**УДК 614.84:628.174**

**В. І. Лавінський, С. В. Ольшанський**

# ПРО КОРИГУВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНОЇ ПОДАЧІ СТРУМЕНЯ ЗА НАЯВНОСТІ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПОТОКУ ГАЗУ

*Побудовано математичну модель, що дозволяє коригувати вертикальне подавання вогнегасної рідини за наявності горизонтального конвективного потоку. Одержано аналітичні розв'язки нелінійної задачі Коші. Вивчено вплив швидкості конвективного потоку на кут коригування*

**Постановка проблеми.** У системах автоматичного пожежогасіння нерідко використовується вертикальне подавання розпиленого струменя, коли знешкоджувач вогню встановлюють над потенційним осередком горіння. За наявності горизонтального потоку газу відбувається викривлення траєкторії падіння крапель і вони падають на палаючу поверхню з відхиленням від вертикалі, тобто не під точкою вильоту. Такий стан зменшує ефективність використання вогнегасної рідини, але йому можна запобігти шляхом коригування кута подавання.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Серед публікацій, присвячених моделюванню польоту краплі, за наявності конвективних потоків, слід відзначити [1, 2, 3], де крапля вважається сферичним тілом, радіус якого убуває внаслідок випаровування частки, за лінійним законом у часі. Сила аеродинамічного опору середовища приймається пропорційною квадрату швидкості обтікання краплі газом. Останнє припущення ускладнює модель, але забезпечує відповідність теорії з експериментом. Тому вказані припущення збережемо і в даній роботі, але на відміну від публікацій [1, 3], враховуватимемо дію не тільки вертикального, але й бокового потоків газу. Швидкості потоків приймаємо сталими величинами. Наявність бокового потоку викривляє траєкторію вертикального падіння краплі. Вона стає плоскою кривою. Замість одного доводиться розв'язувати систему двох нелінійних диференціальних рівнянь.

**Математична постановка задачі.** Припустимо, що падіння краплі відбувається в умовах вертикального зустрічного (висхідного) та горизонтального (бокового) потоків газу, які мають сталі швидкості $V_3$ та $V_1$. Аеродинамічна сила пропорційна квадрату швидкості обтікання краплі газом. Відповідно до цих припущень рух частинки рідини описується системою двох зв'язаних нелінійних диференціальних рівнянь:

$$\ddot{z}_1 + \frac{k\dot{z}_1}{r_0\sqrt{1-\varepsilon t}}\sqrt{\dot{z}_1^2+\dot{x}_1^2} = g\,;\quad \ddot{x}_1 + \frac{k\dot{x}_1}{r_0\sqrt{1-\varepsilon t}}\sqrt{\dot{z}_1^2+\dot{x}_1^2} = 0\,. \tag{1}$$

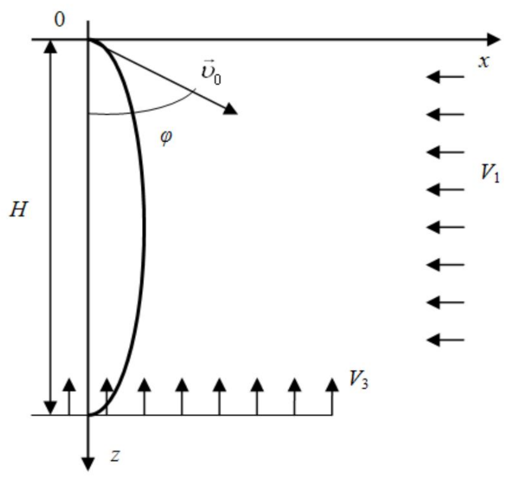


Рис. 1. Розрахункова схема

Тут $\dot{z}_1 = \dot{z}(t)+V_3$; $\dot{x}_1 = \dot{x}(t)+V_1$; $z(t)$, $x(t)$ – вертикальне та горизонтальне переміщення краплі.

Інтегрування системи (1) слід проводити при початкових умовах:

$$z_1(0)=x_1(0)=0\,;\ \dot{z}_1(0)=\upsilon_3+V_3\,;\ \dot{x}_1(0)=\upsilon_1+V_1\,, \tag{2}$$

де $\upsilon_3=\upsilon_0\cos\varphi$; $\upsilon_1=\upsilon_0\sin\varphi$; $\upsilon_0$ – початкова швидкість вилітання краплі із ЗВ; $\varphi$ – кут, який утворює вектор швидкості $\vec{\upsilon}_0$ з вертикальним напрямом (рис. 1).

**Пошук аналітичного розв'язку.** Використовуючи розв'язок задачі Коші треба знайти такий кут подавання рідини $\varphi = arctg\left(\upsilon_3\upsilon_1^{-1}\right)$, при $\upsilon_0=\left(\upsilon_1^2+\upsilon_3^2\right)^{1/2}=const$, щоб у момент падіння $t=t^*$ на горизонтальну палаючу поверхню $z=H$ горизонтальне зміщення краплі дорівнювало нулю. Іншими словами, потрібно знайти такі значення $\varphi$ і $t^*$, при яких виконуються рівняння:

$$z(t^*)=H\,,\ x(t^*)=0\,, \tag{3}$$

тобто траєкторія руху краплі проходить через точку (*0, H*).

Щоб одержати аналітичний вираз траєкторії руху, спростимо рівняння (1), де приймемо $g = 0$. Мала похибка такого спрощення підтверджена розрахунками раніше, а також у роботах [4, 5].

При $g = 0$ із рівнянь (1) випливає, що

$$\frac{\ddot{z}_1}{\ddot{x}_1} = \frac{\dot{z}_1}{\dot{x}_1} \Rightarrow \dot{x}_1 = \delta \cdot \dot{z}_1, \;\; \delta_1 = const \cdot$$

Стала $\delta_1 = \dfrac{\upsilon_1 + V_1}{\upsilon_3 + V_3} = \dfrac{\upsilon_0 \sin\varphi + V_1}{\upsilon_0 \cos\varphi + V_3}$ визначається початковими умовами (2).

Отже, горизонтальне переміщення частинки рідини пов’язується з її вертикальним переміщенням залежністю

$$x(t) = \delta_1 [z(t) + V_3 t] - V_1 t \,. \tag{4}$$

Визначення вертикального переміщення зводиться до інтегрування диференціального рівняння

$$\ddot{z}_1 + \frac{\beta_1}{\sqrt{1-\varepsilon t}} \dot{z}_1^2 = 0, \tag{5}$$

у якому $\beta_1 = \dfrac{k}{r_0}\sqrt{1+\delta_1^2}$.

Розв’язок рівняння (5), що задовольняє початковим умовам (2), має вигляд

$$z(t) = z_1(t) - V_3 t = \frac{1}{\beta_1}\left(\sqrt{1-\varepsilon t} - 1 + c \,\mathbf{ln}\, \frac{c - \sqrt{1-\varepsilon t}}{c-1}\right) - V_3 t \,. \tag{6}$$

Тут $c = 1 + \dfrac{\varepsilon}{2\beta_1 (V_3 + \upsilon_0 \cos\varphi)}$.

Підстановка виразів (4) і (6) у (3) утворює систему двох трансцендентних рівнянь, які розв’язуватимуться числовим методом на комп’ютері.

**Числові результати та їх аналіз.** Завдяки простим виразам (4), (6) легко будувати траєкторії руху краплі й підібрати таку, що проходить через точку (0, Н).

Результати такого підбору подано на рис. 2 і 3. Обчислення проведено за формулами (4), (6) при $r_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ м; $k = 10^{-5}$; $\varepsilon = 3$ с$^{-1}$; $\upsilon_0 = 100$ м/с; $V_1 = 20$ м/с; $V_3 = 10$ м/с.

Траєкторії на рис. 2 одержано при висоті падіння краплі $H = 3$м. Криві 1, 2, 3, 4 відповідають значенням $\varphi$ = 0°; 2°; 4°; 5,3°. Остання задовольняє вимозі задачі, тобто проходить через точку (0,3).

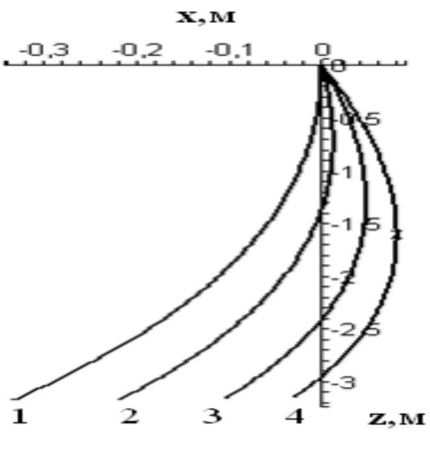


Рис. 2. Траєкторії краплі при $H$ = 3 м

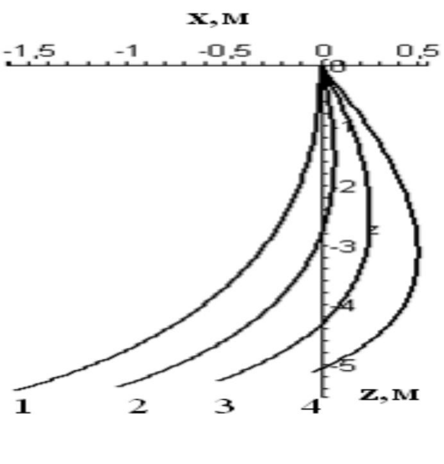


Рис. 3. Траєкторії краплі при $H$ = 5 м

Траєкторії на рис. 3 одержано при висоті падіння краплі $H = 5$ м. Криві 1, 2, 3, 4 відповідають значенням $\varphi$ = 0°; 5°; 10°; 14,8°. У четвертому випадку при падінні краплі на горизонтальну поверхню її зміщення від вертикалі близьке до нуля.

Як бачимо, кути скоригованого подавання рідини суттєво залежать від висоти встановлення знешкоджувача вогню над поверхнею потенційного горіння.

Модель дозволяє аналізувати цю залежність і від інших чинників, зокрема швидкості горизонтального потоку газу. Останнє відображено на рис. 4 і 5.

Траєкторії побудовано при $V_3$ = 5 м/с і попередніх значеннях інших параметрів. На рис. 4 показано ті, що одержано при $V_1$ = 10 м/с. Графікам 1, 2, 3 відповідають кути $\varphi$ = 0º; 2º; 5º. Умова коригування виконується при $\varphi$ = 5º. Для цього кута траєкторія проходить через точку (0,5). На рис. 5 нанесено траєкторії, одержані при $V_1$ = 30 м/с і $\varphi$ = 0º; 10º; 20º (криві 1, 2, 3 відповідно). Зростання швидкості бокового потоку газу збільшило кут коригування до 20º.

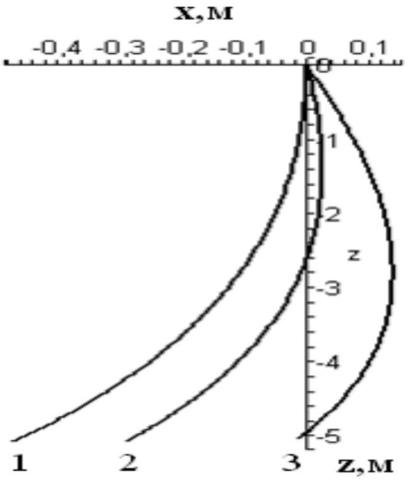


Рис. 4 . Траєкторії краплі при $V_1$ = 10 м/с

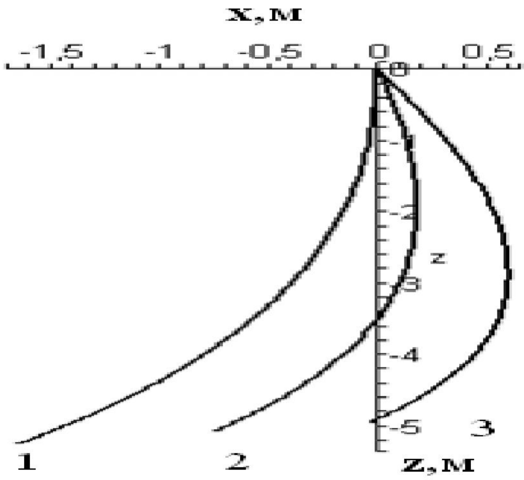


Рис. 5. Траєкторії краплі при $V_1$ = 30 м/с

## Висновки

Розглянута модель дозволяє покращити точність подач диспергованих вогнегасних речовин до осередку горіння за наявності додаткових потоків газу. Розрахунки до запропонованої моделі зводяться до розв'язання системи двох трансцендентних рівнянь.

## Список використаних джерел

1. Ольшанский В. П. Моделирование движения испаряющейся капли огнетушащего вещества с учетом встречного или попутного воздушного потока / В. П. Ольшанский, С. В. Ольшанский // Пожежна безпека: зб. наук. пр.– Львів : ЛІПБ, 2005. – Вип. 6. – С. 168 – 174.
2. Ольшанский В. П. О траектории движения испаряющейся капли огнетушащего вещества при наличии бокового и встречного потоков газа / В. П. Ольшанский, С. В. Ольшанский // Геометричне та комп'ютерне моделювання.– Х. : ХДУХТ, 2005. – Вип. 13. – С. 79 – 86.
3. Севриков В. В. Автономная автоматическая противопожарная защита промышленных сооружений / В. В. Севриков. – Киев – Донецк : Вища шк., 1979. – 188 с.
4. Севриков В. В. Автоматические быстродействующие системы пожарной защиты / В. В. Севриков, В. А. Карпенко, И. В. Севриков. – Севастополь : Сев. ГТУ, 1996. – 260 с.
5. Ольшанский В. П. О динамике испаряющейся капли жидкого огнетушащего вещества, диспергированного установкой пожаротушения / В. П. Ольшанский, В. И. Лавинский, С. В. Ольшанский // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. тр. – Х. : Фолио, 2005. – Вып. 17. – С. 138 – 147.

*Стаття надійшла до редакції 30.01.2008 р.*