

к. т. н., доцент **Перпері А. О.**

a.perperi@odaba.edu.ua, ORCID-0000-0001-7112-6864

Одеська державна академія будівництва та архітектури

к. т. н., доцент **Калінін О.О.**,

Chessking@ukr.net, ORCID -0000-0002-3054-4995

Одеська державна академія будівництва та архітектури

к. т. н., доц. **Калініна Т. О.**,

kalininat384@gmail.com, ORCID-0000-0002-3184-3604

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

ст. 3-го курсу **Ханжи М. В.**,

markkhanzhy@gmail.com, ORCID-0009-0000-8321-5119

Одеська державна академія будівництва та архітектури

ВИЗНАЧЕННЯ НЕОБХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДЯНОГО СТРУМЕНЯ ФОНТАНУ ДЛЯ ОТРИМАННЯ БАЖАННОЇ ТРАЄКТОРІЇ ПРИ ВПЛИВІ ОПОРУ ПОВІТРЯ

У статті розглянуто теоретичні дослідження, яке присвячене проблемі впливу зовнішніх природних факторів на загальний вигляд фонтанів та науково-практична задача по визначенню необхідних характеристик водяного струменя фонтану з урахуванням впливу опору повітря на його траєкторію. Показано, що класичні моделі руху рідини у полі тяжіння не забезпечують достатньої точності, оскільки не враховують зміну форми струменя, турбулентні втрати та аеродинамічні сили, що суттєво впливають на дальність та висоту підйому води. Метою дослідження є розроблення методики визначення початкової швидкості, кута викиду та геометрії сопла, які дозволяють отримати задану просторову траєкторію струменя під дією опору повітря, але при ламінарному русі для спрощення розрахунків.

У роботі застосовано математичну модель руху суцільного водяного струменя, що базується на рівнях гідродинаміки та спрощених виразах для сили аеродинамічного опору, який залежить від швидкості, щільності повітря та ефективного поперечного перерізу струменя. Для уточнення параметрів використано чисельне моделювання методом по крокової апроксимації, що забезпечує можливість оцінки несталих режимів та варіації погодних умов. Розроблений алгоритм дозволяє визначити комбінації тиску подачі водяного струменя фонтану для досягнення бажаного водного малюнка.

Отримані результати можуть бути застосовані при проектуванні декоративних фонтанів, інтерактивних гідродинамічних інсталяцій та міських водних комплексів, де важливо забезпечити стабільність та повторюваність траєкторії струменя. Запропонована методика підвищує

точність налаштування фонтанних систем, зменшує витрати води та енергії та сприяє оптимізації художньо-технічних рішень у міському середовищі.

Ключові слова: фонтан; водяний струмінь; траєкторія; рівняння; архітектура; супротив повітря; прикладна геометрія.

Постановка проблеми. В останні часи сучасні інновації сприяли виникненню значних досягнень та суттєвого розвитку і в архітектурі. Людство отримало змогу створювати ще більш дивовижні об'єкти завдяки передовим методикам будівництва та проектування. Форми та ідеї, які раніше здавалися ризикованими у виконанні або навіть неможливими, наразі втілюються в життя кваліфікованими та завзятими професіоналами завдяки комп'ютерним програмам та загальному прогресу усіх систем. Нові шляхи розвинення було знайдено і у розробленні фонтанів. Сьогодні водограї дивують своїми неперевершеними візерунками, рух яких створює відчуття гармонії та єдності в душі. Враховуючи проблемність реалізації новітніх технологій через їхню загальну складність, вкрай важливо розрахувати й те, як цей об'єкт буде функціонувати не тільки в теорії, а й у дійсності.

Ціль статті. Систематичний аналіз та синтез основних наукових досліджень та публікацій, присвячених визначенню характеристик водяного струменя фонтанних установок з урахуванням аеродимічного опору повітря. Дослідження може дати допомогу спеціалістам під час проектування фонтанів та втілити можливість належного та бажаного функціонування водограю не тільки в теорії, а й на практиці – коли нехтувати впливом навколишніх факторів не вдасться.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Проблематика впливу зовнішніх природних факторів на загальний вигляд фонтанів та науково-практична задача по визначенню необхідних характеристик водяного струменя фонтану з урахуванням впливу опору повітря на його траєкторію та аеродинамічного опору є предметом дослідження багатьох науковців у галузях гідродинаміки, механіки рідини та технічної гідравліки. У класичних роботах з гідромеханіки [1] закладено теоретичні основи опису руху несмислової рідини та взаємодії потоку з оточуючим середовищем, що стало базою для використання диференціальних моделей руху водяних струменів. У сучасних публікаціях значна увага приділяється впливу аеродинамічного опору та дисперсії крапель на форму та дальність польоту струменя. У роботах авторів [2, 3, 4] демонструють результати чисельного моделювання за допомогою комп'ютерних технологій, що дозволяє врахувати турбулентність, фрагментцію струменя та енергетичні втрати в повітрі. Дослідження показують, що навіть при незначному вітровому навантаженні або зміні температури повітря траєкторія суттєво відхиляється від балістичної моделі.

Окремі публікації з дослідження присвячені проектуванню фонтанних систем і оптимізації їх гідравлічних параметрів. У роботах [5, 6] аналізуються залежності між діаметром сопла, тиском подачі, початковою швидкістю струменя та висотою підойма. У цих дослідженнях показано, що правильний вибір геометрії сопла є ключовим для забезпечення стабільної траєкторії за умов зовнішніх забруднень.

У працях українських дослідників [7, 8, 9] розглядаються інженерні методики обчислення висоти фонтанів, параметрів насадок та втрата енергії з використанням спрощених аналітичних залежностей. Але ці моделі придатні для практичного проектування, вони не враховують детально поведінку струменя на великих висотах та складу взаємодії з провітреним середовищем.

За нашим аналізом літератури показав, що актуальною залишиться проблема в інтегрованому підході [10], який би поєднував аналітичні моделі, експериментальні данні для визначення оптимальних характеристик водяного струменя з урахуванням опору повітря. Саме уточнення цих залежностей і є науковою проблемою, на вирішенні якої спрямована стаття.

Основна частина. Людство влаштовано так, щоб завжди прагнути до неперевершеної краси своїх витворів. В будь-якому виді мистецтва автор не заспокоїться поки не вловить ту саму музу, знайде той самий шлях розвитку свого проекту та врешті-решт не продемонструє увесь спектр емоційності, який було заплановано передати на стадії розробки ідеї. Митцю вкрай необхідно, щоб його об'єкт не тільки передав необхідні настрої глядачам, а й вабив своїм виглядом їхні очі. Так і в одній з найпоширеніших видів передач людиною своїх переживань – архітектурі. Краса є одним з факторів, що стоять горою в самому означенні цього напряму. Але не менш важливими є й поняття міцності та користі, які також входять у відомий вислів давньоримського архітектора Вітрувія про головні чинники, що характеризують архітектуру. Проте, є випадки коли ці складові не лише окремі частини, наявність яких необхідна для створення ясної цілої картини, а деталі механізму, які прямо залежать один від одного та окремими не вважаються [1]. Чудовим прикладом слугують фонтани – невеликі архітектурні форми, що використовуються для прикрашання та більшої функціональності парків, скверів тощо. Додаємо вплив навколишніх факторів і приклад стане повністю зрозумілим. Ці об'єкти ваблять туристів перш за все своїми приголомшеними візерунками, що утворюються завдяки руху водяних струменів. Але що станеться з теорією на практиці коли пропадуть сприятливі умови для її дії? Саме в таких випадках конструктив (міцність у контексті вже згаданого тезису) та краса залежать одне від одного. У цій ситуації мальовничість ніяк не буде втілена, якщо геометричні питання не будуть вирішені заздалегідь, водночас складність втілення яких залежить від ідеї вигляду (краси) мелодії води. Для забезпечення необхідної траєкторії потрібні розрахунки пов'язані з математикою, фізикою, балістикою, прикладною та аналітичною геометрією. В минулих роботах

авторами розбиралася проблема впливу супротиву повітря на загальне сприйняття водограю (див. докладніше [2]). Вже у цьому дослідженні проводяться математичні розрахунки, необхідні для нівелювання струменем даної проблеми.

В задачі струмінь фонтану буде направлений під кутом вгору, утворюючи завдяки етапам підйому та падіння криву, яка в дійсності лише подібна до параболи – балістична (через впливи навколишнього середовища) [3]. Розглянуто спочатку ідеалістичну траєкторію, за якою має змінюватись водяний струмінь. З аналітичної геометрії формула траєкторії руху тіла, кинутого під кутом α до горизонту з початковою швидкістю v_0 виглядає наступним чином:

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

де g – прискорення вільного падіння [9.81 м/с^2].

В ізолюваній системі, де тіло не стикається з іншими чинниками рівняння утворює параболічну траєкторію (рис. 1).

Тепер виведено рівняння руху при врахуванні опору повітря. У цьому випадку на тіло буде діяти на додаткова сила $F_{\text{опор}}$. Вона залежить від швидкості тіла та записується у наступному вигляді:

$$F_{\text{опор}} = -kv \quad (2)$$

де k – коефіцієнт опору повітря, що залежить від форми та маси тіла, а також від умов навколишнього середовища; v – вектор швидкості [4].

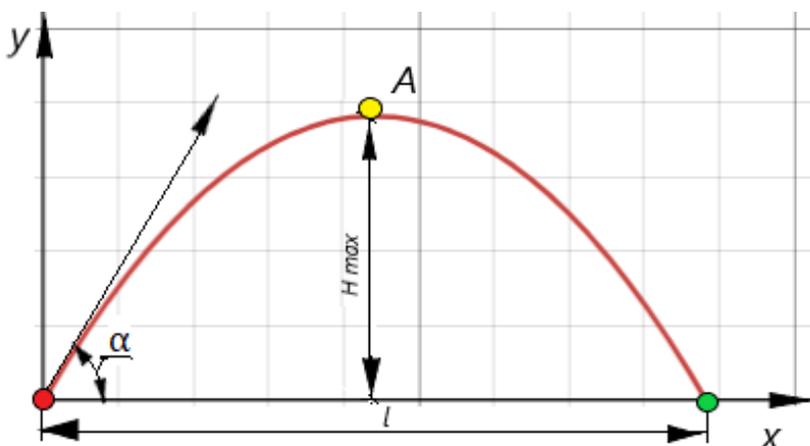


Рис. 1. Траєкторія тіла, кинутого під кутом до горизонту в ізолюваній системі вимірювання

Знак мінус ставимо разом із коефіцієнтом k , оскільки опір повітря сповільнює тіло. Для облегшення розрахунків в нашому дослідженні приймається, що фонтан діє не у турбулентному, а у ламінарному режимі.

Для того, щоб описати рівняння по координатам згадаємо Другий закон Ньютона, звідки маємо:

$$F = ma \quad (3)$$

де m – маса тіла, a – прискорення, F – сила

В той самий час прискорення a – це похідна швидкості v в часі:

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (4)$$

Отже, враховуючи формули (3) та (4) закон Ньютона можна записати у наступному вигляді:

$$m \frac{dv}{dt} = F \quad (5)$$

Розкладаємо рух тіла по осям координат і отримуємо систему рівнянь:

$$m \frac{dv_x}{dt} = -kv; \quad (6)$$

$$m \frac{dv_y}{dt} = -mg - kv_x. \quad (7)$$

У формулу (7) додаємо значення сили тяжіння ($F_m = mg$), оскільки це рівняння вертикальної складової траєкторії. Сила тяжіння діє також вертикально, але скеровує тіло у протилежну сторону (вниз), тому її вплив має позначатися у рівнянні зі знаком мінус. У виразі (6) цей доданок непотрібний, бо описується горизонтальний рух уздовж осі x .

Розв'язання рівнянь:

$$m \frac{dv_x}{dt} = -kv;$$

$$m \frac{dv_x}{v_x} = -\frac{k}{m} dt_x.$$

Інтегруємо:

$$\int \frac{dv_x}{v_x} = \int -\frac{k}{m} dt;$$

$$nv_x = -\frac{k}{m} t + C_1.$$

У результаті інтегрування отримано константу. Зводимо у ступінь значення e . Для спрощення далі буде позначено $e^{C_1} = C_2$

$$v_x = e^{C_1} e^{-\frac{k}{m} t};$$

$$v_x = C_2 e^{-\frac{k}{m} t}.$$

За початковою умовою $v_x(0) = v_0 \cos \alpha$. Маємо: $v_0 \cos \alpha = C_2 e^0 = C_2$.

Отже отримаємо рівняння швидкості тіла по осі x :

$$v_x = v_0 \cos \alpha * e^{-\frac{k}{m}t} \quad (8)$$

Оскільки $v_x(t) = \frac{dx}{dt}$ інтегруємо за часом:

$$x(t) = \int v_0 \cos \alpha * e^{-\frac{k}{m}t} dt$$

Після вирішення маємо наступну відповідь:

$$x(t) = \frac{v_0 \cos \alpha m}{k} (1 - e^{-\frac{k}{m}t}) \quad (9)$$

Розглянуто рівняння залежності швидкості по осі y :

$$m \frac{dv_y}{dt} = -mg - kv;$$

$$\frac{dv_y}{dt} = -mg - kv_y;$$

$$\frac{dv_y}{dt} = -mg - kv_y;$$

$$\frac{dv_y}{g + \frac{k}{m}v_y} = dt$$

Проінтегровано вираз (лінійне рівняння першого порядку). Застосовуємо інтегрувальний множник:

$$\frac{dv_y}{dt} + \frac{k}{m}v_y = -g$$

Вводимо множник та помножаємо на усі частини:

$$\mu(t) = e^{\int \frac{k}{m} dt} = e^{\frac{k}{m}t};$$

$$e^{\frac{k}{m}t} \frac{dv_y}{dt} + \frac{k}{m} e^{\frac{k}{m}t} v_y = -g e^{\frac{k}{m}t}$$

Ліва частина стала похідною:

$$\frac{d}{dt}(v_y e^{\frac{k}{m}t}) = -g e^{\frac{k}{m}t};$$

$$v_y e^{\frac{k}{m}t} = \int -g e^{\frac{k}{m}t} dt;$$

$$v_y e^{\frac{k}{m}t} = -g \int e^{\frac{k}{m}t} dt.$$

В результаті інтегрування отримано нову константу. Позначимо її C_3 .

$$v_y e^{\frac{k}{m}t} = -g \frac{m}{k} e^{\frac{k}{m}t} + C_3;$$

$$v_y = C_3 e^{-\frac{k}{m}t} - \frac{mg}{k}.$$

Підставляємо початкову умову:

$$v_0 \sin \alpha = C_3 - \frac{mg}{k};$$

$$C_3 = v_0 \sin \alpha + \frac{mg}{k}.$$

В результаті маємо наступне рівняння:

$$v_y = (v_0 \sin \alpha + \frac{mg}{k}) e^{-\frac{k}{m}t} - \frac{mg}{k} \quad (10)$$

Для отримання $y(t)$ інтегруємо за часом:

$$y(t) = \int (v_0 \sin \alpha + \frac{mg}{k}) e^{-\frac{k}{m}t} dt - \int \frac{mg}{k} dt$$

Маємо:

$$y(t) = (v_0 \sin \alpha \frac{m}{k} + \frac{m^2 g}{k^2})(1 - e^{-\frac{k}{m}t}) - \frac{mg}{k} t \quad (11)$$

Тепер визначимо t з рівняння (9):

$$1 - e^{-\frac{k}{m}t} = \frac{kx}{v_0 \sin \alpha m};$$

$$e^{-\frac{k}{m}t} = 1 - \frac{kx}{v_0 \sin \alpha m};$$

$$-\frac{k}{m}t = \ln(1 - \frac{kx}{v_0 \sin \alpha m});$$

$$t = -\frac{m}{k} \ln(1 - \frac{kx}{v_0 \sin \alpha m})$$

Отриману тотожність підставляємо у формулу (11). Після спрощень одержуємо загальне рівняння $y(x)$ траєкторії руху тіла, кинутого під кутом до горизонту, з урахуванням лінійного опору повітря:

$$y(x) = \left(\frac{v_0 \sin \alpha}{v_0 \cos \alpha} + \frac{mg}{kv_0 \cos \alpha} \right) x + \frac{m^2 g}{k^2} \ln \left(1 - \frac{kx}{v_0 \cos \alpha m} \right) \quad (12)$$

Задаємо конкретні значення характеристик фонтану у формулу руху в ізолюваній системі (1).

Для дослідження було обрано наступні показники:

Початкова швидкість $v_0 = 10 \text{ м/с}$;

Кут кидання по відношенню до горизонту $\alpha = 60^\circ$

Маса водяного струменя (умовна) = 1 кг

Коефіцієнт опору повітря = 0,2

$$y(x) = \frac{9.81}{2 * 10^2 * \cos^2 60^\circ} x^2 + \tan 60^\circ x;$$

$$y(x) = -0.196x^2 + 1.73x$$

Будуємо цей графік. Після чого підставляємо ті самі значення фонтану у формулу з урахуванням лінійного опору повітря (12).

$$y(x) = \left(\frac{10 * \sin 60^\circ}{10 * \cos 60^\circ} + \frac{1 * 9.81}{0.2 * 10 * \cos 60^\circ} \right) x + \frac{1^2 * 9.8}{0.2^2} \ln \left(1 - \frac{0.2x}{10 * \cos 60^\circ * 1} \right);$$

$$y(x) = 11.53x + 245 \ln \left(1 - \frac{0.2x}{5} \right).$$

Порівнюємо дві отримані функції (рис. 2). Після врахування супротиву повітря (параметру, що присутній лише у формулі (12)) траєкторія струменя перестане бути параболічною. Вплив навколишнього фактору заважає тілу досягти тих самих координат вершини функції, яких вона набувала в безповітряному просторі.

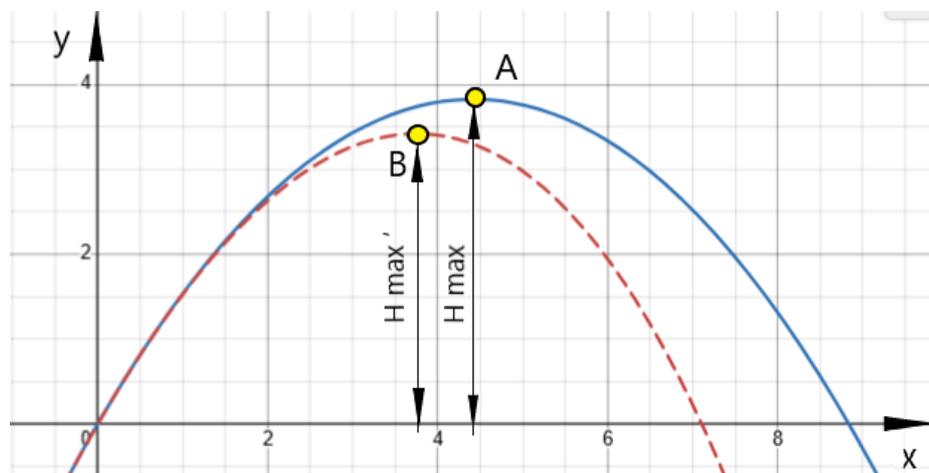


Рис 2. Траєкторія руху водяного струменя в ізолюваній системі (—) при заданих характеристиках та траєкторія його руху при впливі опору повітря (---)

Завданням дослідження є таке коригування характеристик траєкторії при опорі повітря, яке надасть даній функції ті самі координати зеніту, які вона досягала в ізольованій системі при початкових даних. За допомогою обчислень необхідно знайти нові значення початкової швидкості v_0' та куту польоту α' для рівняння з урахуванням впливу повітряного середовища, які задовольнять збіг потрібних точок. На практиці така потреба може полягати, наприклад, у наявності спеціального підсвічування водограю в певній точці або забезпеченні саме якоїсь конкретної конфігурації фонтану тощо [5].

Для цього спочатку буде знайдено координати вершин рівняння без впливу навколишніх факторів.

$$x_e = \frac{v_0'^2 \sin 2\alpha}{2g} = -\frac{b}{2a}; \quad (13)$$

$$x_e = \frac{1.73}{2 * (-0.196)} = 4.41.4$$

$$y_e = \frac{v_0'^2 \sin^2 \alpha}{2g} = \frac{4ac - b^2}{4a}; \quad (14)$$

$$y_e = \frac{75}{19.62} = 3.82.$$

Отже координати вершини даного тіла при нехтуванні опором повітря наступні:

$$x_e = 4.41 \quad y_e = 3.82$$

Тепер підставляємо отриманні значення у рівняння з впливом опору повітря (12). Позначаємо шукані параметри: нова початкова швидкість v_0' , новий кут польоту по відношенню до горизонту α' .

Для облегшеного запису округлимо значення координат вершин до сотень. Отримаємо рівняння:

$$3.82 = \left(\frac{v_0' \sin \alpha'}{v_0 \cos \alpha} + \frac{1 * 9.81}{0.2 * v_0 \cos \alpha} \right) 4.41 + \frac{1 * 9.81}{0.2^2} \ln \left(1 - \frac{0.2 * 4.41}{v_0 \cos \alpha * 1} \right);$$

$$3.82 = \left(\tan \alpha' + \frac{9.81}{0.2 * v_0 \cos \alpha} \right) 4.41 + 245 \ln \left(1 - \frac{0.882}{v_0 \cos \alpha} \right).$$

Аналітичне рішення даного рівняння вкрай важке у своєму втіленні. По-перше наявність тангенсу та косинусу разом із логарифмом створюють не лінійність. По-друге змінні v_0' та $\cos \alpha'$ знаходяться в чисельнику, в знаменнику та у логарифмі одночасно. Тому тригонометричні функції та логарифм заважають виразити невідомі одна з одною. Саме тому застосуємо метод підбору, який є одним з найбільш поширених чисельних способів рішення задач [6]. Наші нові значення не будуть сильно відрізнятися від

початкових, тому багато обчислень не доведеться робити для того, аби вийти на необхідну початкову швидкість та кут польоту. Оскільки на побудованих графіках видно, що координати вершин не збігаються при сталих значеннях, то буде трохи змінено початкові характеристики для першої перевірки. З фізичних законів стає зрозумілим, що початкова швидкість має стати більшою за представлену в першому варіанті.

Спроба 1. Обрано значення $v'_0 = 10.5$ м/с. Кут польоту α' залишаємо колишнім (60°).

Після підстановки отримаємо наступне рівняння:

$$3.82 = \left(\frac{10.5 * \sin 60^\circ}{10.5 * \cos 60^\circ} + \frac{1 * 9.81}{0.2 * 10.5 \cos 60^\circ} \right) 4.41 + \frac{1^2 * 9.8}{0.2^2} \ln \left(\frac{0.2 * 4.41}{10.5 * \cos 60^\circ * 1} \right)$$

Розрахунки приводять до наступних значень:

$$3.82 = 3.98$$

Тотожність не отримано.

Спроба 2. Далі буде обрано 10.625 м/с та 59.3° .

$$3.82 = 4.27$$

Очевидно, що необхідна третя спроба.

Спроба 3. Підбираємо значення: 10.75 м/с та 58.6° .

$$3.82 = 3.82$$

Було отримано тотожність шляхом підбору кількох варіацій значень. Щоб координати апогеїв обох рівнянь збіглися, початкова швидкість v'_0 у рівнянні з супротивом повітря має дорівнювати 10.75 м/с, а кут польоту $\alpha' = 58.6^\circ$. Нові значення приводять до зміни рівняння при опорі повітря:

$$y(x) = 10.4x + 245 \ln \left(1 - \frac{0.2x}{5.62} \right)$$

Перевіряємо дане ствердження за допомогою побудови графіків. Координати y_{max} збіглися для обох рівнянь, що підтверджує теорію (рис. 3).

Висновки та перспективи. У дослідженні проведено аналітичне й чисельне обґрунтування параметрів водяного струменя фонтанної установки з урахуванням аеродинамічного опору повітря. Встановлено, що форма траєкторії та дальність вильоту струменя істотно залежать не лише від початкової швидкості та кута нахилу сопла, але й від коефіцієнта лобового опору, водяного факела та умов навколишнього середовища. Проведений аналіз дозволив визначити діапазони експлуатаційних характеристик, за яких забезпечується формування стабільної та прогнозованої траєкторії струменя.

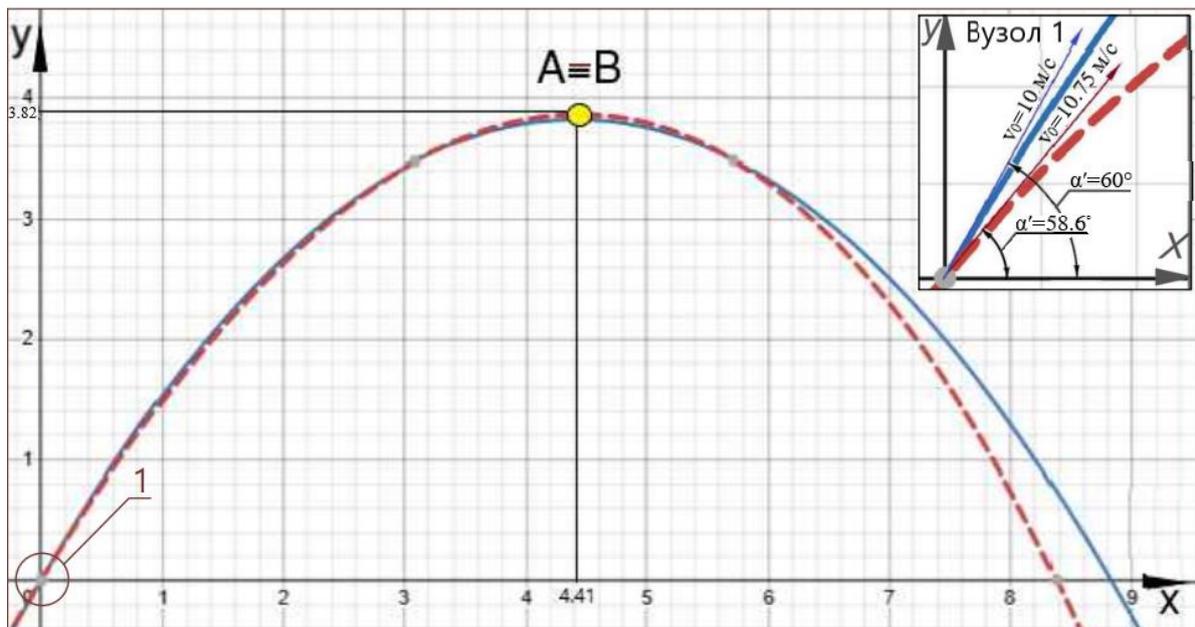


Рис. 3. Графік, на якому зображено траєкторію польоту струменя фонтану при заданих значеннях без впливу навколишніх факторів (—) та траєкторію польоту цього ж струменя при супротиві повітря, але з новими характеристиками, які задовольняють збіг вершин обох функцій (---)

Отримані результати підтверджують, що вплив опору повітря не можна ігнорувати при точному моделюванні фонтанних систем, особливо для декоративних та інженерних конструкцій зі складною геометрією струменя.

Перспективами подальших досліджень є: розширення моделі до тривимірного простору з урахуванням турбулентності, пульсації струменя та взаємодії сусідніх потоків у багатосоплових фонтанних системах; розробка прикладних інженерних методик та програмних модулів, які дозволять проєктантам оперативно розрахувати параметри водяного струменя й отримувати траєкторію максимально відповідну дизайнерському задуму.

Література

1. Тімохін В. О. «Божественний град» естетики архітектурно-містобудівного середовища. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: Архітектура. 2018. Вип. 895. С. 95–99.
2. White F.V. Fluid Mechanics. New York: McGraw Hill, 2016. 615p.
3. Zhang Y., Li W. GFD Modeling of High-Velocity Water Jets in Outdoor Conditions. *International Journal of Multiphase Flow*. 2019. Vol. 114. P. 90–102.
4. Keller J. Design Principles of Fountain Jet Systems: Influence of Nozzle Geometry on Jet Stability. *Urban Water Journal*. 2018. Vol. 15(4). P. 289–298.
5. D'Angelo R., Martinuzzi R. Breakup Behavior of Free Water Jets in Cross-Flow. *Physics of Fluids*. 2018. Vol. 30. P. 1–15.

6. *Unsal B., Wieringa J.* Outdoor Jet Performance and Air Drag Effects on Fountain Streams. *Environmental Fluid Mechanics*. 2021. Vol.21. P. 527–542.
7. *Флегантов Л. О., Канівець І. М.* Моделювання руху тіла у щільному середовищі засобами MS Excel. *Збірник наукових праць. Актуальні питання природно-математичної освіти*. 2016. № 7-8. С. 242–250.
8. *Кравченко В.П.* Гідрравлічні розрахунки фонтанних систем: методичні основи. *Гідротехнічне будівництво*. 2016. №2. С. 45–52.
9. *Бойко С., Черненко І, Павленко Г.* Експериментальні дослідження параметрів водяних струменів у відкритому просторі. *Вісник інженерної гідравлики*. 2022. Т.12. С. 73–81.
10. *Калінін О. О, Калініна Т. О., Ханжу М. В.* Визначення параметрів повітряного середовища, що впливають на траєкторію водяного струменя фонтану. Тези доповідей 80-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури, м. Одеса, 16 - 17 травня. 2024 р. С. 194.
11. *Калінін О. О., Калініна Т. О., Ханжу М. В.* Визначення параметрів повітряного середовища, що впливають на траєкторію водяного струменя фонтану. *Матеріали 80-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу ОДАБА* (м. Одеса, 16–17 травня 2024 р.). Одеса, 2024. С. 194.

References

1. *Timokhin, V. O.* (2018). «Bozhestvennyi hrad» estetyky arkhitekturno-mistobudivnoho seredovyshcha ["Divine City" of the aesthetics of the architectural and urban environment]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhniky"*. *Arkhitektura*, (895), 95–99.2.
2. *White F.V.* Fluid Mechanics. New York: McGraw Hill, 2016. 615p.
3. *Zhang, Y., & Li, W.* (2019). GFD Modeling of High-Velocity Water Jets in Outdoor Conditions. *International Journal of Multiphase Flow*, 114, 90–102. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.02.008>
4. *Keller, J.* (2018). Design principles of fountain jet systems: Influence of nozzle geometry on jet stability. *Urban Water Journal*, 15(4), 289–298. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1484175>
5. *D'Angelo, R., & Martinuzzi, R.* (2018). Breakup behavior of free water jets in cross-flow. *Physics of Fluids*, 30(2), 025102. <https://doi.org/10.1063/1.5009104>
6. *Unsal, B., & Wieringa, J.* (2021). Outdoor jet performance and air drag effects on fountain streams. *Environmental Fluid Mechanics*, 21, 527–542. <https://doi.org/10.1007/s10652-021-09787-z>
7. *Flegantov, L. O., & Kanivets, I. M.* (2016). Modeling the motion of a body in a dense medium using MS Excel. *Collection of Scientific Works. Topical Issues of Natural and Mathematical Education*, (7-8), 242–250.

8. *Kravchenko, V. P.* (2016). Hydraulic calculations of fountain systems: methodological foundations. *Hydraulic Engineering*, (2), 45–52.
9. *Boiko, S., Chernenko, I., & Pavlenko, G.* (2022). Experimental studies of water jet parameters in open space. *Bulletin of Engineering Hydraulics*, 12, 73–81.
10. *Kalinin, O. O., Kalinina, T. O., & Khanzhy, M. V.* (2024, May 16–17). Determination of the parameters of the air environment that affect the trajectory of the water jet of a fountain [Conference presentation abstract]. *80th Scientific and Technical Conference of the Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, Odesa, Ukraine, 194.

Ph.D., Associate Professor **Alla Perperi**

a.perperi@odaba.edu.ua, ORCID-0000-0001-7112-6864
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture

Ph.D., Associate Professor **Oleksandr Kalinin**

Chessking@ukr.net, ORCID -0000-0002-3054-4995
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture

Ph.D., Associate Professor **Tatiana Kalinina**

kalininat384@gmail.com, ORCID-0000-0002-3184-3604
State University of Intellectual Technologies and Communications

3rd year student **Mark Khanzhy**

markkhanzhy@gmail.com, ORCID-0009-0000-8321-5119
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture

DETERMINATION OF THE NECESSARY CHARACTERISTICS OF THE FOUNTAIN WATER JET TO OBTAIN THE DESIRED TRAJECTORY UNDER THE INFLUENCE OF AIR RESISTANCE

The article considers theoretical research, which is devoted to the problem of the influence of external natural factors on the general appearance of fountains and the scientific and practical task of determining the necessary characteristics of a water jet of a fountain, taking into account the influence of air resistance on its trajectory. It is shown that classical models of fluid motion in a gravitational field do not provide sufficient accuracy, since they do not take into account the change in the shape of the jet, turbulent losses and aerodynamic forces, which significantly affect the range and height of water rise. The purpose of the study is to develop a method for determining the initial velocity, ejection angle and nozzle geometry, which allow obtaining a given spatial trajectory of the jet under the action of air resistance, but with laminar motion to simplify calculations.

The work uses a mathematical model of the motion of a continuous water jet, based on the levels of hydrodynamics and simplified expressions for the force of aerodynamic resistance, which depends on the speed, air density and effective cross-section of the jet. To refine the parameters, numerical modeling using the stepwise approximation method was used, which provides the ability to assess

unstable modes and variations in weather conditions. The developed algorithm allows you to determine combinations of supply pressure, nozzle diameter and ejection direction to achieve the desired water pattern.

The results obtained can be applied in the design of decorative fountains, interactive hydrodynamic installations and urban water complexes, where it is important to ensure stability and repeatability of the jet trajectory. The proposed method increases the accuracy of fountain system settings, reduces water and energy consumption and contributes to the optimization of artistic and technical solutions in the urban environment.

Problem statement. *In recent times, modern innovations have contributed to the emergence of significant achievements and significant development in architecture. Humanity has been able to create even more amazing objects thanks to advanced construction and design techniques. Forms and ideas that previously seemed risky to implement or even impossible are now being brought to life by qualified and dedicated professionals thanks to computer programs and the general progress of all systems. New paths of development have also been found in the design of fountains. Modern water features amaze with their unsurpassed patterns, the movement of which creates a feeling of harmony and unity in the soul. Given the problematic nature of implementing the latest technologies due to their general complexity, it is extremely important to calculate how this object will function not only in theory, but also in reality.*

Purpose of the article. *Systematic analysis and synthesis of basic scientific research and publications devoted to determining the characteristics of the water jet of fountain installations taking into account aerodynamic air resistance. The study can help specialists in the design of fountains and realize the possibility of proper and desired functioning of the water feature not only in theory, but also in practice - when it is impossible to neglect the influence of environmental factors.*

Analysis of major studies and publications. *The issue of the influence of external natural factors on the general appearance of fountains and the scientific and practical task of determining the necessary characteristics of a fountain water jet, taking into account the influence of air resistance on its trajectory and aerodynamic resistance, is the subject of research by many scientists in the fields of hydrodynamics, fluid mechanics and technical hydraulics. Classical works on hydromechanics [1] laid the theoretical foundations for describing the motion of a meaningless fluid and the interaction of the flow with the surrounding environment, which became the basis for the use of differential models of water jet motion. In modern publications, considerable attention is paid to the influence of aerodynamic resistance and droplet dispersion on the shape and flight range of the jet. The authors' works [2, 3, 4] demonstrate the results of numerical modeling using computer technologies, which allows taking into account turbulence, jet fragmentation, and energy losses in the air. Studies show that even with a slight wind load or change in air temperature, the trajectory significantly deviates from the ballistic model.*

Separate publications from the research are devoted to the design of fountain systems and optimization of their hydraulic parameters. Works [5, 6] analyze the dependencies between the nozzle diameter, supply pressure, initial jet velocity, and lift height. These studies show that the correct choice of nozzle geometry is key to ensuring a stable trajectory under conditions of external contamination.

Works by Ukrainian researchers [7, 8, 9] consider engineering methods for calculating the height of fountains, nozzle parameters, and energy loss using simplified analytical dependencies. But these models are suitable for practical design, they do not take into account in detail the behavior of the jet at high altitudes and the composition of the interaction with the ventilated environment.

Our analysis of the literature has shown that the problem will remain relevant in an integrated approach [10], which would combine analytical models, experimental data and modern computer tools to determine the optimal characteristics of a water jet taking into account air resistance. It is the clarification of these dependencies that is the scientific problem that the article is aimed at solving.

Keywords: fountain; water jet; trajectory; equation; architecture; air resistance; applied geometry.