

## ТЕОРЕТИЧНІ РОЗРАХУНКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ВИЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ПОЛЬОТУ ГІДРАВЛІЧНОГО СТРУМЕНЯ

**Міщенко Ігор Вікторович**, канд. техн. наук, доцент кафедра ДМ і ТМ,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
e-mail: [ivmishch@gmail.com](mailto:ivmishch@gmail.com), ORCID : 0000-0003-3752-4986  
**Чернов Вячеслав Миколайович**, студент гр. А-43-22,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
e-mail: [a322cvm@stud.khadi.kharkov.ua](mailto:a322cvm@stud.khadi.kharkov.ua)

Гідравлічні струмені достатньо широко застосовуються у різних галузях, зокрема для подрібнення гірських порід, у гідромоніторах, при гасінні пожеж, забезпеченні техногенно-екологічної безпеки тощо.

У разі, коли суцільний водяний струмінь вилітає з насадки з деякою початковою швидкістю і рухається в повітряному просторі подібно до твердого тіла, кинутого під кутом до горизонту, його теоретична траєкторія буде параболою. Внаслідок дії на струмінь сили опору повітря дійсна траєкторія руху струменя відрізнятиметься від теоретичної. Теоретичні значення дальності польоту та висоти підйому струменя не просто відрізняються від реальних, а є значно завищеними. Вказана сила діє за дотичною до траєкторії в кожній точці і спрямована убік, протилежний до руху. Урахування цієї сили робиться введенням коефіцієнта опору повітря, який визначається експериментально. У роботі [1] детально розглянуто урахування сили опору повітря залежно від степеню, у який підноситься швидкість в рівнянні руху струменя.

Найпростіший спосіб розрахунку траєкторії гідравлічного струменя базується на інтегруванні рівнянь вільного руху матеріальної точки під дією сили ваги без урахування опору середовища. В цьому випадку, як відомо, траєкторією струменя є дуга параболи (рисунок 1).

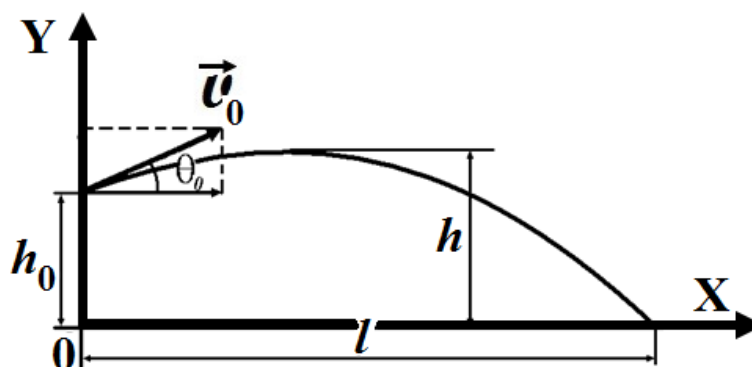


Рисунок 1

Вона описується рішенням задачі Коші для двох диференціальних рівнянь з відповідними початковими умовами, що приводить до виразу:

$$y = x \operatorname{tg} \theta_0 - \frac{x^2 g}{2v_0^2 (\cos \theta_0)^2} + h_0, \quad (1)$$

де  $x$  і  $y$  – поточні координати частини рідини на траєкторії;  $v_0$  – швидкість витікання струменя з насадки ствола;  $\theta_0$  – кут нахилу осі ствола до горизонту;  $h_0$  – початкова висота ствола відносно горизонтальної осі;  $g$  – прискорення вільного падіння. Для горизонтального струменя  $\theta_0 = 0$ , що дає:

$$y = \frac{x^2 g}{2v_0^2} + h_0. \quad (2)$$

В роботах [1,2] проведено коригування теоретичних розрахункових формул з урахуванням втрат напору за формулою Дарсі-Вейсбаха, що приводить до уведення коефіцієнту опору повітря, надано відповідні формули розрахунку. Точність визначення цього коефіцієнту через експериментальні дослідження вочевидь впливає на точність розрахунку дальності польоту струменя. Водночас, існує декілька параметрів, від яких залежить розрахунок вказаного коефіцієнта, що потребує ретельного аналізу впливу точності вимірювання кожного з них на точність остаточного результату.

Якщо струмінь вилітає паралельно поверхні Землі, рівняння її траєкторії з урахуванням втрат напору за формулою Дарсі-Вейсбаха в декартовій системі координат записується у вигляді [1,2] при спрямуванні вертикальної осі донизу:

$$y = \frac{x^2 g}{2v_0^2} \left( 1 + \frac{k_{\text{ОП}}}{d_{\text{Н}}} \cdot \frac{v_0^2}{2g} \right) + h_0, \quad (3)$$

де  $k_{\text{ОП}}$  – коефіцієнт опору повітря;  $d_{\text{Н}}$  – діаметр насадки.

Теоретичне значення  $L_{\text{max}}^{\text{теор}}$  дальності польоту струменя дає формула:

$$L_{\text{max}}^{\text{теор}} = v_0 \sqrt{\frac{2h_0}{g}}, \quad (4)$$

в якій швидкість  $v_0$  визначається за для кожного дослід з рівняння нерозривності потоку, звідки:

$$v_0 = \frac{4W}{\pi d_{\text{Н}}^2 t}, \quad (5)$$

де  $W$  – об’єм рідини;  $t$  – час проходження рідини для непрямого вимірювання швидкості  $v_0$ ;  $\omega$  – площа поперечного перерізу отвору насадки.

З порівняння формул (2) і (3) робимо висновок, що наявність коефіцієнту опору повітря  $k_{OP}$  впливає на величину дійсного значення  $L_{max}$ . Задачу визначення коефіцієнту опору повітря  $k_{OP}$ , наближеного до істинного в певних умовах, необхідно розв’язувати за допомогою експерименту, що складається з серії вимірювань дальності польоту гідравлічного струменя в реальних умовах. Шуканий коефіцієнт представляється у вигляді функції декількох змінних і визначається за формулою [3]:

$$k_{OP} = 4d_H \left( \frac{h_0}{L_{max}^2} - \frac{g}{2v_0^2} \right) = f(d_H, L_{max}, v_0, h_0, g), \quad (6)$$

З урахуванням виразу (5) остаточно розрахункову формулу для коефіцієнту  $k_{OP}$  запишемо у вигляді:

$$k_{OP} = 4d_H \left( \frac{h_0}{L_{max}^2} - \frac{g\pi^2 d_H^4 t^2}{32W^2} \right) = f(g, d_H, h_0, L_{max}, W, t). \quad (7)$$

Проте, як і при будь-якому експериментальному дослідженні, виникає проблема, що ніколи не втрачає своєї актуальності і важливості, – проблема точності і достовірності отриманих результатів. Неминучі похибки вимірювань (як систематичного, так і випадкового характеру) шуканих параметрів приводять у разі непрямих вимірювань до великих похибок. Для складних функціональних залежностей внесок похибок при вимірюванні окремих параметрів в загальну похибку є неочевидним і точніший її розрахунок вимагає залучення математичного апарату теорії похибок. При цьому слід розрізняти підхід до цієї проблеми при проведенні одноразових і багаторазових вимірювань.

Експериментальні дослідження проводилися на установці за деякого постійного напору  $H$  (рисунок 2, на якому цифрами позначені: 1 – бак з водою, 2 – вентиль, 3 – лічильник витрат води (витратомір), 4 – насадка, 5 – гідравлічний струмінь) [4,5]. Величина напору  $H$  може бути довільною, умовою є його постійність та спроможність утворити гідравлічний струмінь за допомогою насадки РС-50 з прохідним діаметром  $d_H = 13$  мм [6].

Для визначення похибок вимірювань проведено  $N=20$  дослідів, в ході яких в кожному досліді проводилися прямі вимірювання діаметру насадки  $d_H$ , дальності польоту струменя  $L_{max}$ , об’єму рідини  $W$ , що витікає за час  $t$ .

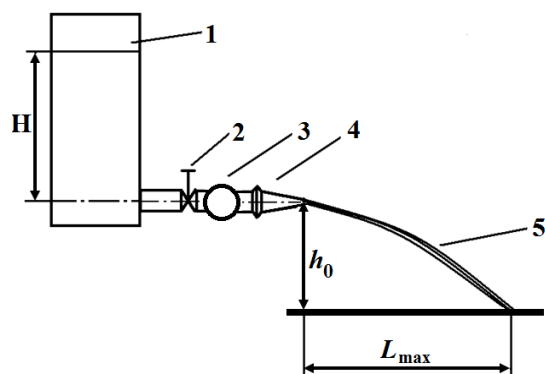


Рисунок 2 – Схема експериментальної установки

Зазначені параметри є випадковими, постійними приймаються:

- 1) відстань по вертикалі від осі насадки до горизонтальної поверхні  $h_0=30$  см;
- 2) прискорення вільного падіння константа  $g=9,80665$  м/с<sup>2</sup>;
- 3) константа  $\pi$ .

За результатами безпосередніх вимірювань вказаних параметрів були проведені розрахунки теоретичної дальності польоту гідравлічного струменя та коефіцієнту опору повітря. Вимірювання діаметру насадки, об'єму рідини, часу витікання рідини, довжини струменя має певний розкид через наявність об'єктивних і суб'єктивних чинників. Вважаємо, що усі вимірювання виконані одним і тим же методом з однаковою мірою ретельності, тобто виконана умова рівноточності вимірювань.

Отримані результати вимірювань містять систематичну і випадкову похибку. Перша з них в роботі не розглядається, оскільки може бути оцінена при аналізі:

- 1) засобів вимірювань, використовуваних при проведенні необхідних вимірювань,
- 2) методу вимірювання;
- 3) умов вимірювання щодо відповідності нормальним умовам;

Оцінка другої є складнішим завданням і вимагає залучення математичного апарату теорії похибок. У цій роботі ставиться задача оцінки випадкової складової похибки непрямих вимірювань, аналізу вказаної похибки при проведенні одноразових і багаторазових вимірювань, а також побудови довірчого інтервалу для оцінки коефіцієнту опору повітря при розрахунках гідравлічних струменів.

Для усіх дослідів для порівняння подається величина  $L_{max}^{теор}$ , теоретична довжина струменя без урахування опору повітря, яка визначається за формулою (3). Вона дає завищені значення (на рівні 10 % – 18 %) у порівнянні з  $L_{max}$ , що обґрунтовує врахування коефіцієнту опору повітря  $k_{оп}$  при розрахунках дальності польоту струменя.

В подальшому за результатами статистичної обробки експериментальних даних щодо дальності польоту струменя буде визначено вибіркові оцінки

математичного очікування, дисперсії чинників, значення яких використовують при розрахунку коефіцієнту опору повітря.

### Висновки

1. Проведено експериментальні дослідження вимірювання дальності польоту гідравлічного струменя при прямих вимірюваннях діаметра насадки, об'єму рідини, час її витікання та дальності польоту струменя, що дозволило визначити коефіцієнт опору повітря. Порівняння реальної дальності польоту гідравлічного струменя з теоретичною доводить необхідність врахування коефіцієнту опору повітря.

2. Отримані дані в подальшому дозволяють зробити статистичну обробку даних експериментальних досліджень, що дозволить визначити ті похибки вимірювань, які вносять найбільший внесок в кінцевий результат.

### Література

1. Розрахунок пожежних гідравлічних струменів: навч. посібник / С. А. Єременко, В. П. Ольшанський, В. М. Халипа, О. О. Дубовик. – К.: 2005. – [б.в.] – 128 с.

2. Вамболь С. О. Технічна механіка рідини і газу: підручник / С. О. Вамболь, І. В. Міщенко, О. М. Кондратенко. – Х. : НУЦЗУ, 2016. – 300 с.

3. Вамболь С. О. Дослідження гідравлічних струменів при створенні системи управління екологічною безпекою об'єктів підвищеного ризику : монографія / С. О. Вамболь, О. М. Кондратенко, І. В. Міщенко, В. Ю. Колосков. – Х.: ФОП Бровін О.В., 2018. – 204 с.

4. Міщенко І. В. Вплив точності визначення діаметру вихідного отвору пожежного ствола на геометричні характеристики траєкторії струменя / І. В. Міщенко, О. М. Кондратенко, О. А. Бурменко // Проблеми пожарной безопасности: Зб. наук. пр. НУЦЗ України. – 2015. – Вып. 38. – С. 123-129.

5. Міщенко І. В. Особливості експериментального визначення коефіцієнту опору повітря руху струменя води з ручного пожежного ствола / І. В. Міщенко, О. М. Кондратенко // Проблеми пожарной безопасности: Зб. наук. пр. НУЦЗ України. – 2016. – Вып. 39. – С. 183–189.

6. Вамболь С. О. Врахування зміни напору при визначенні впливу нормативної точності виготовлення пожежного ствола на дальність польоту струменя води / С. О. Вамболь, І. В. Міщенко, О. М. Кондратенко, О. В. Метельов // Проблеми пожарной безопасности: Зб. наук. пр. НУЦЗ України. – 2016. – Вып. 40. – С. 57–65.

7. Кондратенко О. М. Врахування зміни напору при визначенні впливу нормативної точності виготовлення пожежного ствола на висоту підйому струменя води при забезпеченні техногенно-екологічної безпеки / О. М. Кондратенко, І. В. Міщенко, Г. О. Чернобай // Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека». – 2017. – Вип. 1. – С. 27 – 34.

УДК 539.3:534.1

## АНАЛІЗ МІЦНОСТІ БАГАТОШАРОВОГО СКЛІННЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ПРИ ТЕПЛОВИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

**Сметанкіна Наталя Володимирівна**, докт. техн. наук, професор, завідувач, відділ вібраційних і термоміцнісних досліджень, Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України,  
e-mail: [nsmetankina@ukr.net](mailto:nsmetankina@ukr.net), ORCID: [0000-0001-9528-3741](https://orcid.org/0000-0001-9528-3741)

Характерною особливістю експлуатації спецтехніки є робота поблизу пожеж та вибухонебезпечних об'єктів, що може призвести до впливу значних силових та температурних навантажень [1, 2]. Особливо небезпечною є робота поруч із вибухонебезпечними об'єктами, оскільки під час вибуху на спецтехніку діють короткочасні навантаження великої інтенсивності [3]. Пожежні автомобілі призначені для доставки особового складу, гасіння пожеж та проведення рятувальних робіт. Як правило, пожежні автомобілі виробляються на базі шасі вантажівок. Однієї з найуразливіших частин техніки є скління кабін. За площею скління займає значну поверхню кабін 1,8-2,6 м<sup>2</sup>. На багатоцільових автомобілях встановлені два великі вітрові вікна, які розділені центральною стійкою віконного прорізу. Скління кабін, як правило, виконане із загартованого одношарового скла або тришарового (триплексу). Товщина всіх шибок кабін багатоцільових автомобілів знаходиться в межах 5,0-6,5 мм. Закріплення вітрового скла та скла задньої панелі в прорізах здійснюється за допомогою гумового ущільнювача, який фіксується по периметру закладки замком з полімерного матеріалу або гуми. Встановлено, що триплекс дешевший за скло з багатошаровою полімерною плівкою. Метою роботи є розробка ефективного методу аналізу міцності безпечного багатошарового скління спецтехніки під впливом нестаціонарних температурних полів.

Багатошарове скління спецтехніки розглядається як багатошарова пластина з неканонічною формою плану, яка зібрана із шарів постійної товщини. На зовнішніх поверхнях скління відбувається конвективний теплообмін. Рівняння теплопровідності та граничні умови одержуємо з варіаційного рівняння теплового балансу. Температура в шарах і на бічній поверхні подається у вигляді розвинень у ряди за поліномами Лежандра [4]. Поставлена задача розв'язується методом занурення [5]. Далі розв'язується задача термопружності багатошарових пластин з урахуванням отриманих температурних полів. Деформування скління описується в рамках уточненої теорії [6]. Метод