

УДК 514.18 + 614.842

## РОЗРОБКА НОВОГО СПОСОБУ ДОСТАВКИ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН У ЦИЛІНДРИЧНОМУ КОНТЕЙНЕРІ

Калиновський А. Я., к.т.н.,

[ugzu.iart@gmail.com](mailto:ugzu.iart@gmail.com), ORCID: 0000-0002-1021-5799

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

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)

Грицина Н.І., к.т.н.,

[natagritsina@gmail.com](mailto:natagritsina@gmail.com), ORCID: 0000-0002-2043-6085

Харківський національний автомобільно-дорожній університет (Україна)

*Доставка вогнегасних речовин до зони віддаленої пожежі здійснюється з використанням переважно механічної операції метання. Для цього речовину поміщають у спеціальний контейнер. Після доставки за допомогою стартового пристрою до місця пожежі контейнер повинен зруйнуватися і вивільнити речовину, що сприятиме гасінню пожежі. На практиці частіше використовують контейнери циліндричної форми. В якості стартових пристроїв використовують пневматичні гармати. Але «гарматна» технологія пожежогасіння має певні недоліки, серед яких головним є складність надання осевого обертання циліндричному контейнеру для забезпечення стійкості його руху.*

*Зазначений недолік можливо усунути шляхом застосування принципово іншого типу обертання циліндричного контейнера. А саме, пропонується замінити осьове обертання циліндра на його обертово-поступальний рух в межах вертикальної площини. Для цього необхідно використати стартовий пристрій, здатний надати обертово-поступальний рух циліндру. Наведений в роботі стартовий пристрій забезпечує одночасну дію двох вибухових імпульсів піропатронів, спрямованих на кінцеві точки твірної циліндра. В результаті старту циліндр набуває траєкторію переміщення у вертикальній площині.*

*Для опису динаміки руху циліндра у вертикальній площині було складено та розв'язано диференціальні рівняння. Спочатку розв'язано систему диференціальних рівнянь для визначення параболічної траєкторії руху центру мас циліндра залежно від його параметрів - маси, довжини та радіусу. А також від коефіцієнта лобового опору повітря та від координат точки старту, кута і швидкості вильоту циліндра. На другому етапі розв'язано диференціальне рівняння обертання циліндра навколо точки його центру мас за умови, що ця точка рухається по параболічній траєкторії. Наведено приклади моделювання траєкторій руху циліндра залежно від значень параметрів.*

*Ключові слова: геометричне моделювання, циліндричний контейнер, диференціальні рівняння руху, обертово-поступальний рух контейнера.*

**Постановка проблеми.** Ліквідації масштабних пожеж пов'язані з двома ключовими моментами – розробкою високоефективних вогнегасних речовин, а також із способами їх доставки в зону горіння [1]. Традиційний спосіб доставки на велику відстань вогнегасних засобів полягає у використанні пристрою для метання, наприклад, пневматичної гармати. Для цього речовину (вогнегасний порошок) поміщають у спеціальну тверду оболонку циліндричної форми (контейнер), який після його доставки до місця пожежі повинен зруйнуватися, вивільнити речовину - і цим сприяти гасінню пожежі. Відомим прикладом такого способу є стволові установки пневматичних гармат для контейнерної доставки вогнегасних речовин на віддалену відстань [2]. Для стійкості руху в процесі польоту циліндр-контейнер повинен обертатися навколо своєї осі. Але «гарматна» технологія пожежогасіння має певні недоліки, серед яких головним є складність надання осевого обертання масивному циліндричному контейнеру для забезпечення стійкості його руху.

У роботах [3-5] розглянуто принципово інший спосіб доставки контейнера з вогнегасними речовинами. Замість циліндра пропонується використовувати контейнер у вигляді гантелі. Тобто двох вантажів, рознесених на певну відстань і сполучених стержнем. На рис. 1 наведено можливу схему стартової установки, де допомогою одночасної дії вибухових імпульсів піропатронів утворюються імпульси  $P_x$  і  $P_y$  і гантель починає рухатись у вертикальній площині. На рис. 2 зображено траєкторії руху центрів мас вантажів гантелі. Після доставки до зони пожежі оболонки вантажів гантелі мають зруйнуватися і вивільнити вогнегасні речовини.

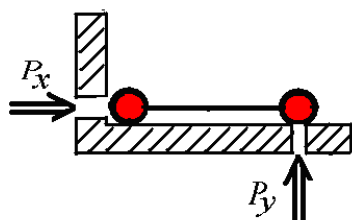


Рис. 1. Схема стартової установки у перетині нормальною площиною

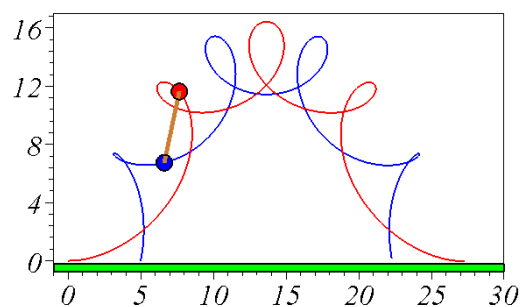


Рис. 2. Траєкторії руху центрів мас вантажів гантелі

В даній роботі розглянуто варіант гантелі, коли враховується лише її стержень, що сполучає вантажі – тобто циліндр. Для опису динаміки руху циліндра у вертикальній площині необхідно скласти та розв'язати два види диференціальних рівнянь. По-перше, необхідно розв'язати систему диференціальних рівнянь для визначення параболічної траєкторії руху

центру мас циліндра залежно від коефіцієнта лобового опору повітря. А також від його параметрів - маси, довжини та радіусу циліндра. Також необхідно врахувати координати точки старту, кута та швидкості вильоту циліндра зі стартового пристрою. По-друге, необхідно розв'язати диференціальне рівняння для опису обертання циліндра навколо точки його центру мас за умови, що ця точка рухається по параболічній траєкторії. Все це вказує на актуальність подальшої тематики розвитку теоретичних основ способу дистанційної контейнерної доставки вогнегасних речовин.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботі [2] розглянуто технологію пожежогасіння з використанням пневматичної гармати як стартового пристрою циліндричних контейнерів з вогнегасною речовиною в зону пожежі. В роботах [3-6] проаналізовано недоліки «гарматної» технології пожежогасіння. Усунення недоліків пропонується здійснити завдяки іншому способу метання гантелеподібного контейнера з вогнегасною речовиною. Використовується стартовий пристрій у вигляді кута з отворами, за допомогою яких вантажам гантелі надаються імпульси руху піропатронами (рис. 1). В результаті утвориться обертово-поступальний рух гантелеподібного контейнера (рис. 2).

Для розв'язання класу задач з рухомим центром мас об'єкта використовується теорема Кьоніга [7]. Вона дозволяє виразити кінетичну енергію системи через кінетичну енергію центра мас. В роботі [8] наведено приклад застосування теореми. Але там відсутні відомості про можливість алгоритмічної реалізації теореми Кьоніга. В роботах [9, 10] наведено спосіб моделювання переміщення гантелі як поєднання руху двох рознесених мас вантажів. При цьому залишаються відкритим питання зв'язку обертово-поступального руху гантелі з параметрами початкових імпульсів для ініціювання руху гантелі, а також з врахуванням лобового опору середовища (повітря).

Отже, в результаті огляду виявлені питання, ще не досліджені іншими авторами, що дозволило сформулювати наступний напрямок досліджень. Розробити геометричну модель нового способу доставки до зони пожежі вогнегасної речовини у циліндричному контейнері, який би здійснював обертово-поступальний рух у вертикальній площині. До переваг нового способу доставки слід віднести використання енергії обертання циліндричного контейнера для його руйнування і вивільнення вогнегасної речовини в зоні пожежі.

**Формулювання цілей статті.** Метою дослідження є розробка геометричної моделі нового способу доставки в зону пожежі вогнегасної речовини у твердій оболонці циліндричної форми. Мета досягається завдяки моделюванню у вертикальній площині обертово-поступального руху контейнерів циліндричної форми з врахуванням лобового опору повітря. Обертово-поступальний рух у вертикальній площині контейнера

дозволить використати енергію обертання для його руйнування наприкінці польоту і вивільнення вогнегасної речовини в зоні пожежі.

**Основна частина.** Наведемо модель обертово-поступального руху контейнерів циліндричної форми у вертикальній площині з врахуванням лобового опору повітря. При цьому враховуються такі параметри:  $m$  – маса циліндра,  $L$  – довжина циліндра,  $r$  – радіус циліндра,  $k$  – коефіцієнт сили тертя повітря,  $x_0$  і  $y_0$  – координати початкової точки руху циліндра,  $w$  – кут вильоту циліндра з точки  $(x_0, y_0)$ ,  $v_0$  – абсолютне значення початкової швидкості циліндра,  $u$  – кут обертання циліндра навколо його центра маси,  $u_0$  – початкове положення кута  $u$ ,  $Du_0$  – початкова швидкість обертання кута  $u$  навколо центра маси,  $J$  – момент інерції циліндра,  $T$  – час польоту циліндра,  $g=9.81$ .

Траєкторію центра маси циліндра в системі координат  $Oxy$  будемо визначати в результаті розв’язання системи диференціальних рівнянь [11].

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m} \frac{dx}{dt}; \quad \frac{d^2y}{dt^2} = -9.81 - \frac{k}{m} \frac{dy}{dt}. \quad (1)$$

Тут компонентами вектора абсолютного значення початкової швидкості циліндра будуть  $\frac{dx}{dt} = v_0 \cos w$ ;  $\frac{dy}{dt} = v_0 \sin w$ .

На практиці розв’язувати систему рівнянь (1) зручно у середовищі пакету `maple` за допомогою програми, фрагмент якої наведено на рис. 3.

```
v0x:=evalf(v0*cos(w)):
v0y:=evalf(v0*sin(w)):
Eqx:=diff(x(t),t,t)=-k/m*diff(x(t),t):
Eqy:=diff(y(t),t,t)=-g-k/m*diff(y(t),t):
solx:=dsolve({Eqx,x(0)=x0,D(x)(0)=v0x},x(t)):
Cx:=(T)->evalf(subs(t=T,rhs(solx))):
soly:=dsolve({Eqy,y(0)=y0,D(y)(0)=v0y},y(t)):
Cy:=(T)->evalf(subs(t=T,rhs(soly))):
plot([Cx(i),Cy(i),i=0..T],color=black,axes=BOXED,
labels=[x,y],thickness=2,scaling=constrained);
```

Рис. 3. Фрагмент програми побудови траєкторії руху центру мас циліндричного контейнера

В результаті виконання програми з рис. 3 одержимо опис траєкторії руху центру мас  $C(Cx, Cy)$  циліндра у аналітичному вигляді (у формулах не змінено вигляд результату інтегрування в середовищі `maple`):

$$Cx = \frac{mv_0 \cos w + x_0 k}{k} - \frac{mv_0 \cos w e^{-\frac{kt}{m}}}{k}; \quad (2)$$

$$Cy = -\frac{(gm + kv_0 \sin w) m e^{-\frac{kt}{m}}}{k^2} - \frac{gmt}{k} + \frac{gm^2 + kmv_0 \sin w + y_0 k^2}{k^2}.$$

За допомогою формул (2) будемо траєкторію руху центру мас циліндра.

Обертання циліндра навколо центра мас в рухомій системі координат визначатимемо як результат розв'язання диференціального рівняння [12].

```

Fu := J*diff(u(t),t,t)=-g*L*cos(u(t))/2;
solu:=dsolve({Fu} union {u(0)=u0,D(u)(0)=Du0},u(t),
numeric, output=listprocedure);
solu:=subs(solu, u(t));

```

Рис. 4. Фрагмент програми визначення кута повороту циліндр навколо цього центру мас

В результаті виконання програми з рис. 4 одержимо опис кута обертання циліндра навколо його центру мас. Для визначення обертово-поступального переміщення циліндра необхідно поєднати розв'язки диференціальних рівнянь з рис. 3 і 4. Для цього було складено `maple` – програму побудови анімаційних зображень руху циліндра залежно від параметрів. Для тестових прикладів оберемо значення параметрів в умовних одиницях:  $m=1$ ;  $r=0.1$ ;  $L=1$ ;  $k=1.5$ ;  $x_0=0$ ;  $y_0=0$ ;  $w=\text{Pi}/4$ ;  $v_0=30$ ,  $u_0=0$ ,  $Du_0=-15$ ,  $g=9.81$ . Момент інерції циліндра обчислимо за формулою  $J=mr^2/4+mL^2/12$  [12],

Наведемо кадри з анімаційного фільму переміщення циліндра у вертикальній площині (циліндр позначено чорним прямокутником). На зображеннях червоним та синім кольорами позначено траєкторії переміщення кінців твірної циліндра. Складена `maple`–програма дозволяє ілюструвати залежність зазначених траєкторій від певних значень параметрів. Наприклад, на рис. 5 і 6 показана залежність траєкторій від абсолютного значення початкової швидкості вильоту циліндра  $v_0$ .

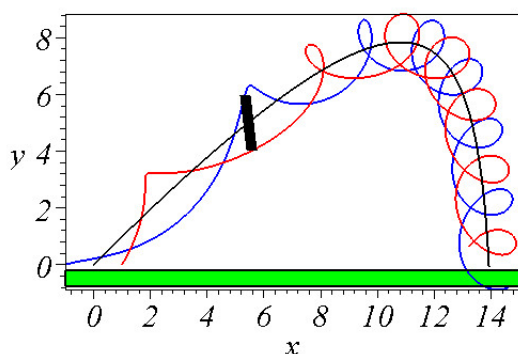


Рис. 5. Траєкторії переміщення циліндра залежно від  $v_0=30$

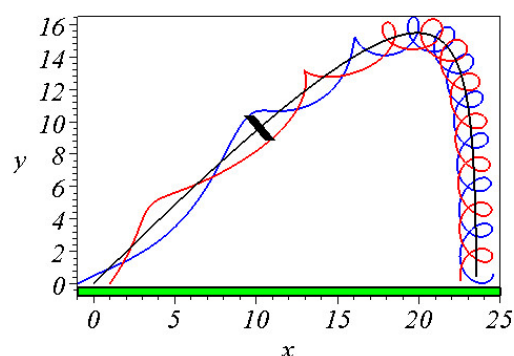


Рис. 6. Траєкторії переміщення циліндра залежно від  $v_0=50$

**Висновки.** Розроблено геометричну модель нового способу доставки в зону віддаленої пожежі вогнегасної речовини у твердій оболонці циліндричної форми. Це досягається завдяки моделюванню у вертикальній

площині обертово-поступального руху контейнерів з врахуванням лобового опору повітря.

### *Література*

1. Ковалев А.А., Калиновский А.Я., Хмиров И.М. Разработка отдельных аспектов контейнерного метода пожаротушения. *Проблемы пожарной безопасности*. Харьков, 2018. № 44, С. 57-69 URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppb\\_2018\\_44\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppb_2018_44_11)
2. 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.
3. Куценко Л.М., Калиновський А.Я., Поліванов О.Г. Геометричне моделювання способу метання для боротьби з пожежами. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ: КНУБА, 2020. Вип. 98. С.94-103. doi: <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2020.98.94-103>
4. Куценко Л.М., Калиновський А.Я., Адашевська І.Ю., Шеліхова І.Б. Моделювання доставки вогнегасних речовин з використанням контейнерів у вигляді гантелі. *Сучасні проблеми моделювання. Технічні науки*. Мелітополь, 2020. Вип.20. С.136-143. doi: <https://doi.org/10.33842/2313-125X/2021/20/136/143>
5. Kutsenko, V. Vanin, A. Naidysh, S. Nazarenko, A. Kalynovskyi, A. Cherniavskyi, O. Shoman, V. Semenova-Kulish, O. Polivanov, E. Sivak. Development of a geometrics mode of a new method for delivering extinguishing substances to a distant fire zone. *Eastern-European Journal of Enterprise Technol.: Applied mechanics*. 2020. Vol. 4, No.7. (106) P. 88-102. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209382>
6. Куценко Л.М., Калиновський А.Я., Поліванов О.Г., Анімаційні ілюстрації до статті "Комп'ютерне моделювання нової технології віддаленої доставки засобів гасіння пожеж" 2020. URL: <http://repositcs.puczu.edu.ua/handle/123456789/10860>
7. Бабаев О.А., Кришталь В.Ф. Теоретична механіка-3. Загальні теореми динаміки та елементи аналітичної механіки. К. НТУУ «КПІ». 2015. 82 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/17661>
8. Егоров А.Д., Потапова И.А. Теорема Кёнига: Простой пример 2020. URL: [https://www.researchgate.net/publication/339149106\\_TEOREMA\\_KENIGA\\_PROSTOJ\\_PRIMER](https://www.researchgate.net/publication/339149106_TEOREMA_KENIGA_PROSTOJ_PRIMER)
9. Rouben Rostamian A Guided Tour of Analytical Mechanics with animations in MAPLE. Department of Mathematics and Statistics UMBC December 2, 2018. 111 p. URL: <https://userpages.umbc.edu/~rostantia/2014-09-math490/lecture-notes.pdf>
10. Rouben Rostamian MATH 490: Special Topics in Mathematics Analytical Mechanics Math 490, Fall 2018. 7 p. URL: <https://userpages.umbc.edu/~rostantia/2018-09-math490>

11. Движение тела в поле тяжести с учётом сопротивления воздуха. 2020. URL: <https://glebgrenkin.blogspot.com/2014/03/blog-post.html>
12. David P. Murdock. Rotation of an Object About a Fixed Axis, 2013. URL: <https://www2.tntech.edu/leap/murdock/books/v2chap1.pdf>

## **РАЗРАБОТКА НОВОГО СПОСОБА ДОСТАВКИ ОГНЕТУШАЩИХ ВЕЩЕСТВ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КОНТЕЙНЕРЕ**

Калиновский А. Я., Шелихова И. Б., Грицына Н.И.

*Доставка огнетушащих веществ в зону отдаленного пожара осуществляется с использованием преимущественно механической операции метания. Для этого вещество помещают в специальный контейнер. После доставки с помощью стартового устройства к месту пожара контейнер должен разрушиться и высвободить вещество, которое позволит потушить пожар. На практике чаще используют контейнеры цилиндрической формы. В качестве стартовых устройств используют пневматические пушки. Но «пушечная» технология пожаротушения имеет определенные недостатки, среди которых главным является сложность предоставления осевого вращения цилиндрическому контейнеру для обеспечения устойчивости его движения.*

*Указанный недостаток предлагается устранить путем применения принципиально иного типа вращения цилиндрического контейнера. А именно, предлагается заменить осевое вращение цилиндра на его вращательно-поступательное движение в пределах вертикальной плоскости. Для этого необходимо использовать стартовое устройство, способное предоставить вращательно-поступательное движение цилиндру. Предполагается, что стартовое устройство обеспечивает одновременное воздействие двух взрывных импульсов пиропатронов, направленных на конечные точки образующей цилиндра. В результате старта цилиндр приобретает необходимую траекторию перемещения в вертикальной плоскости.*

*Для описания динамики движения цилиндра в вертикальной плоскости были составлены и решены дифференциальные уравнения. Сначала решена система дифференциальных уравнений для определения параболической траектории движения центра масс цилиндра в зависимости от его параметров: массы, длины и радиуса, а также от коэффициента лобового сопротивления воздуха и от координат точки старта, угла и скорости вылета цилиндра. На втором этапе решено дифференциальное уравнение вращения цилиндра вокруг точки его центра масс при условии, что эта точка движется по параболической траектории. Приведены примеры моделирования траекторий движения цилиндра в зависимости от значений параметров.*

*Ключевые слова: геометрическое моделирование, цилиндрический*



*контейнер, дифференциальные уравнения движения, вращательно-поступательное движение контейнера.*

## **DEVELOPMENT OF A NEW METHOD FOR DELIVERY OF FIRE EXTINGUISHING SUBSTANCES IN A CYLINDRICAL CONTAINER**

Andrii Kalinovskyi, Inessa Shelikhova, Natalia Hrytsyna

*The delivery of fire extinguishing substances to a distant fire zone is carried out using a predominantly mechanical throwing operation. For this, the substance is placed in a special container. After being delivered to the site of the fire by means of the launching device, the container must collapse and release a substance that will allow the fire to be extinguished. In practice, cylindrical containers are used more often. Pneumatic guns are used as starting devices. But the "cannon" fire extinguishing technology has certain disadvantages, among which the main one is the difficulty of providing axial rotation of a cylindrical container to ensure the stability of its movement.*

*This disadvantage is proposed to be eliminated by using a fundamentally different type of rotation of the cylindrical container. Namely, it is proposed to replace the axial rotation of the cylinder with its rotational-translational movement within the vertical plane. To do this, it is necessary to use a starting device capable of providing a rotational-translational motion to the cylinder. It is assumed that the starting device provides the simultaneous action of two explosive impulses of the squibs directed at the end points of the generatrix of the cylinder. As a result of the start, the cylinder acquires the required trajectory of movement in the vertical plane.*

*To describe the dynamics of motion of a cylinder in a vertical plane, differential equations were compiled and solved. First, a system of differential equations was solved to determine the parabolic trajectory of the cylinder's center of mass, depending on its parameters: mass, length and radius, and also on the coefficient of air drag and on the coordinates of the starting point, the angle and speed of the cylinder departure. At the second stage, the differential equation of the cylinder rotation around the point of its center of mass is solved, provided that this point moves along a parabolic trajectory. Examples of modeling the trajectories of a cylinder depending on the values of the parameters are given.*

*Key words: geometric modeling, cylindrical container, differential equations of motion, rotational-translational motion of the container.*

### **References**

1. Kovalev, A.A., Kalynovsky, A.YA., Khmyrov, Y.M. (2018) Development of certain aspects of the container fire extinguishing method. Problemy pozharnoy bezopasnosty Khar'kov, 44, 57-69. Retrieved from: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppb\\_2018\\_44\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppb_2018_44_11) [in Russian].



2. Tsarev, A.M., Zhuykov, D.A. (2007) The mechanics of the action of promising fire extinguishing compositions in fire extinguishing installations of the stem type of container delivery by throwing. *Yzvestyya Samarskoho nauchnoho tsentra RAN.* 9,3, 771–785. [in Russian].
3. Kutsenko, L.N., Kalynovs'kyi, A.YA., Polivanov O.H. (2020) Geometrical modeling of the method throwing to fight fires. *Prykladna heometriya ta inzhenerna hrafika.* Kyiv: KNUBA, 98, C.94-103 doi:<https://doi.org/10.32347/0131-579x.2020.98.94-103> [in Ukrainian].
4. Kutsenko, L.M., Kalynovs'kyi, A.YA., Adashevs'ka, I.YU., Shelikhova I.B. (2020) Modeling the delivery of fire extinguishing substances using containers in the form of dumbbells. *Suchasni problemy modelyuvannya: Melitopol'*, 20, 136-143. doi:<https://doi.org/10.33842/2313-125X/2021/20/136/143>
5. Kutsenko, V. Vanin, A. Naidysh, S. Nazarenko, A. Kalynovskyi, A. Cherniavskyi, O. Shoman, V. Semenova-Kulish, O. Polivanov, E. Sivak. (2020) Development of a geometrics mode of a new method for delivering extinguishing substances to a distant fire zone. *Eastern-European Journal of Enterprise Technol.: Applied mechanics.* Vol. 4, No.7. (106) P. 88-102. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209382> [in Ukrainian].
6. Kutsenko, L.M. Kalynovs'kyi, A.YA. Polivanov, O.H. (2020) Animated illustrations for the article "Computer modeling of a new technology for remote delivery of fire extinguishers" URL:<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10860> [in Ukrainian].
7. Babayev, O.A., Kryshtal', V.F. (2015) Theoretical mechanics-3. General theorems of dynamics and elements of analytical mechanics. K. NTUU «KPI». 82. URL:<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/17661> [in Ukrainian].
8. Ehorov, A.D., Potapova, Y.A. (2020) König's theorem: A simple example. 2020. URL:[https://www.researchgate.net/publication/339149106\\_TEOREMA\\_KE\\_NIGA\\_PROSTOJ\\_PRIMER](https://www.researchgate.net/publication/339149106_TEOREMA_KE_NIGA_PROSTOJ_PRIMER) [in Russian].
9. Rouben Rostamian (2018) A Guided Tour of Analytical Mechanics with animations in MAPLE. Department of Mathematics and Statistics UMBC December 2, 111. <https://userpages.umbc.edu/~rostamia/2014-09-math490/lecture-notes.pdf> [in English].
10. Rouben Rostamian (2018) MATH 490: Special Topics in Mathematics Analytical Mechanics Math 490, Fall 7. URL:<https://userpages.umbc.edu/~rostamia/2018-09-math490> [in English].
11. The motion of a body in a gravitational field, taking into account air resistance. (2020). URL: <https://glebgrenkin.blogspot.com/2014/03/blog-post.html> [in Russian].
12. David P. Murdock Rotation of an Object About a Fixed Axis. (2013). URL:<https://www2.tntech.edu/leap/murdock/books/v2chap1.pdf> [in English].