповідно, $\upsilon_п$ і $\upsilon_к$. Початкова швидкість крапель дорівнює υ_0.

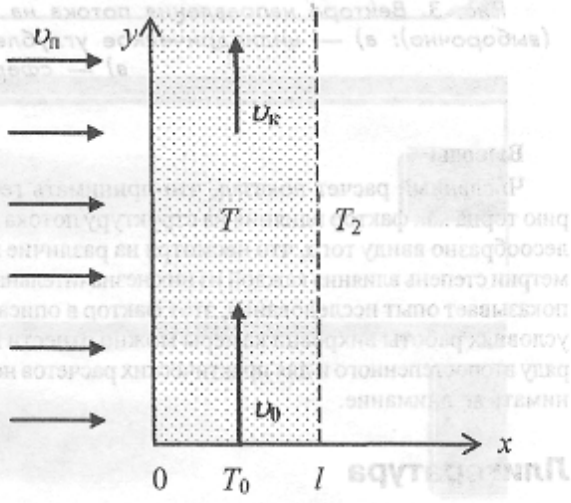

Рис. 1. Схема водяної завіси.

Екранування водяною завісою конвективного теплового потоку, що переноситься повітрям, здійснюється внаслідок конвективного теплообміну нагрітого повітря з рухомими краплями води у завісі, в результаті якого вода нагрівається, поглинає і виносить теплову енергію в напрямку її руху, а повітря охолоджується.

Математична модель, яку представлено в роботах [1–4], дозволила отримати вираз для температурного поля повітря у процесі його проходження через водяну завісу:

$$T = T_0 + (T_1 - T_0)\cdot e^{-\frac{x}{\delta_x \cdot e^{\frac{y}{\delta_y}}}}, \quad (1)$$

де x — координата в напрямку руху повітря, y — координата вздовж напрямку руху крапель (рис. 1). В (1) використані позначення:

$$\delta_x = \frac{c_n \rho_n \upsilon_n}{\pi d^2 n \alpha}, \quad (2)$$

$$\delta_y = \frac{c_в \rho_в \upsilon_к d}{6\alpha}, \quad (3)$$

де $c_в = 4{,}2 \cdot 10^3$ *Дж/(кг · К)* — питома теплоємність води, $c_п = 10^3$ *Дж/(кг · К)* — питома теплоємність повітря, $\rho_в = 10^3$ *кг/м*^{3} — густина води, $\rho_п = 0{,}7$ *кг/м*^{3} — густина повітря, d — діаметр крапель, n — їх концентрація.

Коефіцієнт тепловіддачі α визначимо через число Нуссельта Nu. Згідно з літературними даними, для випадку вимушеної конвекції при обтіканні газом тіла сферичної форми критеріальне рівняння має вигляд [5]:

$$\mathrm{Nu} = 2 + 0{,}6 \cdot \mathrm{Re}^{\frac{1}{2}} \cdot \mathrm{Pr}^{\frac{1}{3}}, \quad (4)$$

Число Прандтля Pr для повітря при атмосферному тиску від температури майже не залежить і лежить у межах 0,67 – 0,72 [5]. Візьмемо наближене значення $\mathrm{Pr} \approx 0{,}7$ та підставимо вирази для інших чисел в (4). Звідси знайдемо

$$\alpha = \left[2 + 0{,}53 \cdot \left(\frac{\upsilon_к \cdot d}{\nu}\right)^{\frac{1}{2}}\right] \cdot \frac{\lambda}{d}, \quad (5)$$

де λ — коефіцієнт теплопровідності повітря, ν — кінематична в'язкість повітря.

Концентрацію крапель n можна розрахувати, якщо відомі масові витрати води M, діаметр та швидкість руху крапель, а також площа перерізу завіси $S = l \cdot h$ (l — товщина завіси (рис. 1), h — її висота):

$$n = \frac{6 \cdot M}{\pi \cdot \rho_в \cdot d^3 \cdot l \cdot h \cdot \upsilon_к}. \quad (6)$$

Оскільки швидкість крапель суттєво залежить від просторових координат внаслідок їх гальмування повітряним середовищем, це необхідно врахувати під час обчислень. Для виконання поставленої в роботі задачі достатньо розглянути даний процес у плоскій геометрії, не враховуючи дію гравітаційних сил. В цьому випадку не відбудеться викривлення траєкторій крапель у вертикальній площині, а тому вони залежатимуть лише від зазначених вище координат x та y.

Для визначення залежності швидкості крапель $\upsilon_к$ від координати y використаємо наближення сталого аеродинамічного коефіцієнта (див., наприклад, [6]). За відсутності гравітації рівняння руху краплі масою m:

$$m \cdot \frac{d\upsilon_к}{dt} = -R,$$

де сила опору повітря

$$R = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \rho_п \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \upsilon_к^2.$$

Аеродинамічний коефіцієнт для кулі $C = 0{,}5$.

Після розв'язання рівняння руху, перейшовши від залежності від часу до залежності від координати, знайдемо для поточної швидкості краплі з координатою y:

$$\upsilon_к = \upsilon_0 \cdot e^{-\frac{3}{8}\frac{\rho_п}{\rho_в d} y}. \quad (7)$$

Використовуючи представлені вище формули, було виконано чисельні розрахунки за допомогою пакету MathCAD для таких початкових умов теплового екранування:

$T_1 = 200°\mathrm{C}$; $T_0 = 20°\mathrm{C}$; $\upsilon_п = 1$ м/с; $\upsilon_0 = 20$ *м/с*.

Інші параметри (d, M) змінювалися з метою відстеження їх впливу на характеристики процесу екранування. Крім того, розрахунки виконувалися для різних значень координати y (відстань від джерела водяної завіси — розпилювального насадку на пожежний ствол) з метою визначення відповідної залежності.

Було виконано серії обчислень для значень даних величин (табл. 1).

Таблиця 1

M, кг/с	0,1	0,5	1
d, мм	0,5	1	1,5
y, м	0,5	2	4

Графіки відповідних розподілів температур вздовж осі x, які розраховано в MathCAD, представлено на рис. 2–4. Значення температури повітря T_2 (рис. 1) після його проходження через водяну завісу, яке, у порівнянні з початковою температурою повітря T_1, характеризує ефективність теплового екранування, вказане в табл. 2.

Моделювання у FlowVision

Виходячи з умови, що розглядається 2-вимірна задача, розрахункову область для FlowVision було визначено у вигляді плоского горизонтально розташованого паралелепіпеда розмірами 10×10×0,1 *м*^{3}. На фронтальній вертикальній грані паралелепіпеда розміром 10×0,1 *м*^{2} розташований отвір прямокутної форми розмірами 0,4×0,1 *м*^{2} для вводу потоку крапель. Вектор початкової швидкості крапель спрямовано під кутом 90° до площини отвору. Ліву грань паралелепіпеда розміром 10×0,1 *м*^{2} призначено для вводу гарячого повітря, права грань — для його виводу. Розрахункову сітку, що містить близько 2,5 тис. комірок, було створено з локальним подрібненням у зоні завіси, особливо дрібним у зоні отвору для вводу крапель.

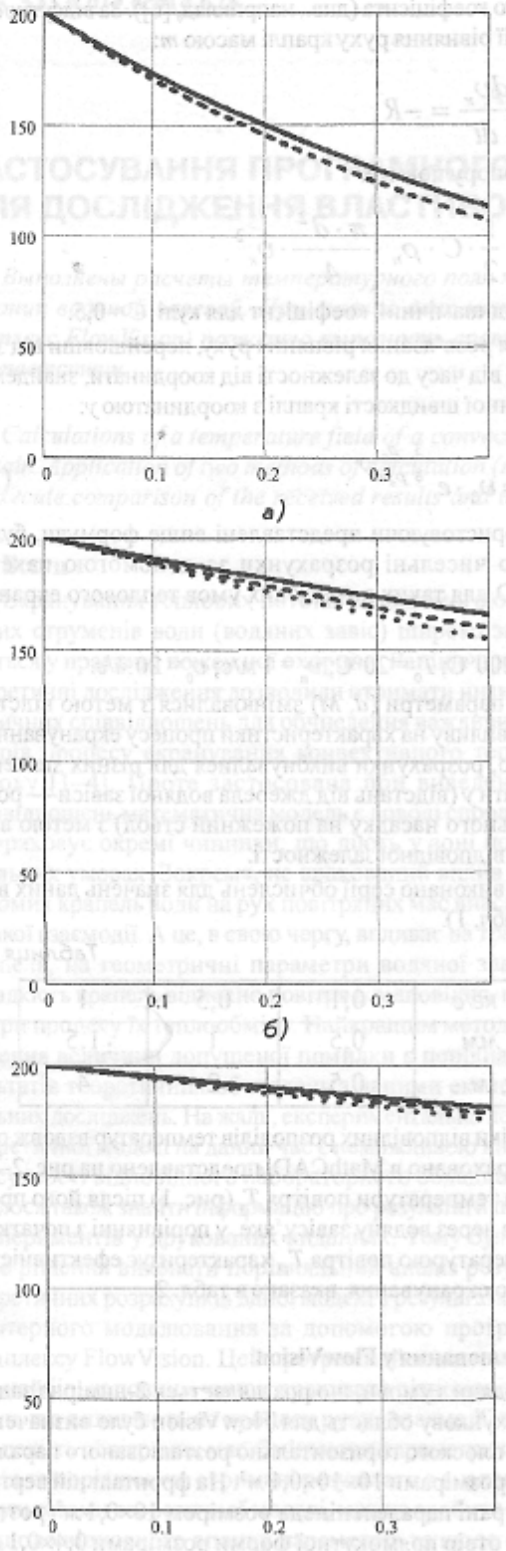

Рис. 2. Розподіли температури повітря всередині завіси для M = 0,1 кг/с:
а) d = 0,5 мм; б) d = 1 мм; в) d = 1,5 мм.
Суцільна лінія — y = 0,5 м, пунктир — y = 2 м, крапки — y = 4 м.

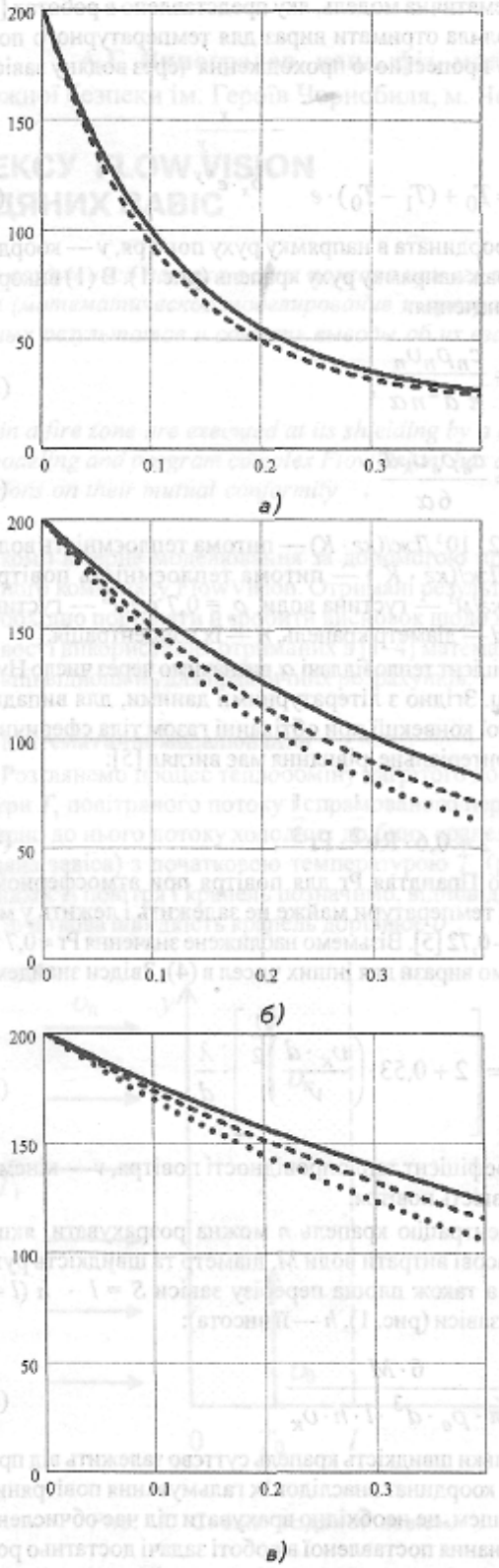

Рис. 3. Розподіли температури повітря всередині завіси для M = 0,5 кг/с:
а) d = 0,5 мм; б) d = 1 мм; в) d = 1,5 мм.
Суцільна лінія — y = 0,5 м, пунктир — y = 2 м, крапки — y = 4 м.

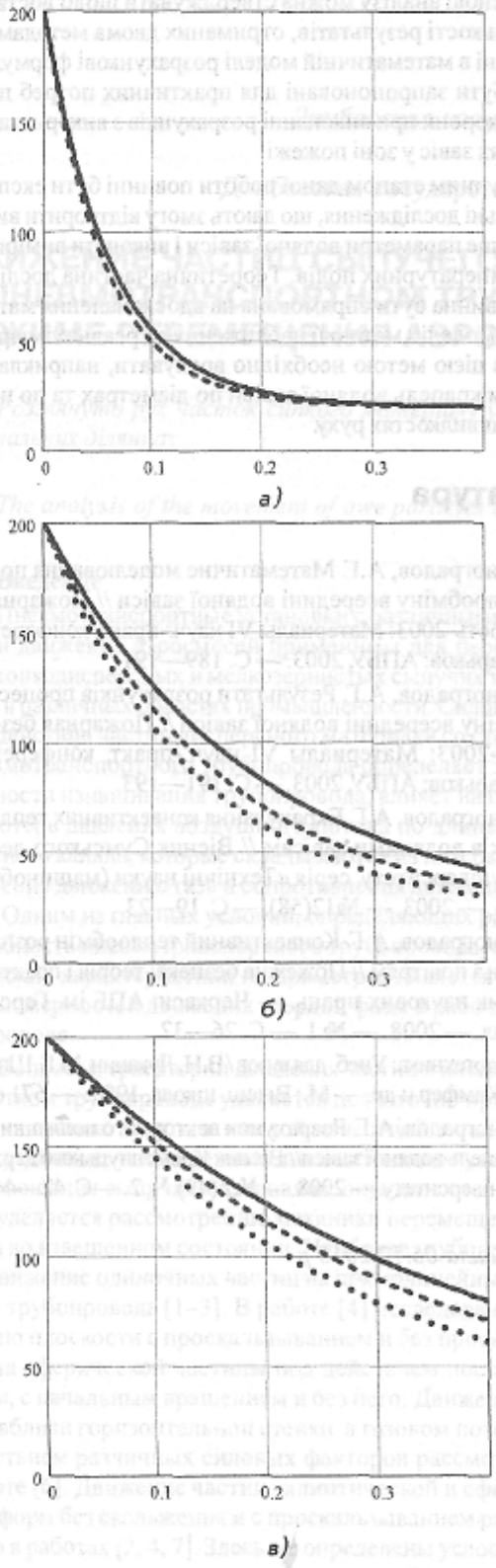

Рис. 4. Розподіли температури повітря всередині завіси для M = 1 кг/с:
а) d = 0,5 мм; б) d = 1 мм; в) d = 1,5 мм.
Суцільна лінія — y = 0,5 м, пунктир — y = 2 м, крапки — y = 4 м.

Граничні умови для потоку крапель та для повітря задавалися відповідно до визначених вище для математичного моделювання. Для кожного набору параметрів водяної завіси, представлених на рис. 2–4, було виконано відповідний розрахунок методом комп'ютерного моделювання в середовищі FlowVision. Приклади розрахунків показано на рис. 5 і 6.

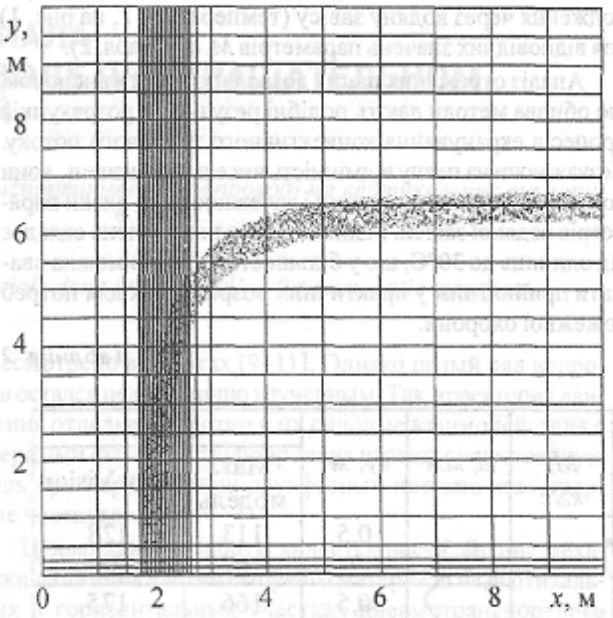

Рис. 5. Розрахункова сітка і траєкторії крапель для M = 1 кг/с; d = 1 мм (вид зверху). Розрахунок у FlowVision.

Рис. 6. Розподіл температури при y = 4 м, M = 1 кг/с; d = 1 мм (розрахунок у FlowVision).

На рис. 5 — розрахункова сітка і результат розрахунку траєкторій крапель водяної завіси для параметрів: $M = 1$ *кг/с*; $d = 1$ *мм* (вид зверху).

На рис. 6 — результат розрахунку температурного поля у розрахунковій області для зазначених параметрів при $y = 4$ м. При порівнянні графіків на рис. 4 і рис. 6 необхідно врахувати суттєво різний масштаб уздовж осі x, а також різне розташування завіси відносно початку координат.

Для порівняння результатів, отриманих методами математичного і комп'ютерного моделювання, було складено таблицю значень температури повітря після його проходження через водяну завісу (температура T_2 на рис. 1) для відповідних значень параметрів M, d, y (табл. 2).

Аналіз отриманих даних дозволяє зробити висновок, що обидва методи дають подібні результати розрахунків процесів екранування конвективного теплового потоку. Незважаючи на певну відмінність чисельних значень, вони показують подібні тенденції і залежності від низки параметрів водяної завіси. Різниця чисельних значень складає від одиниць до 30°С, що у більшості випадків можна вважати прийнятним у практичних розрахунках для потреб пожежної охорони.

Таблиця 2

M, кг/с	d, мм	y, м	T_2, °С	
			Мат. модель	FlowVision
0,1	0,5	0,5	113	128
		2	107	86
	1	0,5	166	175
		2	159	167
		4	154	155
	1,5	0,5	181	186
		2	178	183
		4	175	180
0,5	0,5	0,5	27	34
		2	25	34
	1	0,5	82	111
		2	70	89
		4	62	65
	1,5	0,5	123	143
		2	115	134
		4	105	124
1	0,5	0,5	20,2	23
		2	20,1	27
	1	0,5	42	53
		2	34	44
		4	30	33
	1,5	0,5	79	106
		2	70	90
		4	60	78

Висновки

На основі аналізу можна стверджувати щодо достатньої близькості результатів, отриманих двома методами. Розроблені в математичній моделі розрахункові формули можуть бути запропоновані для практичних потреб пожежної охорони при виконанні розрахунків з використання водяних завіс у зоні пожежі.

Наступним етапом даної роботи повинні бути експериментальні дослідження, що дають змогу відтворити визначені вище параметри водяної завіси і виконати вимірювання температурних полів. Теоретична частина дослідження повинна бути спрямована на вдосконалення математичної моделі з метою її наближення до реальних параметрів. Із цією метою необхідно врахувати, наприклад, розподіли крапель водяної завіси по діаметрах та по початкових швидкостях руху.

Література

1. Виноградов, А.Г. Математичне моделювання процесів теплообміну всередині водяної завіси // Пожарная безопасность-2003: Материалы VI науч.-практ. конференции. — Харьков: АПБУ, 2003. — С. 189—191.

2. Виноградов, А.Г. Результати розрахунків процесів теплообміну всередині водяної завіси // Пожарная безопасность-2003: Материалы VI науч.-практ. конференции. — Харьков: АПБУ, 2003. — С. 191—193.

3. Виноградов, А.Г. Екранування конвективних теплових потоків водяними завісам // Вісник Сумського державного університету, серія «Технічні науки (машинобудування)». — 2003. — №12(58). — С. 19—23.

4. Виноградов, А.Г. Конвективний теплообмін розпиленої води з повітрям // Пожежна безпека: теорія і практика: Збірник наукових праць. — Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля. — 2008. — № 1. — С. 26—32.

5. Теплотехника: Учеб. для вузов / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др. — М.: Высш. школа, 1999. — 671 с.

6. Виноградов, А.Г. Розрахунок векторного поля швидкостей крапель водяної завіси// Вісник Кременчуцького держ. політех. університету. — 2008. — №2 (49). Ч. 2. — С. 42—44.

Надійшла 06.12.2010 р.