

УДК 614.8

М. О. Консуров, С. А. Виноградов, к. т. н., доц.,
Національний університет цивільного захисту України

МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ІМПУЛЬСНОГО ВОДНОГО СТРУМЕНЯ ВИСОКОЇ ШВИДКОСТІ В ПОВІТРІ ТА ЙОГО ВЗАЄМОДІЇ З БУДІВЕЛЬНОЮ КОНСТРУКЦІЄЮ

У роботі представлено результати теоретичних досліджень з моделювання руху імпульсного водного струменя високої швидкості в повітрі та результати теоретичних досліджень з моделювання його взаємодії з будівельною конструкцією з метою обґрунтування можливості застосування таких струменів для гасіння пожеж з обмеженим повітрообміном.

Ключові слова: пожежогасіння, руйнування, імпульсний водний струмінь, моделювання, будівельна конструкція.

Постановка проблеми. Пожежі у закритих об'ємах вимагають введення сил та засобів таким чином, що виключає потрапляння нової порції повітря до приміщення. Для цього, як правило, застосовується спеціальні стволи-пробійники. Крім цього, з цією метою можуть бути використані високонапірні струмені, які пробивають огороження та подають в середину приміщення розпилену вогнегасну речовину.

Найбільшу питому енергією серед інших мають імпульсні водні струмені високої швидкості. Їх особливістю є те, що вони набувають максимальної швидкості на деякій відстані від пристрою [1]. Знаходження цієї відстані є принциповим завданням для раціонального використання енергії таких струменів.

Відповідно до цього, актуальним також стає питання взаємодії струменя з конструкцією, отвір в якій потрібно зробити для подавання води на гасіння пожежі без додаткового повітрообміну.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує два основних підходи до моделювання руху струменів в повітрі. У першому випадку одночасно розглядається рух усіх частин струменя. Другий підхід базується на вивченні руху окремої (довільної) краплі струменя. При цьому, як правило, не враховують вплив інших частинок на процес руху.

В [2] доведено, що математичні моделі, що базуються на другому підході, дають дуже хороше збігу результатів розрахунку з експериментом. Так, в [3] запропонована математична модель руху одиночної краплі рідини. У кінцевому рахунку, рішення зводиться у вигляді ряду

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \varphi_0 - \frac{g}{V_{k0}^2 \cos^2 \varphi_0} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{K^{n-2} x^n}{n}, \quad (1)$$

де x і y - координати краплі на відповідній осі; φ_0 - кут нахилу вісі струменя до обр'ї; V_0^2 - початкова швидкість витікання краплі, $K = \frac{3}{4} \frac{\rho_g c}{\rho_k d_k}$ - коефіцієнт опору; ρ_g і ρ_k - щільність повітря і краплі, відповідно; c - коефіцієнт аеродинамічного опору; d_k - діаметр краплі.

Гарне узгодження з експериментом показала модель, що враховує випаровування краплі в процесі польоту [2]

$$\ddot{x} + \frac{k\dot{x}}{\Theta} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = 0, \quad \ddot{y} + \frac{k\dot{y}}{\Theta} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = g, \quad (2)$$

де $x = x(t)$, $y = y(t)$ – координати краплі на траєкторії руху; k – зведений коефіцієнт аеродинамічного опору руху; Θ – закон випаровування краплі, g – прискорення вільного падіння, точка над символом – похідна за часом.

Існує два основних закони випаровування краплі в потоці газу: лінійний закон та закон Срезневського [2].

За лінійним законом випаровування зменшення радіуса краплі за рахунок випаровування пропорційне часу її польоту, а аеродинамічна сила, що діє на краплю, пропорційна швидкості обтікання краплі газом. Тобто виконується залежність [4]

$$r(t) = r_0 - \gamma t, \quad (3)$$

де $r(t)$ та r_0 – відповідно поточний і початковий радіуси краплі, яку вважають умовно сферичним тілом; γ – параметр, що характеризує швидкість випаровування; t – час польоту.

Використання закону Срезневського дозволяє отримати більшу точність розрахунку зміни розміру краплі [5, 6]:

$$r(t) = r_0 \sqrt{1 - \varepsilon t}, \quad (4)$$

де $r(t)$ та r_0 – відповідно поточний і початковий радіуси краплі, яку вважають умовно сферичним тілом; ε – коефіцієнт, що характеризує швидкість випаровування [7]; t – час польоту.

Але щодо струменів рідини надвисокої швидкості наведені залежності не можуть бути застосовані через інтенсивне руйнування струменя внаслідок взаємодії з повітрям [8].

Питання взаємодії водних струменів з конструкцією частково розкриті в роботах [1, 9-10].

Постановка задачі та її розв'язання. Характер витіканні струменя високої швидкості наступний. На початковій стадії швидкість витікання струменя зростає. Спочатку витікають більш повільні частинки, а потім більш швидкі, які наздоганяють повільні, що витекли раніше, стикаються з ними і прискорюють їх. Тому швидкість голови струменя у міру її поширення буде збільшуватися на початковій стадії закінчення. Збільшення швидкості голови струменя припиниться, коли найшвидші частки, що витекла з сопла, досягнуть голови струменя. Надалі, якщо б не було опору повітря, швидкість голови струменя залишалася б незмінною, рівній максимальній. Взаємодія струменя з повітрям призводить до зменшення швидкості голови струменя і розпилювання струменя.

Надзвуковий характер руху струменя обумовлює той факт, що перед нею в повітрі виникає ударна хвиля, що відійшла, в результаті чого тиск перед струменем різко зростає. На рис. 1 наведена тіньова фотографія голови струменя високої швидкості.

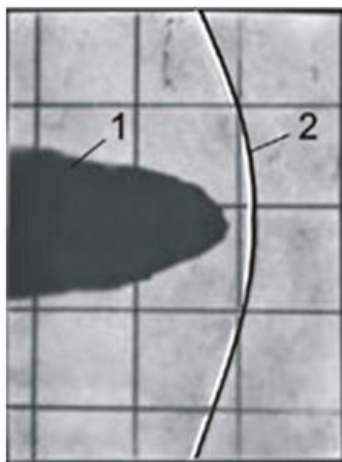


Рисунок 1 – Тіньова фотографія ультраструменя: 1 – голова струменя; 2 – ударна хвиля.

У свою чергу, підвищення тиску перед струменем за рахунок ударної хвилі призводить до розтікання струменя в сторони поблизу її голови. Поток повітря ця частина струменя, що виступає, зноситься в сторону і голова струменя набуває грибоподібної форми (рис. 2) [11]. Така форма струменя характерна і для струменів, що випущені зі ствола гідроприспою, частково заповненого водою, і для струменів з заповнених стволів.



Рисунок 2 – Візуалізація форми голови струменя.

Навколо струменя утворюється пелена бризок, у яку постійно виноситься вода з струменя. Прийнято говорити, що струмінь «обдирається» повітрям. А так як по довжині струменя на цій стадії швидкість зменшується від голови до хвоста, то в головну частину приходять більш повільні частинки води і швидкість голови струменя зменшується.

Через нестійкість струменя її головна частина має неправильну форму, як видно на рис. 3 при тіньовому фотографуванні струменя, випущеного з установки, повністю заповненою водою [11]. У голові струменя з'являються нерегулярні викиди в сторони, які сприяють більш швидкому руйнуванню струменя і перетворення його в високошвидкісну пелену бризок. Цей фактор зменшує далькобійність струменя, але сприяє утворенню високошвидкісного хмари крапель великого поперечного перерізу, що набагато перевищує діаметр сопла. Ця особливість струменя дозволило застосувати його для гасіння пожеж, зокрема, пожеж газових фонтанів [12].

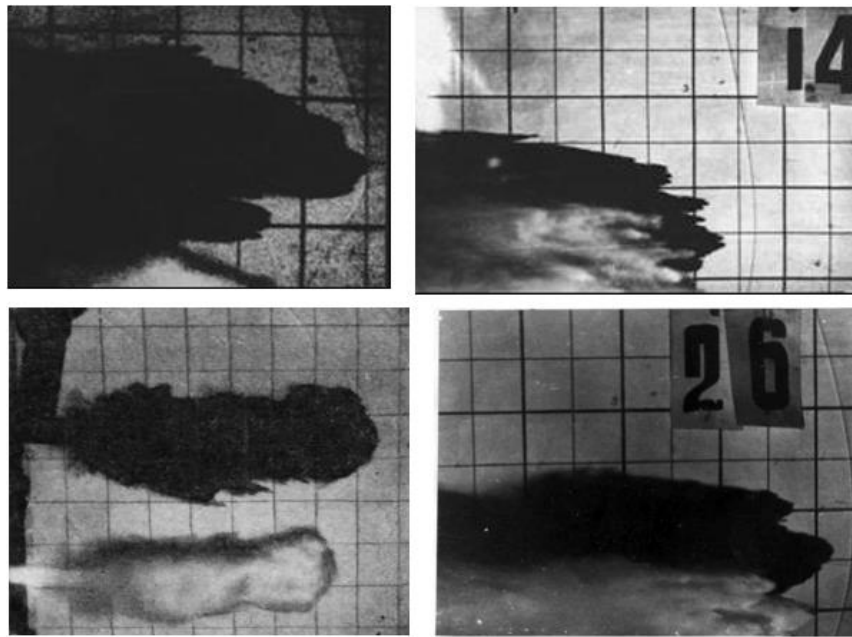


Рисунок 3 – Тіньові фотографії струменя імпульсного водомету.

На рис. 4 показано високошвидкісне фотографування струменя високої швидкості, що випущений з установки, повністю заповненої водою. Швидкість на виході з сопла зростає в початковому періоді, тому наступна порція води наздоганяє попередню і стикається з нею. Зіткнення різних ділянок струменя є причиною її радіального розширення і утворення пелени крапель і радіальних дисків.

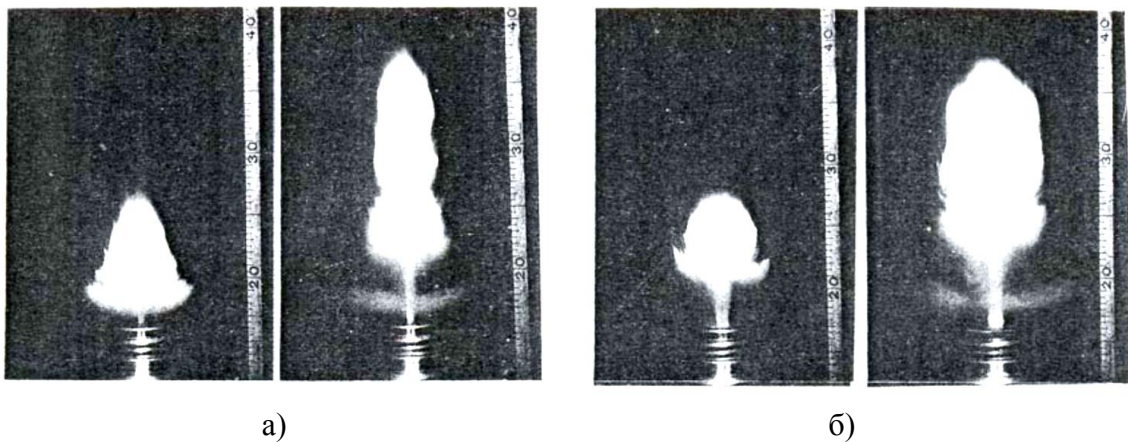


Рисунок 4 – Фотографія струменя високої швидкості: а – $d_s/d_c=1/16$; б - $d_s/d_c=1/4$.

Ураховуючи особливості розповсюдження водного струменя високої швидкості, математичним шляхом описати його складно. Потрібно вводити багато припущень, які будуть впливати на точність розрахунків. Тому рух струменя можна описати емпіричними залежностями, встановленими за результатами експериментальних досліджень.

Так, встановлено [13], що струмінь набуває грибоподібної форми, зображеної на рис. 4, на швидкості, яка залежить від радіуса сопла. Зокрема, при радіусі сопла $r_s=5$ мм, грибоподібна форма спостерігалась при досягненні струменем швидкості $u_s=300$ м/с. Для сопла з радіусом $r_s=5$ мм така форма струменя спостерігалась при швидкості $u_s=500$ м/с. Ураховуючи таку тенденцію, справедливо буде записати

$$u_s^{exp} = (0,5 \div 0,6)d_s. \quad (5)$$

Аналогічним шляхом на основі експериментальних досліджень, проведених Українським Ю.Д. [11] визначимо, що повний распад струменя відбувається на відстані, що дорівнює близько 150 калібрів від зрізу сопла:

$$L(u_s^{руїн}) = 150d_s. \quad (6)$$

Для руйнування будівельних конструкцій водним струменем високої швидкості визначальною є відстань, з якої відбувається руйнування. Ця відстань повинна відповідати найбільшій швидкості руху струменя. Адже імпульс сили струменя при взаємодії з матеріалом, що руйнується, тим більший, чим більша швидкість в точці контакту.

Експериментальним шляхом встановлено [1, 11, 13, 14], що струмінь пристроїв, дія яких базується на принципі імпульсного водомету (ІВ) (повне заповнення ствола водою) відрізняється від струменів пристроїв типу гідрогармати (ГГ) (часткове заповнення ствола водою). Для струменя ІВ характерне більше вирівнювання швидкості по довжині ствола, у порівнянні з струменем ГГ. Проте це впливає на саму швидкість: у ГГ швидкість струменя в 1,5-2 рази вище, ніж у ІВ. Емпірично відстані, при яких спостерігається максимальне значення швидкості при повному та частковому заповненні ствола гідропристрою, відповідно, можна описати залежностями:

$$L(u_{max}^{ІВ}) = (90 \div 110)d_s; \quad (7)$$

$$L(u_{max}^{ГГ}) = (20 \div 40)d_s. \quad (8)$$

Залежності (7) та (8) є узагальненою для усіх пристроїв з відповідними принципами роботи та можуть бути застосовані для оцінки відстані, з якої необхідно здійснювати руйнування. Для більш точних даних необхідно провести відповідні експериментальні дослідження.

Схематично процес взаємодії водяного струменя з будівельною конструкцією можна представити у спосіб, наведений на рис. 5.

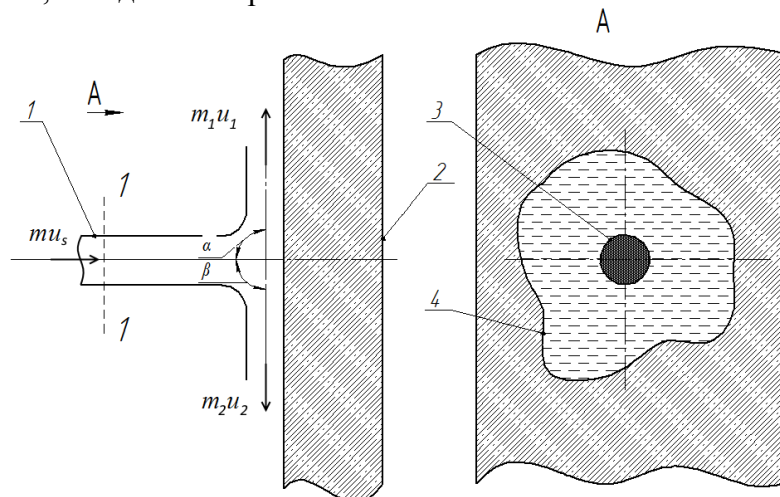


Рисунок 5 – Взаємодія водяного струменя з конструкцією: 1 – водяний струмінь; 2 – будівельна конструкція; 3 – зона впливу; 4 – зона розтікання.

Нехай в перетині 1-1 на рис. 5 струмінь має поперечний переріз $\frac{\pi d_{cmp}^2}{4}$, де d_{cmp} - діаметр струменя в точці контакту, та швидкість потоку u_{cmp} . Під час удару о конструкцію, струмінь руйнується та утворюється зона розтікання. Припустимо, що струмінь був розділений на два потоки (див. рис. 5).

Теорема кількості руху говорить, що [15]

$$d(mu) = Pdt. \quad (9)$$

Враховуючи це,

$$mu_s - (m_1u_1 \cos \alpha + m_2u_2 \cos \beta) = Pdt. \quad (10)$$

У випадку, коли $\alpha=\beta=90^\circ$, рівняння (10) можна записати

$$mu_s = Pdt. \quad (11)$$

Тоді тиск P , що чинить струмінь на конструкцію, можна визначити з рівняння

$$P = \rho Qu_{cmp}, \quad (12)$$

де ρ – щільність рідини, Q – витрата рідини.

Якщо відомий діаметр струменя d_{cmp} в точці контакту, то силу F , з якою струмінь діє на будівельну конструкцію, можна знайти з рівняння

$$F = \pi \rho u_{cmp}^2 \frac{d_{cmp}^2}{4}. \quad (13)$$

У випадку взаємодії струменя рідини високої швидкості з будівельною конструкцією, умовний діаметр зони розтікання більше за діаметр струменя в точці контакту в 3 та більше разів [1]. У такому випадку тиск, що чинить струмінь на конструкцію, може бути визначений за рівнянням Бернуллі [16]

$$P = \frac{\rho u_{cmp}^2}{2}. \quad (14)$$

Виходячи з цього, ефективність руйнування конструкції, в першу чергу, залежить від швидкості руху струменя u_{cmp} в точці контакту. Аналіз експериментальних досліджень різних авторів [1, 10, 13] показують, що ефективність силового тиску на конструкцію, що руйнується, підвищується з підвищенням швидкості струменя в точці контакту u_{cmp} . Відомо [17-18], що руйнування матеріалу, з якого виконана конструкція, відбувається за умови, що тиск струменя в точці контакту P перевищує межу міцності матеріалу на стискання у 10 разів: $P > 10\sigma_{mp}$.

Враховуючи наведене, для визначення швидкості u_{cmp} водного струменя струменя, необхідно використовувати рівність

$$u_{cmp} = \sqrt{\frac{10\sigma_m}{\rho}}. \quad (15)$$

Висновки. У роботі визначено, що математичні залежності, що застосовуються для моделювання руху низько- та середньонапірних пожежних струменів в повітрі, до імпульсних водних струменів високої швидкості не можуть бути застосовані. Такі струмені мають складний характер руху, який аналітично описати складно. Базуючись на експериментальних дослідженнях, показано, що відстань, на якій струмінь набуває максимальної швидкості, в першу чергу залежить

від діаметру сопла гідропристрою та може бути описана емпіричними залежностями. При чому для пристроїв, ствол яких повністю заповнений водою, ця відстань описується рівнянням (7), а для пристроїв з частково заповненим стволом – рівнянням (8).

Показано, що фективність руйнування конструкції, в першу чергу, залежить від швидкості руху струменя в точці контакту. Ця швидкість, в свою чергу, прямо пропорційна міцності матеріалу на стиск та обернено пропорційна щільності води та може бути визначена за допомогою рівняння (15).

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на експериментальну перевірку запропонованих залежностей для струменів різних параметрів та при руйнуванні різних будівельних конструкцій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Семко А.Н. Импульсные струи жидкости высокого давления / Семко Александр Николаевич. – Донецк: Вебер, 2007. – 149 с.
2. Балістика крапель розпилених рідин / [Ольшанський В.П., Ольшанський С.В., Ларін О.М., Фомін Є.М.] – Біла Церква: вид. Пшонківський, 2006. – 124 с.
3. Абрамов Ю.А. Моделирование процессов в пожарных стволах / Абрамов Ю.А., Росоха В.Е., Шаповалова Е.А. – Харьков: Фолио, 2001. – 195 с.
4. Ольшанский В.П. О динамике испаряющейся капли, как материальной точки переменной массы / Ольшанский В.П., Ольшанский С.В. // Механика и машиностроение. – 2005. - №1. – С. 6-12.
5. Грин Х. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы / Грин Х., Лейн В. – Ленинград: Химия, 1969. – 428 с.
6. Тарахно О.В. Фізико-хімічні основи використання води в пожежній справі / Тарахно О.В., Шаршанов А.Я. – Харків: АЦЗУ, 2004. – 252 с.
7. Былинкин В.В. Анализ процесса тушения твердых горючих материалов распыленной водой / Былинкин В.В., Шароварников А.Ф. // Пожаротушение на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1991. – С. 66-73.
8. Виноградов С.А. Модели движения распыленных высокоскоростных струй жидкости / С.А. Виноградов, И.Н. Грицына // Актуальные проблемы пожарной безопасности: междунар. научн.-практ. конф., 19-20 мая 2010 г: сб. тезисов. – М.: ВНИИПО, 2010. – с. 153-155.
9. Применение мобильного комплекса «Гюрза» для проведения операций повышенной сложности на объектах энергетики / [Алешков М.В., Безбородько М.Д., Емельянов Р.А., Плосконосов А.В.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация. – М.: Академия ГПС МЧС России. - 2012. - №2. – С. 4-9.
10. Cooley W. C. Rock breakage by pulsed high pressure water jets / Cooley W. C. // Proc. 1st International Symposium on Jet Cutting Technology.- Coventry (England), 1972. – Paper B7. - P. 101-112.
11. Украинский Ю.Д. Фотографическое исследование струи гидропушки / Ю. Д. Украинский // Изв. ВУЗов СССР, Энергетика. – 1978. – № 4. – С. 143 – 146.
12. Виноградов С.А. Підвищення ефективності гасіння газових фонтанів: дис. ... канд. техн. наук: 21.06.02 / Виноградов Станіслав Андрійович. – Х., 2012. – 168 с.
13. Украинский Ю.Д. Экспериментальные исследования ультраструй: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.05 / Украинский Юрий Дмитриевич. – К., 1978. – 16 с.
14. Glenn L. A. The mechanics of the impulsive water cannon // Computers and Fluids.- 1975.- V. 3.- P. 197 – 215.
15. Аркуша А.И. Руководство к решению задач по теоретической механике / Аркуша А.И. - М.: 2002. – 336 с.
16. Чугаев Р.Р. Гидравлика (Техническая механика жидкости). – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.
17. Шехтман Н.В. Опыт разрушения бетона и железобетона импульсными водометами на Днепрогэс-II / Н.В. Шехтман, С.Д. Криворотько, В.П. Николаев // Гидротехн. стр-во. – 1976. – № 5. – С. 18–21.
18. Петраков А.И. Разрушение горных пород импульсными струями воды / А.И. Петраков, О.Д. Криворотько // Уголь. – 1982. – № 3. – С. 12–15.