

УДК 514.18

А. Я. Калиновський, к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0002-1021-5799)

Л. М. Куценко, д.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0003-1554-8848)

О. Г. Поліванов, викл. каф. (ORCID 0000-0002-6396-1680)

Б. І. Кривошей, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-2561-5568)

О. В. Савченко, к.т.н., с.н.с., заст. нач. каф. (ORCID 0000-0002-1305-7415)

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ ДОСТАВКИ ВОГНЕГАСНОГО КОНТЕЙНЕРА ДО ВЕРХНІХ ПОВЕРХІВ БУДІВЕЛЬ

Розроблено спосіб моделювання траєкторії доставки контейнера з вогнегасною речовиною до вікон верхніх поверхів будівель, де виникла пожежа. У якості стартового засобу застосовується імпульсний вогнегасник Тайфун-10, який використовується як пневматична гармата. Це дозволяє доставляти до осередку пожежі вогнегасні речовини дискретно, поміщені у спеціальний контейнер. Для визначення раціональної траєкторії доставки контейнера до верхніх поверхів будівлі було залучено відомі з механіки диференціальні рівняння та їх розв'язки. Ці співвідношення пов'язують між собою параметри, характерні для точок шуканої траєкторії. Доповненням до цих результатів стануть знайдені в роботі залежності для опису навісної та настільної траєкторій, що перетинаються в точці палаючого вікна будівлі. А також визначені значення мінімальної стартової швидкості для доставки контейнера в заздалегідь задане вікно будівлі необхідного поверху. При цьому вважається, що для розрахунків відома висота розташування палаючого вікна (від фундаменту будівлі), а також відома відстань від імпульсного вогнегасника до стіни будівлі. Складено таргет-програму для перевірки одержаних залежностей шляхом побудови траєкторій доставки засобами комп'ютерної графіки. Результати представлені у вигляді таблиці, де початкові швидкості та кути вильоту контейнера поставлені у залежність від номеру поверху будівлі. Проведені дослідження спрямовані на розвиток тактики гасіння пожеж у багатоповерхових будинках способом метання (або закидання, using Fire extinguisher Ball). Цій технології притаманна оперативність ліквідації пожежі пожежно-рятувальними підрозділами, незалежно від стану під'їзних шляхів до будівлі, а також від існування різноманітних перепон безпосередньо на подвір'ї перед будинком. Все це дозволить запобігти поширенню пожежі завдяки її оперативній локалізації та ліквідації.

Ключові слова: контейнер, вогнегасна речовина, імпульсний вогнегасник, точка перетину траєкторій, мінімальна стартова швидкість

1. Вступ

Ефективність гасіння пожежі залежить від швидкості прибуття на місце пожежно-рятувальних підрозділів. Це дає шанс її ліквідувати на етапі початкової фази горіння. На оперативність прибуття пожежних суттєво впливають стан під'їзних шляхів до будівлі, а також існування різноманітних перепон безпосередньо на подвір'ї перед будинком, що заважає швидкій доставці вогнегасних речовин до осередку пожежі. Особливо це стосується пожеж, які виникають на верхніх поверхах багатоповерхових будинків. В цьому випадку вогнегасну речовину для оперативності доцільно доставляти дистанційно, наприклад, метанням або закидуванням (у літературі застосовується термін Fire extinguisher Ball [1]).

Необхідність проводити наукові дослідження стосовно дистанційної доставки контейнерів з вогнегасною речовиною до вікон верхніх поверхів будинків, де виникла пожежа, пояснюється необхідністю розробки сучасних способів протипожежного захисту цього класу будівель. Відомі варіанти застосування «пожежних» дронів, але стикаються з необхідністю їх постійної «дозаправки» новим контейнером після кожної доставки. Це суттєво уповільнює інтенсивність гасіння пожежі. Однак, коли у якості засобу доставки використовується імпульсний вог-

негасник типу пневматичної гармати, то доставку контейнерів можливо здійснювати серіями безперервних контейнерних «черг», що дозволить швидко локалізувати пожежу. Тематика дистанційної доставки контейнерів до вікон верхніх поверхів будинків пов'язана з використанням сучасних математичних способів балістичного наведення контейнерів до цілі, які можуть використовуватись і для інших аварійно-рятувальних робіт. Наприклад, встановлення якірних тросів для евакуації людей. При цьому комп'ютерне моделювання траєкторій переміщень контейнерів займатиме ключове місце. Зазначений підхід до розрахунку траєкторій переміщень контейнерів можна також покласти в основу забезпечення сучасних планшетів відповідними програмними продуктами.

Проведені дослідження дозволять започаткувати нову технологію гасіння пожеж у багатоповерхових будинках способом «гарматного» метання. Цій технології притаманна оперативність ліквідації пожежі незалежно від стану під'їзних шляхів до будівлі, а також від існування різноманітних перепон безпосередньо на підвір'ї перед будинком. Проведені дослідження можуть дати практиці такі результати. Розробити технологічні таблиці значень кутів вильоту контейнера залежно від відстані гармати до будівлі і висоти вікна від фундаменту. (В подальшому це буде реалізовано за допомогою планшетів). Розрахувати вплив вітру на зміну «штильової» траєкторії контейнера. Крім того, одержані результати в подальшому доцільно покласти в основу створення комп'ютерних симуляторів для проведення тренувань особового складу в режимі «штабних ігор».

Зазначене вказує на актуальність дослідження проблеми дистанційної доставки контейнерів з вогнегасною речовиною до вікон верхніх поверхів будинків, де виникла пожежа.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Сучасна тенденція захисту від пожеж квартир та офісів спрямована на використання вогнегасників, які мають вигляд кулі, наповненої вогнегасною речовиною [1]. Такі вогнегасні засоби прийнято називати «вогнегасними кулями» (fire extinguisher ball). Корпус кулі виготовлено з пінопластика, обгорненого плівкою з полівінілхлориду. Коли така куля, кинута у вогонь, зіштовхується з полум'ям пожежі, вона самознищується й вивільняє уміст, який являє собою суміш моноамонійфосфата й сульфату амонію. Уміст нетоксичний і безпечний, тому не впливає на людей. Найкраще підходить для пожеж побутових, пов'язаних з електрикою та кухонними газовими плитами. Цікаво, що після закінчення строку придатності вогнегасну речовину (монофосфат амонію, змішаний з водою) можна використовувати як садове добриво.

Безпечність і ефективність «вогненних куль» сприяла виникненню ідеї дистанційного гасіння пожеж. Особливо, якщо це стосується пожеж на верхніх поверхах висотних будівель. Навіть, своєчасне прибуття пожежних-рятувальників до будівлі не дозволить відразу приступити до гасіння «висотної» пожежі. Тому доцільною буде розробка технології гасіння пожеж на верхніх поверхах будівлі шляхом дистанційної доставки аналогічних «вогнегасних куль» до палаючого вікна. Для реалізації такої технології необхідно наладити виготовлення спеціальних контейнерів з вогнегасним речовинами. А також розробити засоби їх доставки способом метання до вікон висотки. В даній роботі у якості засобу доставки пропонується використати пневматичну гармату. З контейнером сферичної форми це буде, мабуть, найнадійніший спосіб доставки (маючи на увазі інші механічні ка-

тапульти). Враховуючи, що зазначена доставка здійснюється до сукупності скляних вікон, то помилки в розрахунках можуть спричинити їх пошкодження, що додасть проблем при ліквідації пожежі.

Задача доставки контейнера з вогнегасною речовиною до верхніх поверхів будівель є спорідненою для таких задач як виконання прицільних стрільб в артилерії, а також здійснення результативних дій в ігрових видах спорту (баскетбол, бейсбол, волейбол тощо). Інтернет наповнений науковими роботами стосовно застосування другого закону Ньютона до параболічного руху об'єкта в повітряному середовищі. При цьому фахівці-артилеристи досліджують балістичні переміщення снарядів, а фахівці-біомеханіки вивчають впливи зусиль спортсмена на траєкторію м'яча.

В роботі [2] розглядається задача перельоту снаряда через паркан певної висоти, розташованого на відомій відстані від місця пострілу. Визначені умови вибору швидкості і кута вильоту для того, щоб снаряд приземлився по іншу сторону забору. Але в статті відсутня інформація про можливості графічного унаочнення результатів руху у вертикальній площині, що суттєво скорочує можливості використання формул. В роботі [3] наведено розрахунок критичного кута пострілу снаряда з відомою початковою швидкістю, який приводить до максимальної горизонтальної відстані вильоту. При цьому місце пострілу розташоване на вищому місці відносно заданої висоти приземлення. Але для програмної реалізації такого підходу недостає аналізу параметрів, коли розв'язки можуть бути відсутніми. Такі умови можуть привести до неадекватності одержаного рішення. В роботі [4] розрахунок полягає в обчисленні критичного кута пострілу з поверхні землі у бік місця більшої висоти, розташованої на заданій відстані перед місцем пострілу. Задача полягає у визначенні умов для досягнення максимальної горизонтальної відстані на більш високому місці. Але для складання програми унаочнення графічної моделі необхідні дані про варіанти взаємних співвідношень параметрів, які в роботі відсутні. Це може привести до некоректності одержаного розв'язку. В роботі [5] аналітично досліджено рух снаряда з заданою початковою швидкістю, який рухається під дією гравітаційного поля тяжіння й на який впливає сила опору повітря. В роботі [6] наведено формули для обчислення початкової швидкості і кута вильоту за умови, що тіло рухається по параболічній траєкторії. Але в зазначених роботах відсутня інформація про особливості створення комп'ютерних програм графічного унаочнення одержаних результатів. Особливо це стосується програм, створених в середовищі математичного пакету *maple*. В роботі [7] наведено спосіб обчислення мінімальної швидкості снаряда, яка необхідна для враження цілі з заданими координатами (снаряд рухається по параболічній траєкторії). При цьому в роботі відсутня інформація про тестові параметри, з якими доцільно налагоджувати створену комп'ютерну програму. А в роботі [8] досліджено у якій точці траєкторії снаряд має мінімальну швидкість. Але в цих роботах не наведено інформацію про можливості графічних побудов, які допомогли б шляхом унаочнення траєкторій руху снаряда одержати розв'язок. В роботі [9] систематизовано формули опису траєкторії руху снаряда. В роботі [10] наведено приклад *maple*-програми моделювання параболічної траєкторії руху снаряда. Але в жодній статті не наведено дані про діапазони зміни параметрів для забезпечення стабільного графічного розв'язку.

Проведений мета-аналіз вказує на відсутність стратегії створення комп'ютерних програм, які базуються на графічній інтерпретації одержаних розв'язків. Наприклад, графічна інтерпретація буде доцільною для опису кутів

вильоту контейнера, які забезпечують перетин настільної і навісної траєкторій в заданій точці цілі. Крім того, у відомих роботах у явному вигляді відсутні розрахунки мінімальної початкової швидкості, здатної забезпечити досягнення палаючого вікна будівлі. Це затрудняє створення програмного забезпечення для реалізації на практиці ідеї доставки контейнера з вогнегасною речовиною до вікон верхніх поверхів будівель. В роботах також відсутні результати стосовно розробки програмного забезпечення планшетів для моделювання ситуацій, які виникають в процесі доставки контейнерів до верхніх поверхів будівель.

Наведене вказує на необхідність вирішення проблеми, що пов'язана з новою технологією гасіння пожеж у будівлях підвищеної поверховості. При цьому необхідно використовувати (модернізовані) пневматичні гармати, здатні доставляти до вікна приміщення, де відбулася пожежа, контейнери з вогнегасною речовиною. В даній роботі передбачається вирішення лише частини зазначеної проблеми – розрахунок раціональних траєкторій руху контейнера з вогнегасною речовиною за умови, що стартовим пристроєм доставки обрано пневматичну гармату.

3. Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є розробка способу моделювання траєкторії доставки контейнера з вогнегасною речовиною до вікон верхніх поверхів будинків, де виникла пожежа. За умови, що у якості засобу доставки використовується імпульсний вогнегасник типу пневматичної гармати.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- описати кути вильоту контейнера, які забезпечують перетин настільної і навісної траєкторій в заданій точці цілі (у палаючому вікні будівлі);
- розрахувати мінімальну стартову швидкість, здатну забезпечити досягнення палаючого вікна будівлі;
- описати траєкторію доставки контейнера до вікна заданої висоти над фундаментом за умови відомої відстані від імпульсного вогнегасника до стіни.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом проведених досліджень є розвиток метода гасіння пожеж у будівлях підвищеної поверховості з використанням пневматичної гармати, яка дозволяє дистанційно доставляти до палаючого вікна контейнер з вогнегасною речовиною. Контейнер повинен досягти цілі і самознищенням вивільнити речовину, чим сприяти локалізації та ліквідації пожежі.

Предметом досліджень є розробка способу геометричного моделювання траєкторії доставки контейнера з вогнегасною речовиною до вікна пожежі на верхніх поверхах будинків, коли у якості засобу доставки використовується імпульсний вогнегасник виду пневматичної гармати.

Гіпотеза досліджень полягає у можливості враховувати основні сили, що діють на контейнер у фазі його польоту. А саме, гравітація надає контейнеру прискорення вниз, змушуючи його відхилитися від прямолінійного польоту, опір (протидія) повітря, сповільнює контейнер із силою пропорційно швидкості (лінійно або квадратично). Вітер змушує контейнер відхилитися від своєї траєкторії. Під час польоту, гравітація, опір і вітер надають найбільший вклад у зміну траєкторії польоту контейнера. Це слід враховувати при прогнозуванні польоту контейнера. При подальших дослідженнях можливо врахувати ряд інших ефектів, таких як

Fire safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2023-38-9

вертикальні кути, температура і щільність повітря, гіроскопічний дрейф та інше.

При цьому вважається, що форма траєкторії залежить від основних геометричних та фізичних параметрів: маси контейнера, початкової швидкості та кута його вильоту (відносно рівня горизонту), радіуса сферичного контейнера, коефіцієнта опору форми контейнера (яку часто називають парусністю), значення щільності повітря, а також характерної площі опору руху контейнера. Проблема полягає у виборі таких значень кута вильоту та початкової швидкості вильоту, щоб контейнер з вогнегасною речовиною влучив у вікно, за яким палає пожежа.

Допущення досліджень пов'язано з ідеалізацією поняття траєкторії доставки контейнера на верхні поверхи будівлі. Вважається, що рух контейнера відбувається у вертикальній площині, і що центр мас контейнера рухатиметься по параболічній траєкторії. Саме цей факт є суттєвим в роботі при одержанні аналітичних залежностей. Під поняттям «доставки контейнера до палаючого вікна» будемо розуміти доставку центра маси контейнера до центральної точки вікна з пожежею.

Для реалізації на практиці розглянутої ідеї розрахунку траєкторії доставки контейнера до верхніх поверхів будівлі необхідно мати спосіб розв'язання диференціальних рівнянь, які описують процес переміщення контейнера по параболічній траєкторії. Бажано б одержати такі розв'язки з використанням аналітичних співвідношень. В даній роботі для цього обрано математичний процесор Maple, за допомогою якого вдалося одержати і спростити аналітичні вирази, а також скласти програми опису і унаочнення необхідних траєкторій з метою контролю одержаних формул.

5. Побудова настільної і навісної траєкторій, які перетинаються в заданій точці вікна

Перший етап обраного логічного ланцюжка розрахунку траєкторій виявляється у визначенні пари кутів вильоту контейнера, які забезпечують існування настільної і навісної траєкторій. При цьому зазначені траєкторії мають перетинатися в заданій точці палаючого вікна будівлі [11].

Нехай в декартовій системі координат $Oxyz$ у вертикальній площині задано точку з координатами $M(x,z)$. З початку координат вилітає фізичне тіло (наприклад, контейнер у формі кулі) за умови, що на нього діє поле земного тяжіння. Необхідно визначити формулу для опису кута вильоту контейнера, здатного влучити в точку $M(x,z)$. Вважатимемо, що тіло має постійну швидкість v , а гравітація визначається прискоренням земного тяжіння $g=9,81$. Задача формулюється так: під яким кутом до горизонту необхідно направити контейнер, щоб він потрапив у точку M ?

Для виводу формули розглянемо відомі з механіки рівняння руху точки:

$$x = vt \cos \alpha, \quad (1)$$

$$z = vt \sin \alpha - \frac{gt^2}{2}, \quad (2)$$

де t – час, v – швидкість.

Рівняння (1) описує горизонтальні координати переміщення точки, а рівняння (2) – її вертикальні координати. З рівняння (1) визначимо час t :

$$t = \frac{x}{v \cos \alpha}. \quad (3)$$

Далі, підставивши вираз (3) в формулу (2), одержимо:

$$z = \frac{vx \sin \alpha}{v \cos \alpha} - \frac{gx^2}{v^2 \cos^2 \alpha}. \quad (4)$$

Виконаємо тригонометричну підстановку $\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha$:

$$z = x \operatorname{tg} \alpha - \frac{gx^2}{2v^2 \cos^2 \alpha}. \quad (5)$$

Далі, аналогічно, виконаємо підстановку $\frac{1}{\cos^2 \alpha} = 1 + \operatorname{tg}^2 \alpha$

$$z = x \operatorname{tg} \alpha - \frac{gx^2}{2v^2} (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha). \quad (6)$$

У формулі (6) розкриємо дужки і здійснимо її спрощення:

$$0 = -\frac{gx^2}{2v^2} \operatorname{tg}^2 \alpha + x \operatorname{tg} \alpha - \frac{gx^2}{2v^2} - z. \quad (7)$$

Розглядаючи вираз (7) як квадратне рівняння відносно $\operatorname{tg} \alpha$, застосуємо формулу визначення коренів цього рівняння:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{-x \pm \sqrt{x^2 - \frac{-gx^2}{2v^2} \left(\frac{-gx^2}{2v^2} - z \right)}}{2 \frac{-gx^2}{2v^2}}. \quad (8)$$

Помножимо чисельник і знаменник на вираз $-\frac{v^2}{x}$. Потім перенесемо вираз $\frac{v^4}{x^2}$ під знак кореня і одержимо:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v^2 \pm \sqrt{v^4 - g(gx^2 + 2v^2z)}}{gx}. \quad (9)$$

На завершення застосуємо до кожної частини арктангенс:

$$\alpha = \arctg \frac{v^2 \pm \sqrt{v^4 - g(gx^2 + 2v^2z)}}{gx}. \quad (10)$$

В результаті одержано два корені рівняння, які визначають описи двох кутів. А саме кутів вильоту тіла, які забезпечують існування настільної і навісної траєкторії його руху. Тобто два корені рівняння відповідатимуть двом можливим кутам запуску за умови, що вони не уявні. В протилежному випадку можна стверджувати, що початкова швидкість фізичного тіла недостатньо велика для досягнення ним вибраної точки (x, y) . Отже, формула (10) дозволяє знайти необхідний кут запуску без якихось обмежень.

При моделюванні геометричної форми траєкторії переміщення контейнера з вогнегасною речовиною приділимо увагу її адекватності. Для цього в диференціальні рівняння введено певну кількість параметрів. На даному етапі досліджень будуть враховані основні фізичні величини, які суттєво впливатимуть на форму траєкторії.

За основу розрахунків оберемо диференціальні рівняння [12, 13]:

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} &= -\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 C_f \frac{\rho S \cos \alpha}{2m}; \\ \frac{d^2z}{dt^2} &= -g - \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 C_f \frac{\rho S \sin \alpha}{2m}; \end{aligned} \quad (11)$$

де m – маса контейнера; α – кут вильоту контейнера; C_f – безрозмірний коефіцієнт опору форми контейнера; ρ – щільність середовища (повітря), $(\text{кг}/\text{м}^3)$; v – швидкість вітру (або тіла в потоці), $(\text{м}/\text{с})$; S – характерна площа перпендикулярно потоку вітру, (м^2) ; для сферичних тіл S є функцією від об'єму: $S = \pi R^2$.

Було складено *maple*-програму побудови зазначених траєкторій (10), які досягають заданої точки на будівлі. Фрагмент програми наведено на рис. 1.

```

alpha1:=
arctan((v0^2 - sqrt(v0^4-g*(g*L^2 + 2*H*v0^2)))/(g*L));
strim1:= plot([x(t,v0,alpha1,m,Cf,rho,S),
          y(t,v0,alpha1,m,Cf,rho,S), t=0..2.3], scaling=CONSTRAINED,
color=blue,thickness=3,linestyle=4):
alpha2:=
arctan((v0^2 + sqrt(v0^4-g*(g*L^2 + 2*H*v0^2)))/(g*L));
strim2:= plot([x(t,v0,alpha2,m,Cf,rho,S),
          y(t,v0,alpha2,m,Cf,rho,S), t=0..3.5], scaling=CONSTRAINED,
color=red,thickness=3,linestyle=4):

```

Рис. 1. Фрагмент *maple*- програми побудови траєкторій руху контейнера

Вирази для функцій $x(t)$ і $y(t)$ одержуються в результаті розв'язання диференціальних рівнянь руху контейнера (1) при таких початкових умовах:

$$x0:=0: y0:=0: v0_x:=v0*\cos(\alpha): v0_y:=v0*\sin(\alpha):$$

де $v0$ – початкова швидкість вильоту контейнера. В результаті отримали аналітичні

вирази для функцій $x(t)$ та $y(t)$, що визначають координати траєкторії руху контейнера. Аналітичні вирази мають громіздкий вигляд і тут не наводяться. Переконавшись у їх достовірності зможемо за допомогою тестових розрахунків. В програмі на рис. 1 α_1 і α_2 – кути (у радіанах) до горизонту, під якими необхідно запустити контейнер, щоб траєкторії перетнулись у необхідній точці вікна будівлі.

На рис. 2 зображено результат виконання складеної Maple- програми. При цьому значення параметрів обрано такі: $m=0,145$; $r=0,069$; $C_f=0,01$; $\rho=1,2$; $S=\pi \cdot r^2$; $g=9,81$. Значення кутів вильоту та початкові швидкості вильоту вказані на рис. 2.

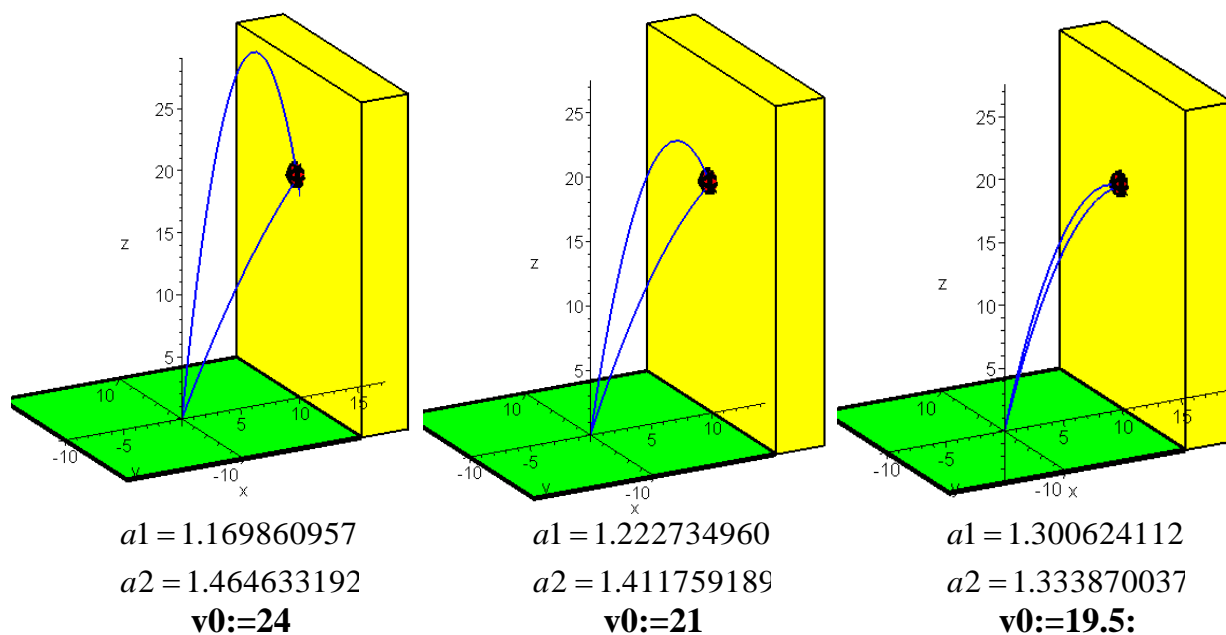


Рис. 2. Ілюстрація залежності кутів вильоту від початкової швидкості вильоту

Побудовані зображення переконують у існуванні деякої мінімальної швидкості вильоту, яка дозволяє поєднуватись (зливатись) навісній та настільній траєкторіям, а також забезпечує потрапляння контейнера у задану точку будівлі.

6. Розрахунок доставки контейнера з мінімальною початковою швидкістю до вікна з пожежею

Другий етап логічного ланцюжка розрахунку траєкторій полягає у обчисленні мінімальної швидкості вильоту, яка проявляється у вигляді умови поєднання (злиття) навісної та настільної траєкторій [12].

Вважатимемо, що контейнер з вогнегасною речовиною випущений з початку координат системи Oxz під кутом α до горизонту. Рівняння руху по параболічній траєкторії має вигляд:

$$z = x \operatorname{tg} \alpha - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}. \quad (12)$$

Необхідно визначити мінімальну початкову швидкість вильоту, здатну доставити тіло з точки початку координат до наперед заданої точки з координатами $M(L, H)$. Підставимо координати точки $M(L, H)$ в рівняння траєкторії руху тіла. В результаті одержимо:

$$H = L \operatorname{tg} \alpha - \frac{gL^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}. \quad (13)$$

Це еквівалентно умовам поставленої задачі.

Рівняння (13) встановлює зв'язок між кутом вильоту α та мінімальною початковою швидкістю v_0 , необхідної для того, щоб тіло досягло заданої точки. Для одержання прийнятного для практики розв'язку необхідно обчислити похідну функції (13) по α , щоб знайти критичне значення α_K кута α , при якому початкова швидкість буде мінімальна:

$$0 = \frac{L}{\cos^2 \alpha} + \frac{gL^2}{v_0^3 \cos^2 \alpha} \frac{dv_0}{d\alpha} - \frac{gL^2 \sin \alpha}{2v_0^2 \cos^3 \alpha}. \quad (14)$$

При критичному куті α_K матимемо $dv_0/d\alpha = 0$. Із рівняння (14) слідує співвідношення:

$$\operatorname{tg} \alpha_K = \frac{v_0^2}{gL}. \quad (15)$$

З врахуванням рівняння (15) і тотожності $1 + \operatorname{tg}^2 \alpha = \frac{1}{\cos^2 \alpha}$, з рівняння (12) отримаємо:

$$H = \frac{v_0^2}{g} - \frac{gL^2}{2v_0^2} \left(1 + \frac{v_0^4}{g^2 L^2} \right), \quad (16)$$

що еквівалентно виразу:

$$H = \frac{v_0^2}{2g} - \frac{gL^2}{2v_0^2}. \quad (17)$$

Вираз (17) можна переписати [1–3] у вигляді бікватратного рівняння відносно v_0 :

$$v_0^4 - 2gHv_0^2 - g^2L^2 = 0. \quad (18)$$

Розв'язок рівняння (18) має вигляд:

$$v_0 = \sqrt{gH} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{H}\right)^2}}. \quad (19)$$

Критичне значення кута α_K для досягнення мінімальної швидкості вильоту визначається шляхом підключення рівняння (19) до рівняння (15):

$$\operatorname{tg}\alpha_{\text{к}} = \frac{H}{L} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{H} \right)^2} \right). \quad (20)$$

Покажемо, що траєкторія з мінімальною початковою швидкістю не досягає екстремуму у положенні точки цілі. Використовуючи рівняння (14) розрахуємо горизонтальне положення максимальної висоти траєкторії. Для цього скористаємося рівнянням $dz/dx=0$. Отже, положення максимальної висоти (екстремуму функції з (14)) знаходиться на відстані:

$$x = \frac{v_0^2}{g} \frac{\operatorname{tg}\alpha_{\text{к}}}{1 + \operatorname{tg}^2\alpha_{\text{к}}}. \quad (21)$$

А з врахуванням формули (15) одержимо іншу (реальну) відстань:

$$x = \frac{L}{1 + (gL/v_0^2)^2}. \quad (22)$$

Вираз (22) визначає місце максимальної висоти переміщення тіла. Максимум досягається перед точкою цілі. Це означає, що контейнер на кінцевій частині шляху завжди рухатиметься по навісній траєкторії до точки доставки. Ця властивість траєкторії з мінімальною початковою швидкістю руху виявилась корисною для практики застосування пневматичної гармати.

Перевіримо цей результат «на цифрах». Для цього використаємо елементи Maple-програми.

А) теоретично знайдене значення мінімальної швидкості (19)

$$v_{0\text{min}} := \sqrt{g \cdot H} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + (L/H)^2}};$$

Б) знайдене значення тангенса критичного кута вильоту (20)

$$\operatorname{tgk} := H \cdot (1 + \sqrt{1 + (L/H)^2}) / L;$$

В) відстань до положення найвищої точки траєкторії (21)

$$x_1 := v_{0\text{min}}^2 \cdot \operatorname{tgk} / (g \cdot (1 + \operatorname{tgk}^2));$$

Г) відстань до положення знайденого екстремуму (22)

$$x_2 := L / (1 + (g \cdot L / v_{0\text{min}}^2)^2);$$

Проілюструємо одержані результати з використанням цифр. Для цього, як приклад, оберемо відстань до стіни $L=10$ і три варіанти висот вікон $h=9$, $h=18$ і $h=27$. В результаті обчислень за наведеними формулами (19–22) отримуємо:

$$\begin{aligned} v_0 &= 16,89911241; \operatorname{tgk} = 2,245362405; x_1 = 10,81905925; x_2 = 8,944542900; \\ v_0 &= 20,19059187; \operatorname{tgk} = 3,859126028; x_1 = 10,09058091; x_2 = 9,452613939; \\ v_0 &= 23,79229567; \operatorname{tgk} = 5,579236010; x_1 = 10,02066233; x_2 = 9,708430785. \end{aligned}$$

Отже, розрахунки вказують на те, що максимум функція (22) досягатиме на відстані меншою, ніж відстань до стіни. А це вказує на те, що траєкторія на прикінцевій фазі буде настільною. Тобто, контейнер прибуде до вікна з мінімальною кінетичною енергією, що мінімізує ймовірність пошкоджень сусідніх вікон у разі помилок у розрахунках траєкторії руху.

На завершення додамо, що дослідження стосовно мінімальної стартової швидкості спрямовані на економне використання стисненого повітря в процесі оперативного застосування пневматичної гармати. Для економії цього ресурсу доцільно здійснювати результативні «постріли» з мінімальним тиском для забезпечення необхідної мінімальної швидкості вильоту контейнера.

7. Розрахунок траєкторії доставки контейнера до вікна за двома відомими відстанями

Третій етап логічного ланцюжка розрахунку траєкторій доставки контейнера до палаючого вікна полягає у одержанні виразів для обчислення значень початкової швидкості вильоту і кута вильоту. Особливість результату у тому, що для опису використовуються лише два вхідні параметри – задана висота (центральної точки) вікна до фундаменту будівлі, а також задана відстань від імпульсного вогнегасника до стіни [13]. Ці відстані вимірюються лазерним далекоміром, який використовується у будівництві.

Апріорі вважається, що центр мас контейнера рухатиметься по параболічній траєкторії. Саме цей факт суттєвий при одержанні залежностей. Суттєвим буде і умовне поняття координат палаючого вікна, яке вимірюється такими відстанями: L – від пневматичної гармати до стіни, а також H – висотою положення вікна від фундаменту.

Для реалізації розглянутого способу необхідні лише значення відстаней L і H , виміряних за допомогою, наприклад, лазерного далекоміра Flus «FL-60», який використовується у будівництві. А також необхідні формули для обчислення миттєвої швидкості v_0 вильоту контейнера, і значення кута вильоту α відносно рівня горизонту. Ці параметри можна вирахувати також через зазначені координати L і H , які слід сприймати як початкові дані розв'язання задачі параболічного руху контейнера.

Для опису траєкторії доставки контейнера до верхніх поверхів будівлі залучимо відомі з фізики рівняння [1], які пов'язують між собою фізичні та геометричні параметри, що дозволяють визначити точки траєкторії руху.

Нехай в декартовій системі координат $Oxuz$ задано точку $M(L, H)$, розташовану у вертикальній площині. З початку координат цієї площини за допомогою пневматичної гармати вилітає контейнер з вогнегасною речовиною, наприклад, у формі кулі. Користуючись лише координатами L і H точки цілі $M(L, H)$, визначимо значення кута α вильоту контейнера, а також значення мінімальної швидкості v_0 для досягнення точки цілі M [2, 3].

Рівняння руху контейнера задамо у параметричній формі:

$$x = v_0 \cos \alpha t; z = v_0 \sin \alpha t - \frac{gt^2}{2}. \quad (23)$$

Виключимо з першої формули (23) час t і підставимо його в друге рівняння. В результаті одержимо рівняння руху контейнера в координатній формі:

$$z = x \operatorname{tg} \alpha - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}. \quad (24)$$

Припустимо, що траєкторія руху проходить через точку цілі $M(L, H)$:

$$H = x \operatorname{tg} \alpha - \frac{gL^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}. \quad (25)$$

Перепишемо рівняння (25) у вигляді:

$$gL^2 \operatorname{tg}^2 \alpha - 2Lv_0^2 \operatorname{tg} \alpha + gL^2 + 2Hv_0^2 = 0. \quad (26)$$

Вираз (26) розглянемо як квадратне рівняння відносно параметра $\operatorname{tg} \alpha$. Для визначення критичного значення цього параметра використаємо аналітичні можливості мови `maple`. Для цього функцію (24) перепишемо у вигляді (25), використовуючи синтаксис мови `maple`. Далі визначимо похідну функції F по параметру $\operatorname{tg} \alpha$ за допомогою оператора `solve`:

$$\begin{aligned} \mathbf{F} := & g * L^2 * \tan(\alpha)^2 - 2 * L * v_0^2 * \tan(\alpha) + \\ & + (g * L^2 + 2 * H * v_0^2) = 0; \end{aligned} \quad (27)$$

$$F := gL^2 \tan(\alpha)^2 - 2Lv_0^2 \tan(\alpha) + gL^2 + 2Hv_0^2 = 0; \quad (28)$$

$$\mathbf{\text{solve}(F, \tan(\alpha));} \quad (29)$$

$$\frac{2v_0^2 + 2\sqrt{v_0^4 - g^2L^2 - 2gHv_0^2}}{2gL}. \quad (30)$$

Вираз під знаком кореня квадратного повинен дорівнювати нулю (бо шукаємо критичне значення параметра). Розв'яжемо нове рівняння відносно швидкості вильоту v_0 :

$$\mathbf{f := v_0^4 - g^2L^2 - 2gHv_0^2 = 0;} \quad (31)$$

$$f := v_0^4 - g^2L^2 - 2gHv_0^2; \quad (32)$$

$$\mathbf{\text{solve}(f, v_0);} \quad (33)$$

$$\sqrt{gH + g\sqrt{H^2 + L^2}}. \quad (34)$$

Корінь розв'язку (33) надасть вираз для обчислення мінімальної швидкості вильоту контейнера. Для обчислення кута вильоту слід використати вирази (29) і (30) з врахуванням того, що функція (27) дорівнює нулю:

$$\tan(\alpha) = 1/2/g*(2*v_0^2+2)/L; \quad (35)$$

$$\tan(\alpha) = \frac{v_0^2 + 1}{gL}. \quad (36)$$

Остаточно одержимо такі формули для розрахунку моделі руху по параболічній траєкторії доставки контейнера з вогнегасною речовиною з початку координат до точки з координатами М (L, H):

$$v_0 = \sqrt{Hg + g\sqrt{L^2 + H^2}}; \quad (37)$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{v_0^2}{gL}\right). \quad (38)$$

В роботі [4] наведено інший спосіб обчислення початкової швидкості та кута вильоту тіла. Це вказує на достовірність одержаних результатів.

Було складено table-програму (рис. 3) побудови таблиці значень початкових швидкостей руху контейнера, а також значень кутів вильоту контейнера відносно рівня горизонту за умови, що відомі висота H «палаючого» вікна від фундаменту будівлі, а також відстань L від імпульсного вогнегасника до стіни.

```

Digits := 6: g:=9.81:
L := 5.: # відстань до будівлі (м)
for i from 3 to 9 do
H := 3*i:
v0[i]:=sqrt(H*g + g*sqrt(L^2+H^2));
alpha[i]:=arctan(v0[i]^2/g/L);
ugol[i]:=evalf(alpha[i]*180/2/Pi);
end do:
print(" відстань від пневмогармати до стіни", L,"м");
print("поверх","_№ 3","_№ 4","_№ 5",
"_№ 6","_№ 7","_№ 8","_№ 9");
print("швидкість",seq(v0[i],i=3..9));
print("радіани ",seq(alpha[i],i=3..9));
print(" градуси ",seq(ugol[i],i=3..9));

```

Рис. 3. Програма побудови таблиці значень швидкостей і кутів

У табл. 1 та табл. 2 наведено приклади результату виконання програми: значення початкових швидкостей і кутів вилітання контейнера, в залежності від відстані від пневматичної гармати до стіни.

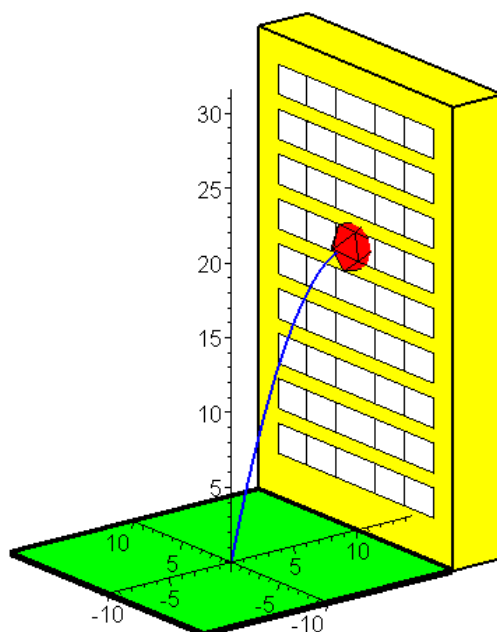
Табл. 1. Відстань від пневматичної гармати до стіни 5 м

поверх	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9
швидкість	13,7583	15,6605	17,3856	18,9696	20,4396	21,8159	23,1137
градуси	37,7363	39,3450	40,3913	41,1190	41,6518	42,0580	42,3772

Табл. 2. Відстань від пневматичної гармати до стіни 10 м

поверх	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9
швидкість	14,8415	16,4608	18,0001	19,4572	20,8371	22,1472	23,3949
градуси	32,9970	35,0488	36,5776	37,7363	38,6342	39,3450	39,9193

Також було складено maple-програму побудови зображення будівлі та траєкторії руху контейнера. На рис. 4 наведено приклад виконання програми.

**Рис. 4. Приклад моделювання будівлі і траєкторії контейнера**

На практиці для зручного використання комп'ютерних описів траєкторій необхідні заздалегідь складені таблиці. Вони вказуватимуть значення кута вильоту контейнера залежно від координати необхідної точки потрапляння контейнера при відомій початковій швидкості вильоту. Для усунення незручності застосування таблиць і забезпечення оперативності розглянемо можливість використання планшета для оперативних розрахунків параметрів траєкторій доставки контейнера. А саме, планшета, де є можливість складати програми, наприклад, мовою Basic for Android-F.

Для цього оберемо вирази (37), (38) для опису v_0 – початкової швидкості вильоту контейнера, та α – кута вильоту.

До речі, мову Basic було спроектовано для вирішення проблем, пов'язаних зі складністю «наукових» комп'ютерних мов. Вона призначалася для користувачів з простішими задачами, не стільки зацікавлених у швидкості обчислень, скільки у можливості використовувати комп'ютер для вирішення своїх конкретних задач.

На рис. 5 наведено фрагмент maple-програми, яка у разі необхідності просто перекладається мовою Basic for Android-F.:

```

g:=9.81: Digits := 5:
L := 20.: # відстань до будівлі (м)
for i from 1 to 9 do
H[i] := 3*i:
v0:=sqrt(H[i]*g + g*sqrt(L^2 + H[i]^2)):
alpha:=arctan(v0^2/g/L):
z:=x*tan(alpha) - g*x^2/(2*v0^2*cos(alpha)^2):
strim[i] := plot(z, x=0..L+0.5, scaling=CONSTRAINED,
color=red,thickness=3,linestyle=4):
end do:
zdn:=line([L,0], [L,29], color=yellow, thickness=5):
for i from 1 to 9 do
okna[i] := disk([L,3*i], 0.5, color=red, thickness=3)
end do:
display(seq(okna[i],i=1..9), seq(strim[i],i=1..9),
zdn, scaling=constrained); #, insequence=true);

```

Рис. 5. Фрагмент програми опису траєкторії руху контейнера залежно від положення точки цілі

На рис. 6 наведено результат виконання програми. Графічно зображено множини траєкторій контейнера залежно від положення точки цілі. Кольоровими точками показано положення віртуальних вікон, де можливе виникнення пожежі. Відстань від пневматичної гармати до стіни будівлі виражається значенням параметра L .

Складена програма реалізована у вигляді анімаційного фільму. Для цього в програму слід активізувати опцію **insequence=true**. Змінною величиною є параметр H – висота положення вікна. В процесі обчислень генеруються кадри траєкторії контейнера, накладених на профіль будівлі.

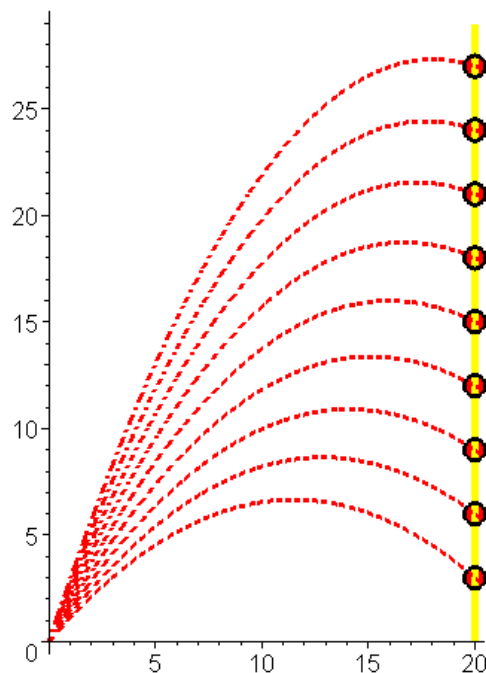


Рис. 6. Множина траєкторій з анімаційного фільму, які досягають віртуальних вікон будівлі

Використовуючи програму з рис. 3 можна скласти таблиці значень кутів і швидкостей при яких траєкторія досягає потрібного зображення віртуального вікна. Користувач планшета може обрати потрібні варіанти для використання.

8. Обговорення результатів способу моделювання траєкторій доставки контейнерів з вогнегасною речовиною

Отримані результати пояснюються можливістю знайти розв'язки диференціальних рівнянь для опису руху по параболічній траєкторії центра мас контейнера з вогнегасною речовиною. Початковими умовами обрано значення миттєвої стартової швидкості контейнера, а також значення кута (відносно горизонту) вильоту контейнера. Вказане визначає головну ідею роботи, за допомогою якої було вирішено поставлену мету роботи. В результаті одержано спосіб геометричного моделювання (параболічної) траєкторії доставки контейнера з вогнегасною речовиною до вікон верхніх поверхів будинків, де виникла пожежа. За умови, що у якості засобу доставки використовується пневматична гармата, для розрахунку дії якої необхідне значення миттєвої стартової швидкості контейнера, а також значення кута (відносно горизонту) вильоту контейнера. Зазначене реалізовано з використанням аналітичних виразів, одержаних за допомогою математичного процесора Maple.

Особливості запропонованого методу і отриманих результатів в порівнянні з існуючими полягають в наступному. Для реалізації числових методів розв'язання диференціальних рівнянь необхідно узгодити вибір метода з точністю обчислень. При цьому виникають питання вибору величини кроків числових обчислень. В процесорі Maple величини цих кроків апріорі зіставляються з необхідною точністю автоматично.

До головних результатів, які можуть враховуватись на практиці є установлений факт стосовно положення максимальної висоти переміщення тіла, коли початкова швидкість вильоту контейнера буде мінімально допустимою. А саме, максимум досягається завжди перед точкою цілі. Це означає, що контейнер на кінцевій частині шляху завжди рухатиметься по навісній траєкторії до точки доставки. Ця властивість траєкторії з мінімальною початковою швидкістю руху повинна бути корисною для практики застосування пневматичної гармати. Але для її реалізації необхідно спроектувати нове пневматичне обладнання. Для прицільної доставки вогнегасних речовин в осередок пожежі імпульсний вогнегасник повинен забезпечуватись засобами лазерного прицілювання, а також вимірювання кутів та далекоміром.

Так як початкова швидкість вильоту контейнера залежить від величини тиску стисненого повітря в пневматичній гарматі, то для практики пожежогасіння доцільними будуть дослідження, спрямовані на раціональне використання стисненого повітря в процесі оперативного застосування пневматичної гармати. Для економії цього ресурсу необхідно здійснювати «постріли» з мінімальним тиском для забезпечення необхідної швидкості вильоту контейнера. Тобто необхідно забезпечити мінімальну з можливих швидкостей вильоту контейнера, щоб контейнер досягнув заданої цілі (якщо це можливо для даного кута вильоту).

Розвиток проведеного дослідження доцільно спрямувати на моделювання ситуацій, які можуть виникнути в процесі ліквідації пожежі. Для такої дистанційної доставки контейнера слід враховувати фактор впливу бокового вітру на фор-

му траєкторії. Необхідно розробити комп'ютерну програму, яка б дозволила розрахувати траєкторію за умови наявності бокового вітру з відомою швидкістю.

Одержані результати є корисними і важливими, адже вони дозволяють започаткувати нову тактику гасіння пожеж у багатоповерхових будівлях. Крім одержаних в даній статті результатів, для її реалізації необхідне нове пневматичне обладнання. Для прицільної доставки вогнегасних речовин в осередок пожежі імпульсний вогнегасник повинен забезпечуватись засобами лазерного прицілювання, а також вимірювання кутів та далекоміром.

Кінцевою метою проведених досліджень стане моделювання ситуацій пожежогасіння висотних будівель з використанням сучасних планшетів.

9. Висновки

1. Описано кути вильоту контейнера, які забезпечують перетин настільної і навісної траєкторій в заданій точці цілі (у палаючому вікні будівлі). Наведено формулу для визначення пари кутів вильоту контейнера. Показано, що зазначені траєкторії перетинаються в заданій точці цілі (у палаючому вікні будівлі). Розглянуто варіанти швидкостей вильоту та їм відповідні значення кутів вильоту. Для початкових швидкостей $v_0=24$, $v_0=21$ і $v_0=19,5$ одержано відповідні значення кутів вильоту. Цим прикладом показано, що існує початкова швидкість ($v_0=20$ умовних одиниць) вильоту контейнера, при якій настільна і навісна траєкторії поєднуються (ніби склеюються). Така властивість визначає мінімальну початкову швидкість вильоту.

2. Розраховано мінімальну стартову швидкість, здатну забезпечити досягнення палаючого вікна будівлі. Наведено формулу обчислення мінімальної початкової швидкості для досягнення палаючого вікна будівлі. Траєкторія з мінімальною початковою швидкістю має унікальну властивість. А саме, максимальна висота траєкторії переміщення завжди досягається перед точкою цілі. Це підтверджується таким прикладом, де x_1 – абсциса екстремуму параболи, а x_2 – абсциса розрахованої траєкторії.

Проілюструємо одержані результати з використанням цифр. Для цього, як приклад, оберемо відстань до стіни $L=10$ і три варіанти висот вікон $h=9$, $h=18$ і $h=27$. В результаті обчислень за наведеними формулами (19–22) отримали відповідні значення, які вказують на те, що траєкторія на прикінцевій фазі буде настільною. Це означає, що контейнер на кінцевій частині шляху завжди рухатиметься по навісній траєкторії до точки доставки. Так як початкова швидкість вильоту контейнера залежить від величини тиску стисненого повітря в пневматичній гарматі, то зазначене сприяє його раціональному використанню, що актуально для оперативного застосування пневматичної гармати.

3. Описано траєкторію доставки контейнера до вікна заданої висоти над фундаментом за умови відомої відстані від імпульсного вогнегасника до стіни. Наведено формули для обчислення миттєвої швидкості вильоту контейнера, а також значення кута вильоту відносно рівня горизонту. Цим визначено параболічну траєкторію доставки контейнера до вікна заданої висоти H над фундаментом за умови відомої відстані L від імпульсного вогнегасника до стіни. У достовірності результатів можна переконатися за допомогою наведеної table-програми побудови таблиці значень швидкостей і кутів. Розглянуто можливість використання планшета для оперативних розрахунків параметрів траєкторій доставки контейнера.

Література

1. 073: Fire Extinguisher Ball, just throw it in the fire! How to make it. URL: <https://www.hamido.at/fire-ball/>
2. Mizrahi J. Minimum velocity of a projectile in parabolic motion to pass above a fence. Making Physics Clear. URL: <https://makingphysicsclear.com/minimum-velocity-of-a-projectile-in-parabolic-motion-to-pass-above-a-fence/>
3. Mizrahi J. Ballistic motion – Maximum horizontal reach when firing from a height. Making Physics Clear. URL: <https://makingphysicsclear.com/ballistic-motion-maximum-horizontal-reach-when-firing-from-a-height/>
4. Mizrahi J. Ballistic problem – Maximum horizontal reach when firing toward a high place. Making Physics Clear. URL: <https://makingphysicsclear.com/ballistic-problem-maximum-horizontal-reach-when-firing-toward-a-high-place/>
5. Kamaldheeriya Maths easy. Derivation of Minimum Velocity and Angle to Hit a given point Projectile Motion #kamaldheeriya. 2020. YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=yR5C0XA8iI0>
6. Miranda E. N., Nikolskaya S., Riba R. Minimum and terminal velocities in projectile motion. Revista Brasileira de Ensino de Física. 2004. Vol. 26. № 2. P. 125–127. doi: 10.1590/S0102-47442004000200007
7. Calculating minimum velocity of the projectile needed to hit target in parabolic arc. Game Development Stack Exchange. URL: <https://gamedev.stackexchange.com/questions/17467/calculating-minimum-velocity-of-the-projectile-needed-to-hit-target-in-parabolic>
8. At which point of the trajectory does projectile have minimum velocity. Doubtnut. URL: <https://www.doubtnut.com/question-answer-physics/at-which-point-of-the-trajectory-does-projectile-have-minimum-velocity-643043562>
9. Projectile motion – trajectory equation, definition and formulas. Engineering applications. URL: <https://www.hkdivedi.com/2020/01/projectile-motion-trajectory-equation.html>
10. Projectile Motion. Engineering Fundamentals. URL: https://www.maplesoft.com/content/EngineeringFundamentals/1/MapleDocument_1/Projectile%20Motion.pdf
11. Калиновський А. Я., Поліванов О. Г. Спосіб складання таблиці кутів доставки вогнегасних речовин до багатоповерхової будівлі. The 5th International scientific and practical conference «European scientific congress» Barca Academy Publishing, Madrid, Spain. 2023. P. 54–60. URL: <https://sci-conf.com.ua/vii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-european-scientific-congress-7-9-08-2023-madrid-ispaniya-arhiv/>
12. Калиновський А. Я., Поліванов О. Г. Про мінімальну початкову швидкість тіла, випущеного під кутом до горизонту. The 9th International scientific and practical conference «Scientific research in the modern world» Perfect Publishing, Toronto, Canada. 2023. P. 155–160. URL: <https://sci-conf.com.ua/xi-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-scientific-research-in-the-modern-world-24-26-08-2023-toronto-kanada-arhiv/>
13. Калиновський А. Я., Поліванов О. Г. Розробка способу розрахунку параметрів доставки контейнера-вогнегасника до вікон висотних будинків. The 7th International scientific and practical conference «Innovations and prospects in modern science» SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 2023. P. 68–76. URL: <https://sciconf.com.ua/ix-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-innovations-and-prospects-in-modern-science-28-30-08-2023-stokgolm-shvetsiya-arhiv/>

A. Kalinovsky, PhD, Associate Professor, Head of the Department
L. Kutsenko, DSc, Professor, Professor of the Department
O. Polivanov, Lecturer of the Department
B. Kryvoshei, PhD, Associate Professor
O. Savchenko, PhD, Associate Professor
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

DELIVERY TRAJECTORY MODELING FIRE EXTINGUISHING CONTAINER TO THE UPPER FLOORS OF BUILDINGS

A method is presented for geometrically modeling the trajectory of delivery of a container with a fire extinguishing agent to the windows of the upper floors of houses where a fire occurred. The Typhoon-10 pulse fire extinguisher, which is used as a pneumatic gun, is used as a starting agent. This allows fire extinguishing agents to be delivered to the fire zone discretely, placed in a special container. To determine a rational trajectory for container delivery to the upper floors of the building, differential equations known from mechanics and their solutions were used. The resulting relationships connect the parameters characteristic of the points of the desired trajectory. An addition to these results will be the dependencies found in this work to describe the overhead and floor trajectories that intersect at the point of the burning window of the building. The values of the minimum starting speed for delivering a container to a predetermined window of a building on the required floor have also been determined. It is assumed that for calculations the height of the burning window (from the foundation of the building) is known, and the distance from the pulse fire extinguisher to the wall of the building is also known. Maple was compiled – a program for checking the obtained dependencies by constructing delivery trajectories using computer graphics. The results can be obtained in the form of a table, where the initial speeds and departure angles of the container depend on the floor number of the building. The conducted research is aimed at developing tactics for extinguishing fires in multi-storey buildings using the throwing method (or throwing, using Fire extinguisher Ball). This technology is characterized by the efficiency of fire extinguishing by fire and rescue units, regardless of the condition of the access roads to the building, as well as the existence of various obstacles directly in the yard in front of the house. All this will prevent the spread of fire due to its prompt localization and elimination.

Keywords: container, fire extinguishing agent, pulse fire extinguisher, point of intersection of trajectories, minimum starting speed

References

1. 073: Fire Extinguisher Ball, just throw it in the fire! How to make it. Available at: <https://www.hamido.at/fire-ball/>
2. Mizrahi, J. Minimum velocity of a projectile in parabolic motion to pass above a fence. Making Physics Clear. Available at: <https://makingphysicsclear.com/minimum-velocity-of-a-projectile-in-parabolic-motion-to-pass-above-a-fence/>
3. Mizrahi, J. Ballistic motion – Maximum horizontal reach when firing from a height. Making Physics Clear. Available at: <https://makingphysicsclear.com/ballistic-motion-maximum-horizontal-reach-when-firing-from-a-height/>
4. Mizrahi, J. Ballistic problem – Maximum horizontal reach when firing toward a high place. Making Physics Clear. Available at: <https://makingphysicsclear.com/ballistic-problem-maximum-horizontal-reach-when-firing-toward-a-high-place/>
5. Kamaldheeriya Maths easy. (2020). Derivation of Minimum Velocity and Angle to Hit a given point Projectile Motion #kamaldheeriya, YouTube. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=yR5C0XA8iI0>
6. Miranda, E. N., Nikolskaya, S., Riba, R. (2004). Minimum and terminal velocities in projectile motion. Revista Brasileira de Ensino de Física, 26(2), 125–127. doi: 10.1590/S0102-47442004000200007
7. Calculating minimum velocity of the projectile needed to hit target in parabolic arc. Game Development Stack Exchange. Available at: <https://gamedev.stackexchange.com/>

com/questions/17467/calculating-minimum-velocity-of-the-projectile-needed-to-hit-target-in-parabolic

8. At which point of the trajectory does projectile have minimum velocity. Doubtnut. Available at: <https://www.doubtnut.com/question-answer-physics/at-which-point-of-the-trajectory-does-projectile-have-minimum-velocity-643043562>

9. Projectile motion – trajectory equation, definition and formulas. Engineering applications. Available at: <https://www.hkdivedi.com/2020/01/projectile-motion-trajectory-equation.html>

10. Projectile Motion. Engineering Fundamentals. Available at: https://www.maplesoft.com/content/EngineeringFundamentals/1/MapleDocument_1/Projectile%20Motion.pdf

11. Kalynovskyi, A. Ya., Polivanov, O. H. (2023). Sposib skladannia tablytsi kutiv dostavky vohnehasnykh rehovyn do bahatopoverkhovoi budivli. The 5th International scientific and practical conference «European scientific congress» Barca Academy Publishing, Madrid, Spain, 54–60. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/18121>

12. Kalynovskyi, A. Ya., Polivanov, O. H. (2023). Pro minimalnu pochatkovu shvydkist tila, vypushchenoho pid kutom do horyzontu. The 9th International scientific and practical conference «Scientific research in the modern world» Perfect Publishing, Toronto, Canada, 155–160. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/18191>

13. Kalynovskyi, A. Ya., Polivanov, O. H. (2023). Rozrobka sposobu rozrakhunku parametriv dostavky konteynera-vohnehasnyka do vikon vysotnykh budynkiv. The 7th International scientific and practical conference «Innovations and prospects in modern science» SSPG Publish, Stockholm, Sweden, 68–76. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/18190>

Надійшла до редколегії: 21.09.2023

Прийнята до друку: 08.11.2023