

УДК 533.6.011.6:614.628

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДЯНИХ ЗАВІС ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ FLOWVISION

Виноградов А.Г., к.ф.-м.н.

Академія пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля, м. Черкаси

Тел. (0619) 42-04-42

Анотація – у статті розглянуто питання моделювання водяних завіс, отримано результати з допомогою програмного комплексу FlowVision.

Ключові слова – тепловий потік, екранування, водяна завіса.

Постановка проблеми. Водяні завіси застосовуються у практиці пожежної охорони для екранування конвективних і променистих теплових потоків. У виконаних раніше роботах [1, 2] створена математична модель для аналізу процесу екранування конвективного теплового потоку в осередку пожежі. Проте закладені при створенні цієї моделі спрощення можуть призводити до виникнення суттєвих відхилень результатів розрахунків від реальних параметрів. 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 цих параметрів та щодо ступеня адекватності теоретичної моделі.

Метою роботи є дослідження процесу екранування конвективного теплового потоку, зумовленого рухом повітряних

мас, з використанням двох методів: математичного моделювання за методикою, представленою в роботах [1, 2]; комп'ютерного моделювання за допомогою програмного комплексу FlowVision. Отримані результати необхідно порівняти й зробити висновок щодо можливості використання отриманих в [1, 2] математичних співвідношень для практичних розрахунків.

Аналіз останніх досліджень. 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, $v_{п}$ і $v_{к}$. Початкова швидкість крапель дорівнює v_0 .

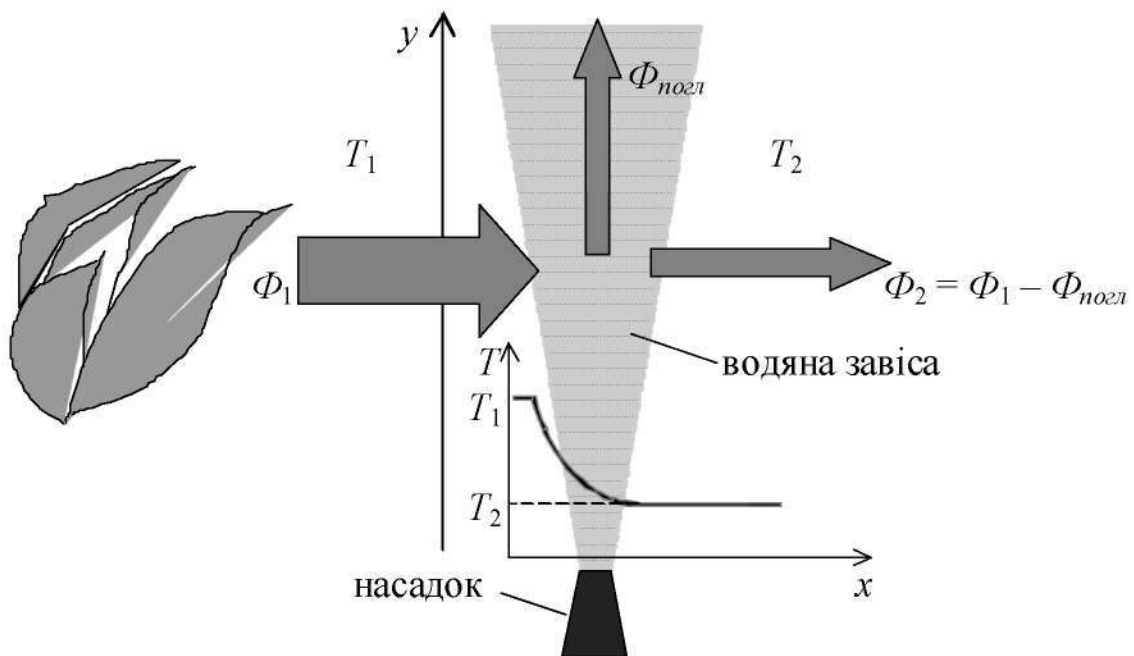


Рис. 1. Схема водяної завіси

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, представлена в роботах [1, 2], дозволила отримати вираз для температурного поля повітря у процесі його проходження через водяну завісу:

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

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

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

$$\delta_y = \frac{c_w \rho_w v_k d}{6 \alpha}, \quad (3)$$

де c_w – питома теплоємність води, c_n – питома теплоємність повітря, ρ_w – густина води, ρ_n – 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 [3]:

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

Число Прандтля Pr для повітря при атмосферному тиску від температури майже не залежить і лежить у межах 0,67 – 0,72 [3]. Візьмемо наближене значення $Pr \approx 0,7$ та підставимо вирази для інших чисел в (4). Звідси знайдемо:

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

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, h – її висота):

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

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 буде викривлення траєкторій крапель у вертикальній площині, а

тому вони будуть залежати лише від зазначених вище координат x та y .

Для визначення залежності швидкості крапель v_k від координати y використаємо наближення сталого аеродинамічного коефіцієнта (див., наприклад, [4]). За відсутності гравітації рівняння руху краплі масою m :

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

де сила опору повітря:

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

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 :

$$v_k = v_0 \cdot e^{-\frac{3}{8} \frac{\rho_n}{\rho_a} \frac{y}{d}}. \quad (7)$$

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

$$T_1 = 200^\circ\text{C}; T_0 = 20^\circ\text{C}; v_{\text{п}} = 1 \text{ м/с}; v_0 = 20 \text{ м/с}.$$

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.

Були виконані серії обчислень для таких значень даних величин (табл. 1).

Таблиця 1

Сполучення значень параметрів моделі

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

В MathCAD були побудовані графіки розподілів температур вздовж осі x для всіх можливих комбінацій вказаних у табл. 1 параметрів. Приклад такого графіка наведений на рис. 2.

Найбільш важливим параметром, що характеризує ефективність екранування конвективного теплового потоку, є значення температури повітря T_2 після його проходження через водяну завісу (див. рис. 1). Його можна визначити за розрахованими графіками. Але значно зручніше величину T_2 можна розраховувати за формулою (1), якщо в ній задати $x = l$. Для розрахунків у даній роботі було прийнято $l = 0,4$ м. Результати розрахунків температури T_2 за даною методикою наведені в таблиці 2.

Моделювання у FlowVision. Розглядається 2-вимірний завісу, що

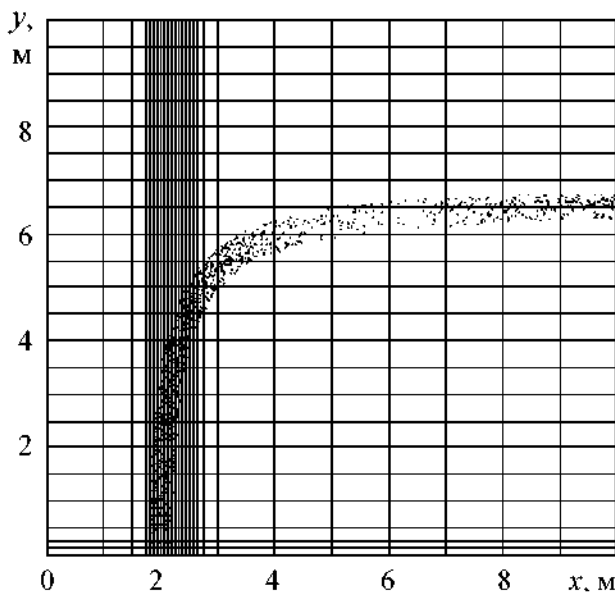


Рис. 3. Розрахункова сітка і траєкторії крапель для $M = 1$ кг/с; $d = 1$ мм.
Розрахунок у FlowVision.

права грань – для його виводу. Розрахункова сітка, що містить близько 2,5 тис. комірок, була створена з локальним подрібненням в зоні завіси, особливо дрібним в зоні отвору для вводу крапель.

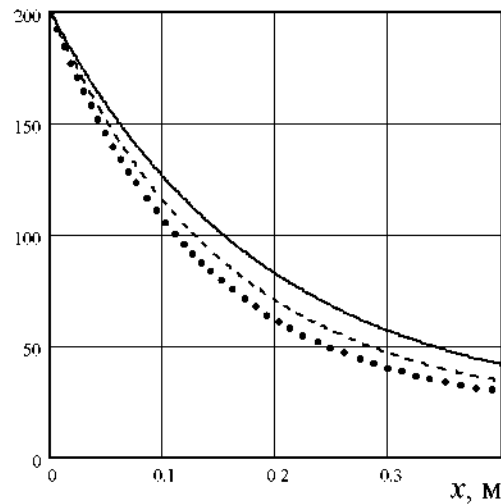
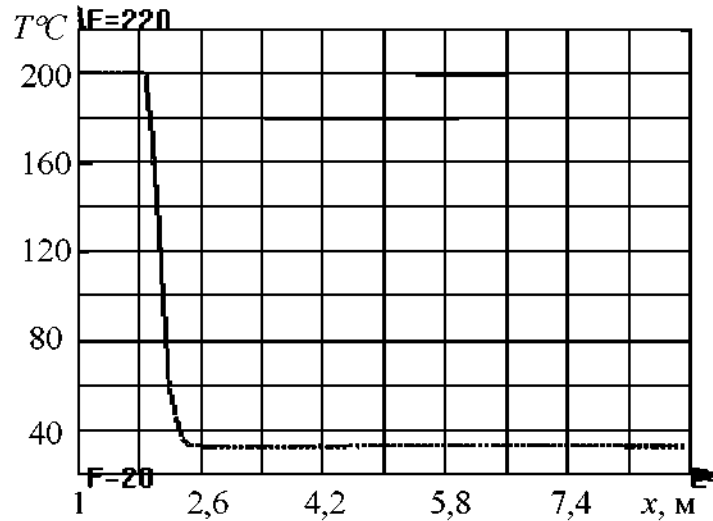


Рис. 2. Розподіли температури повітря всередині завіси для $M = 1$ кг/с; $d = 1$ мм.
Суцільна лінія – $y = 0,5$ м, пунктир – $y = 2$ м, крапки – $y = 4$ м.

Виходячи з умови, що розрахункова область для FlowVision була визначена у вигляді плоского горизонтально розташованого паралелепіпеда розмірами $10 \times 10 \times 0,1$ м³. На фронтальній вертикальній грані паралелепіпеда розміром $10 \times 0,1$ м² розташований отвір прямокутної форми розмірами $0,4 \times 0,1$ м² для вводу потоку крапель. Вектор початкової швидкості крапель спрямований під кутом 90° до площини отвору. Ліва грань паралелепіпеда розміром $10 \times 0,1$ м² призначена для вводу гарячого повітря,



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

Граничні умови для потоку крапель та для повітря задавалися відповідно до визначених вище для математичного моделювання. Для кожного набору параметрів водяної завіси, представлених в табл. 1, був виконаний відповідний розрахунок методом комп'ютерного моделювання в середовищі FlowVision. Приклади розрахунків представлені на рис. 3 і 4.

На рис. 3 – розрахункова сітка і результат розрахунку траєкторій крапель водяної завіси для параметрів: $M = 1$ кг/с; $d = 1$ мм (вид зверху).

На рис. 4 – результат розрахунку температурного поля в розрахунковій області для зазначених параметрів при $y = 4$ м.

Для порівняння результатів, отриманих методами математичного і комп'ютерного моделювання, була складена таблиця значень температури повітря після його проходження через водяну завісу (температура T_2 на рис. 1) для відповідних 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 результатів, вони показують подібні тенденції і залежності від ряду параметрів водяної завіси. Різниця чисельних значень складає від одиниць до 30°C , що в більшості випадків можна вважати прийнятним для практичних розрахунків для потреб пожежної охорони.

Таблиця 2
Порівняння результатів математичного моделювання
двома способами

M , кг/с	d , мм	y , м	T_2 , °C	
			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
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
	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. В роботі виконаний порівняльний аналіз процесу теплового екранування водяною завісою методами математичного моделювання та моделювання за допомогою програмного комплексу FlowVision. На його основі зроблений висновок щодо достатньої близькості результатів, отриманих двома методами. Розроблені в математичній моделі розрахункові формули можуть бути запропоновані для практичних потреб пожежної охорони при виконанні розрахунків щодо використання водяних завіс у зоні пожежі.

Наступним етапом даної роботи повинні бути теоретичні дослідження, спрямовані 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. Крім того, необхідно виконати експериментальні дослідження, що дають змогу відтворити визначені вище параметри водяної завіси і виконати вимірювання температурних полів.

Література

1. *Виноградов А.Г.* Екранування конвективних теплових потоків водяними завісами / *А.Г. Виноградов* // Вісник Сумського державного університету, серія „Технічні науки (машинобудування)”. – 2003. – №12(58). – С. 19–23.
2. *Виноградов А.Г.* Конвективний теплообмін розпиленої води з повітрям / *А.Г. Виноградов* // Пожежна безпека: теорія і практика: Збірник наукових праць. – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2008. – № 1. – С. 26–32.
3. *Луканин В.Н.* Теплотехника / *В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.* – М.: Высш. школа, 1999. – 671 с.
4. *Виноградов А.Г.* Розрахунок векторного поля швидкостей крапель водяної завіси / *А.Г. Виноградов* // Вісник Кременчуцького держ. політех. університету. – 2008. – №2 (49). – Ч. 2 – С. 42–44.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВОДЯНЫХ ЗАВЕС С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА FLOWVISION

Виноградов А.Г.

Аннотация – 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.

WATER-SCREEN BEHAVIOR RESEARCH BY MEANS OF THE FLOWVISION SOFTWARE

A. Vinogradov

Summary

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