

УДК 514.18 +515.2

## МОДЕЛЮВАННЯ ДОСТАВКИ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН З ВИКОРИСТАННЯМ КОНТЕЙНЕРІВ У ВИГЛЯДІ ГАНТЕЛІ

Куценко Л.М., д.т.н.,

[leokuts@i.ua](mailto:leokuts@i.ua), ORCID: 0000-0003-1554-8848

Калиновський А. Я., к.т.н.,

[kalinovskiy.a@nuczu.edu.ua](mailto:kalinovskiy.a@nuczu.edu.ua), ORCID: 0000-0002-1021-5799

*Національний університет цивільного захисту України (м. Харків, Україна)*

Адашевська І.Ю., к.т.н.,

[Adashevskia@ukr.net](mailto:Adashevskia@ukr.net), ORCID: 0000-0001-5447-5114

Шеліхова І. Б., к.т.н.

[inessa.shelikhova@gmail.com](mailto:inessa.shelikhova@gmail.com), ORCID: 0000-0002-5637-1850

*Національний технічний університет ХПІ (м. Харків, Україна)*

*Запропонована геометрична модель нового способу доставки вогнегасної речовини в зону пожежі, розташованої на значній відстані. Ідея доставки основана на механічній операції метання. Для цього речовину (наприклад, вогнегасний порошок) поміщають у тверду оболонку – спеціальний контейнер. Після доставки за допомогою стартового пристрою до місця пожежі контейнер повинен вивільнити речовину, що сприятиме гасінню пожежі.*

*У відомому способі віддаленої доставки вогнегасної речовини використовується пневматична гармата з контейнером циліндричної форми. В процесі доставки циліндр повинен обертатися навколо своєї осі для забезпечення стійкості руху. Розкручування циліндра при його проходженні дулом гармати виконує спеціальна турбіна. При функціонуванні турбіни виникають складнощі регулювання розподілу потоків стисненого повітря. Крім того, потрібно слідкувати за герметичністю пневматичної частини гармати.*

*У новому способі доставки використовується контейнер у вигляді двох рознесених вантажів, подібний спортивній гантелі. Ініціювання руху гантелі здійснюється завдяки одночасній дії вибухових імпульсів, спрямованих на кожний її вантаж заздалегідь розрахованим чином. В результаті утворюється обертано-поступальний рух контейнера. Для опису динаміки руху гантелі визначено лагранжіан, а також складено та розв'язано систему диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду. Наведено приклади моделювання траєкторій руху центрів мас вантажів гантелі з урахуванням опору повітря.*

*Запропонований спосіб планується покласти в основу нової технології пожежогасіння. Про це свідчить нова схема запуску гантелі за допомогою вибухових імпульсів зарядів двох піропатронів. Одержані результати дозволяють оцінити необхідні для метання величини вибухових імпульсів, а*

також оцінити відповідні значення відстаней доставки гантелі

*Ключові слова:* геометричне моделювання, гантелеподібна форма контейнеру, рівняння Лагранжа другого роду, обертово-поступальний рух контейнера

**Постановка проблеми.** Доставку на велику відстань вогнегасних засобів можна здійснювати за допомогою пристрою типу пневматичної гармати. Для цього речовину (вогнегасний порошок) поміщають у спеціальну тверду оболонку – контейнер, який після його доставки до місця пожежі повинен зруйнуватися і вивільнити речовину і цим сприяти гасінню пожежі. За формою контейнер подібний циліндру, який в процесі польоту для стійкості руху повинен обертатися навколо своєї осі. Для розкручування контейнера при проходженні в стволі гармати використовують спеціальну турбіну. Вона повинна бути достатньо потужною, щоб за короткий час розкрутити масивний контейнер.

В запропонованому способі контейнер має вигляд гантелі – тобто двох рознесених (на невелику відстань) вантажів, сполучених стержнем. В процесі доставки для стійкості руху гантель обертається в межах вертикальної площини навколо свого центра мас. Ініціювання руху гантелі здійснюється завдяки направленій дії зарання розрахованих вибухових імпульсів двох піропатронів. Цим забезпечується обертово-поступальний рух контейнера. При цьому вибухівка оформлена у вигляді піропатрона.

На актуальність розробки геометричної моделі нового способу віддаленої доставки вогнегасної речовини у оболонці гантелеподібної форми вказує наступне. Стартовий пристрій матиме простішу (порівняно з пневматичною гарматою) конструкцію і не потребуватиме зусиль та коштів для підтримки його в робочому стані. У якості рушіїв використовуються не дорогі піропатрони (у порівнянні з системою пневматики). Контейнер має рухатися до кінця польоту в межах вертикальної площини, обертаючись навколо свого центру мас. Це дозволить використати енергію обертання для руйнування контейнера наприкінці польоту від удару об перепону і вивільнення вогнегасної речовини. Така концепція може скласти основу перспективної технології доставки вогнегасних речовин на значну відстань.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** Робота [1] присвячена теоретичним питанням віддаленого способу гасіння пожеж. У роботах [2,3,4] розглянуто особливості застосування пневматичних гармат. У пневматичних гарматах початковий імпульс обертання циліндричному контейнеру надає спеціальна турбіна. Стиснене повітря стимулює поступальний і обертовий рух контейнера під час його переміщення в стволі гармати. Зниження тиску повітря призводить до недостатньої ступені розкрутки масивного контейнера, внаслідок чого контейнер втрачає швидкість польоту.

Варіантом подолання відповідних труднощів може бути розробка

принципово іншого способу доставки вогнегасної речовини у контейнері. Саме такий підхід було вперше описано у роботі [5], однак там не наведено обґрунтування способу. Дослідження обертово-поступального руху гантелі в межах вертикальної площини можна віднести до задач технічної механіки. Вони присвячені розрахункам динаміки твердого тіла з рухомою точкою центра мас. Для розв'язання такого класу задач використовується теорема Кьоніга [6], яка дозволяє виразити кінетичну енергію системи через кінетичну енергію центра мас. Отже, в результаті огляду літературних джерел [1–6] були виявлені питання, ще не досліджені іншими авторами, що дозволило сформулювати ціль статті.

**Формулювання цілей статті** Метою дослідження є розробка геометричної моделі нового способу доставки в зону віддаленої пожежі вогнегасної речовини у твердій оболонці гантелеподібної форми. Необхідно змодельовати обертово-поступальний рух у вертикальній площині контейнера, що дозволить використати енергію обертання для його руйнування наприкінці польоту і вивільнення вогнегасної речовини.

**Основна частина.** За основу оберемо спосіб моделювання переміщення в межах вертикальної площини гантелі, який описано в роботах [7, 8] як поєднання в цілому двох рознесених мас вантажів. На рис. 1 зображено схему початкового положення контейнера у вигляді гантелі в системі координат  $Oxy$ . Контейнер складається з двох вантажів масами  $m_1$  і  $m_2$ , сполучених невагомим стержнем. Центр маси першого вантажу розташований в початку координат. Центр маси другого вантажу розташований на осі  $Ox$  на відстані  $h$  від першого (рис. 1).

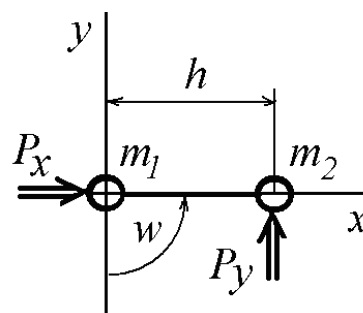


Рис. 1. Схема контейнера у вигляді гантелі

У якості узагальнених оберемо координати  $x(t)$  і  $y(t)$  першого вантажу, а також кут  $w(t)$ , який вісь гантелі утворює з від'ємною частиною осі  $Oy$ . Вважатимемо, що на масу  $m_1$  діє вибуховий імпульс  $P_x$ , а на масу  $m_2$  – одночасно з попереднім діє імпульс  $P_y$ . За допомогою символів початкове положення гантелі визначається так:  $x(0)=0$ ;  $Dx(0)=P_x$ ;  $y(0)=0$ ;  $Dy(0)=0$ ;  $w(0)=0$ ;  $Dw(0)=P_y$ . Тут і далі всі величини в умовних одиницях ( $g=9.81$ ). Опір повітря на даному етапі не враховується.

За допомогою узагальнених координат обчислюємо «віртуальні» координати центрів мас: для першого та другого вантажу, а також координати центру маси всієї гантелі в цілому:

$$x_1 = x(t); \quad y_1 = y(t); \quad x_2 = x(t) + h \sin w; \quad y_2 = y(t) - h \cos w; \quad (1)$$

$$x_C = (m_1 x_1 + m_2 x_2) / (m_1 + m_2); \quad y_C = (m_1 y_1 + m_2 y_2) / (m_1 + m_2);$$

Для опису обертового руху гантелі використаємо лагранжіан  $L=T-P$ , де кінетична і потенціальна енергії обчислюються так [7, 8]:

$$T = 0.5m_1 \left( \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dy}{dt} \right)^2 \right) + 0.5m_2 \left( \frac{dx}{dt} + h \cos(w) \frac{dw}{dt} \right)^2 +$$

$$+ 0.5m_2 \left( \frac{dy}{dt} + h \sin(w) \frac{dw}{dt} \right)^2; \quad (2)$$

$$P = m_1 y g + m_2 g (y - h \cos(w)). \quad (3)$$

Лагранжіан дозволяє скласти систему диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду відносно узагальнених координат  $x(t)$ ,  $y(t)$  і  $w(t)$ :

$$(m_1 + m_2) \frac{d^2 x}{dt^2} - h m_2 \sin(w) \left( \frac{dw}{dt} \right)^2 + h m_2 \cos(w) \frac{d^2 w}{dt^2} = 0;$$

$$g \sin(w) + \cos(w) \frac{d^2 x}{dt^2} + h \frac{d^2 w}{dt^2} + \sin(w) \frac{d^2 y}{dt^2} = 0; \quad (4)$$

$$(m_1 + m_2) \left( g + \frac{d^2 y}{dt^2} \right) + h m_2 \cos(w) \left( \frac{dw}{dt} \right)^2 + h m_2 \sin(w) \frac{d^2 w}{dt^2} = 0.$$

Розв'язувати систему рівнянь (4) будемо чисельним методом Рунге-Кутти в середовищі Maple. В якості значень параметрів оберемо відстань  $h$  між центрами мас вантажів; маси вантажів  $m_1$  і  $m_2$ , а також значення початкових умов  $x(0)=0$ ;  $y(0)=0$  і  $w(0)=\text{Pi}/2$ . Варіювати будемо значеннями миттєвих швидкостей  $Dx(0)$ ;  $Dy(0)$  і  $Dw(0)$ .

В результаті розв'язання системи рівнянь Лагранжа другого роду одержуємо в часі  $t$  наближені вирази для значень кута  $W(t)$ , а також для координат першого вантажу  $X(t)$  і  $Y(t)$ . Ці вирази можуть бути представлені у вигляді послідовності maple-операторів у формулах (1) для обчислення «віртуальних» координат центрів мас.

**Приклад.** Нехай маємо гантель довжиною  $h=5$  і з однаковими масами  $m_1=25$  і  $m_2=25$ . Необхідно оцінити відстань, на яку можна доставити гантель (опір повітря не враховано). Ініціювати рух гантелі будемо з такими початковими умовами:  $x(0)=0$ ;  $Dx(0)=8.23$ ,  $y(0)=0$ ;  $Dy(0)=0$  і  $w(0)=\text{Pi}/2$ ,  $Dw(0)=8.23$ .

В результаті розв'язання системи рівнянь Лагранжа другого роду будемо розрахункову траєкторію для значення  $K=0$  коефіцієнта опору повітря, а також траєкторії руху центрів мас обох вантажів гантелі (рис. 2).

На рис. 3 наведено схему стартової установки [5]. Вона має вигляд металевого кута з двома отворами, які показані в перетині вертикальною площиною. Перед стартом гантель встановлюється на відповідні отвори.

За допомогою одночасної дії вибухових імпульсів піропатронів утворюються імпульси  $P_x$  і  $P_y$  і гантель починає рухатись у вертикальній площині. Анімацію процесу старту можна переглянути на сайті [9]. Зазначимо, що для такого стартового пристрою нема необхідності вкладати кошти в забезпечення його постійної готовності. Він не потребує тривалого розгортання, що важливо для оперативних дій пожежних.

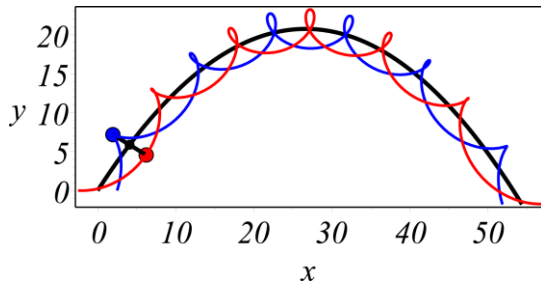


Рис. 2. Траєкторії руху центрів мас вантажів гантелі (час польоту 4,2 сек)

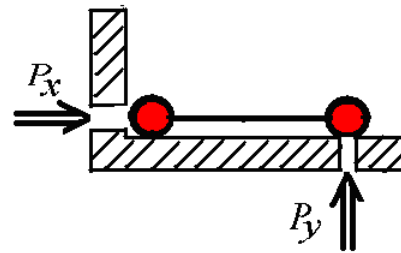


Рис. 3. Схема стартової установки у перетині нормальною площиною

**Висновки.** Запропоноване моделювання траєкторії обертово-поступального руху гантелі базується на розв'язанні диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду. Одержано оцінки дальності польоту гантелі залежно від величин вибухових імпульсів піропатронів як засобів ініціювання її руху. Обертово-поступальний рух контейнера дозволить використати енергію обертання для вивільнення вогнегасної речовини. Кадри комп'ютерної анімації руху гантелі [9] переконують в адекватності геометричної моделі способу доставки об'єкта у вигляді гантелі.

### Література

1. Roponen J. Simulating artillery fire in forest environment. Aalto University. Degree programme in Engineering Physics and Mathematics. 2015. 58 p.
2. Ковалев А.А., Калиновский А.Я., Хмиров И.М. Разработка отдельных аспектов контейнерного метода пожаротушения. *Проблемы пожарной безопасности. Технические науки*. Харьков, 2018. № 44, С. 57-69.
3. Царев А.М., Жуйков Д.А. Механика действия перспективных огнетушащих составов в установках пожаротушения стволового типа контейнерной доставки методом метания. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2007. Т.9. №3. С. 771 – 785.
4. Царев А.М., Жуйков Д.А. Вопросы внешней баллистики полета контейнера для доставки огнетушащих составов в контейнерах методом метания с применением установок пожаротушения стволового типа. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2007. Т.9. №3. С.786 – 795.
5. Куценко Л.М., Калиновський А.Я., Поліванов О.Г. Геометричне моделювання способу метання для боротьби з пожежами. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Вип. 98. Відп. редактор Ванін В. В. – Київ: КНУБА, 2020 –С.94-103.
6. Бабаєв О.А., Кришталь В.Ф. Теоретична механіка-3. Загальні теореми динаміки та елементи аналітичної механіки. К. НТУУ “КПІ”, 2015. 82 с.
7. Rouben Rostamian A Guided Tour of Analytical Mechanics with animations in MAPLE. Department of Mathematics and Statistics UMBC December 2, 2018. 111 p.

8. Rouben Rostamian MATH 490: Special Topics in Mathematics Analytical Mechanics Math 490, Fall 2018. 7 p.
9. Куценко Л.М., Калиновський А.Я., Поліванов, О.Г. Анімаційні ілюстрації до статті "Комп'ютерне моделювання нової технології віддаленої доставки засобів гасіння пожеж"  
URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10860>.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОСТАВКИ ОГNETУШАЩИХ ВЕЩЕСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТЕЙНЕРОВ В ВИДЕ ГАНТЕЛИ**

Куценко Л.Н., Калиновский А.Я., Адашевская И.Ю., Шелихова И.Б.

*Предложена геометрическая модель нового способа доставки огнетушащего вещества в зону пожара, расположенного на значительном расстоянии. Идея доставки основана на механической операции метания. Для этого вещество (например, огнетушащий порошок) помещают в твердую оболочку – специальный контейнер. После доставки при помощи стартового устройства к месту пожара контейнер должен высвободить вещество, что будет содействовать тушению пожара.*

*В известном способе отдаленной доставки огнетушащего вещества используется пневматическая пушка с контейнером цилиндрической формы. В процессе доставки цилиндр должен вращаться вокруг своей оси для обеспечения устойчивости движения. Раскручивание цилиндра при его прохождении дулом пушки выполняет специальная турбина. При функционировании турбины возникает сложность регулирования распределения потоков сжатого воздуха. Кроме того, нужно следить за герметичностью пневматической части пушки.*

*В новом способе доставки используется контейнер в виде двух разнесенных грузов, подобный спортивной гантели. Иницирование движения гантели осуществляется благодаря одновременному действию взрывных импульсов, направленных на каждый ее груз заранее рассчитанным образом. В результате образуется вращательно-поступательное движение контейнера. Для описания динамики движения гантели определен лагранжиан, а также составлена и решена система дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода. Приведены примеры моделирования траекторий движения центров масс грузов гантели с учетом сопротивления воздуха.*

*Предложенный способ планируется положить в основу новой технологии пожаротушения. Об этом свидетельствует новая схема запуска гантели с помощью взрывных импульсов зарядов двух пиропатронов. Полученные результаты позволяют оценить необходимые для метания величины взрывных импульсов, а также оценить*

*соответствующие значения расстояний доставки гантели*

*Ключевые слова: геометрическое моделирование, гантелеподобная форма контейнера, уравнение Лагранжа второго рода, вращательно-поступальное движение контейнера.*

## **MODELING DELIVERY OF EXTINGUISHING SUBSTANCES WITH THE USE OF CONTAINERS IN THE FORM OF A DUMBBELL**

Leonid Kutsenko, Andrii Kalinovskyi, Irina Adashevskaya, Inessa Shelihova

*A geometric model of a new method of delivering a fire extinguishing agent to a fire zone located at a considerable distance is proposed. The delivery idea is based on a mechanical throwing operation. For this, a substance (for example, a fire extinguishing powder) is placed in a hard shell - a special container. After being delivered to the fire site by means of a starting device, the container must release the substance, which will help extinguish the fire. In the known method for the remote delivery of a fire extinguishing agent, an air gun with a cylindrical container is used. During delivery, the cylinder must rotate around its axis to ensure stability of movement. A special turbine is used to untwist the cylinder as it passes by the muzzle of the cannon. During the operation of the turbine, it becomes difficult to regulate the distribution of compressed air flows. In addition, you need to monitor the tightness of the pneumatic part of the gun. The new delivery method uses a two spaced cargo container similar to a sports dumbbell. The initiation of the dumbbell movement is carried out due to the simultaneous action of explosive impulses directed at each of its loads in a pre-calculated manner. The result is a rotational-translational movement of the container. To describe the dynamics of the dumbbell movement, a Lagrangian was determined, and a system of Lagrange differential equations of the second kind was compiled and solved. The examples of modeling the trajectories of the centers of mass of the dumbbell weights with allowance for air resistance are given. The proposed method is planned to be the basis for a new fire extinguishing technology. This is evidenced by a new scheme for launching a dumbbell using explosive impulses of charges from two squibs. The results obtained make it possible to estimate the values of explosive impulses necessary for throwing, as well as to estimate the corresponding values of the dumbbell delivery distances*

*Key words: geometric modeling, dumbbell-like shape of the container, Lagrange equation of the second kind, rotational-translational motion of the container*

### **References**

1. Roponen, J. (2015) Simulating artillery fire in forest environment. Aalto University. Degree programme in Engineering Physics and Mathematics. [in

English]

2. Kovalev, A.A., Kalinovskiy, A.YA., Khmirov, I.M. (2018) Develop specific aspects of the container firefighting method. *Problemy pozharnoy bezopasnosti*. Khar'kov, 44, 57-69 [in Russian].
3. Tsarev, A.M., Zhuykov, D.A. (2007) The mechanics of the action of prospective fire extinguishing compounds in the installations of firefighting of the stem type of container delivery by throwing method. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 9, 3, 771 – 785 [in Russian].
4. Tsarev, A.M., Zhuykov, D.A. (2007) Issues of external ballistics of the container flight for delivery of fire extinguishing trains in containers by throwing with the use of barrel-type firefighting units. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 9, 3, 786 – 795 [in Russian].
5. Kutsenko, L.M., Kalynovskyy, A.YA., Polivanov, O.H. (2020) Geometric modeling of the method of throwing to fight fires. *Prykladna heometriya ta inzhenerna hrafiika*, 98, 94-103 [in Ukranian].
6. Babayev, O.A., Kryshstal, V.F. (2015) Theoretical mechanics-3. General dynamics theorem and elements of analytical mechanics. K. NTUU “KPI” [in Ukranian].
7. Rouben Rostamian (2018) A Guided Tour of Analytical Mechanics with animations in MAPLE. Department of Mathematics and Statistics UMBC December 2 [in English].
8. Rouben Rostamian (2018) MATH 490: Special Topics in Mathematics Analytical Mechanics Math 490, Fall [in English].
9. Kutsenko, L.M. Kalynovskiy, A.YA. Polivanov, O.H. (2020) Animated illustrations for the article "Computer simulation of a new technology for remote delivery of fire extinguishing equipment". Retrieved from: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10860>.