

**П'ятничко Олександр Іванович**, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Відділ газових технологій, Інститут газу Національної Академії Наук України, вул. Дегтярівська, 39, м. Київ, Україна, 03113  
E-mail: aipkiev@ukr.net

**Жук Геннадій Вилиорович**, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділом Відділ газових технологій, Інститут газу Національної Академії Наук України, вул. Дегтярівська, 39, м. Київ, Україна, 03113  
E-mail: hen\_zhuk@ukr.net

**Солтаніберешне Мехрзад Алі**, аспірант, молодший науковий співробітник, Відділ газових технологій Інститут газу Національної Академії Наук України, вул. Дегтярівська, 39, м. Київ, Україна, 03113

УДК 515.2

DOI: 10.15587/2313-8416.2017.117920

## ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МОБІЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЗАПУСКУ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

© Л. М. Куценко, О. М. Семків, А. Я. Калиновський, М. М. Пікрасов, О. І. Сухарькова

*Розроблено геометричну модель мобільної металевієї установки типу требушет, призначеної для запуску (катапультивання) малих безпілотних літальних апаратів. Конструктивно механізм запуску поєднаний з легковим автомобілем, що сприяє його мобільності. Крім того, сам автомобіль використовується у якості противаги в конструкції требушет. Розрахунки руху механізму запуску виконано з використанням рівнянь Лагранжа другого роду. Наведено тестові розрахунки*

**Ключові слова:** геометрична модель, безпілотний літальний апарат, требушет, лагранжіан, рівняння Лагранжа другого роду

### 1. Вступ

У наш час широке поширення набули малі безпілотні апарати літакового типу. Вони призначені для виконання великого спектру завдань по моніторингу об'єктів сільськогосподарського й лісового господарства. Одним із головних моментів при експлуатації таких апаратів у непередбачуваних польових умовах є запуск у повітря. Для цього використовуються пускові пристрої різних конструкцій типу катапульти [1]. Катапульта повинна забезпечувати надійний пуск літального апарату, причому параметри пуску повинні бути сталими при кожному наступному запуску.

До конструкцій катапульти літальних апаратів невеликої маси (~5–15 кг), які використовують переважно місцеві служби сільськогосподарського й лісового господарства, приділяють вимоги, серед яких:

- мобільність розгортання і згортання установки, коли старт і приземлення літаків не співпадають на місцевості;
- високі експлуатаційні якості, у тому числі невибагливість до зберігання;
- надійність і працездатність у різних погодних умовах.

Крім того, бажана відсутність у конструкції катапульти деталей з гуми (яка не довговічна, особливо у спеку і морози), а також відсутність пневматики, піропатронів та електроніки (які потребують профілактичних робіт і притаманні для більш дорогих технологій запуску апаратів).

Серед різновидів катапульти, які задовольняють зазначеним вимогам, увагу привертає механізм требушет [2], де об'єкт для метання приєднується до його праці. Стосовно запуску безпілотного літального апа-

рату це виглядатиме так. В результаті спрацювання праці виконується «розгін» апарату до моменту набуття ним необхідної швидкості, після чого, відчепившись від праці, той продовжує політ на власному двигуні.

Для забезпечення ефективної динаміки запуску необхідно розрахувати значення параметрів требушет, що дозволить здійснювати надійні повсякденні старты апарату. Розрахунки доцільно здійснити у рамках механіки Лагранжа [3], де враховуються зміни кінетичної і потенціальної енергії системи. У результаті розв'язання рівняння Лагранжа другого роду необхідно одержати траєкторію переміщення точки центру маси безпілотного літального апарату, приєданого до праці. Це в свою чергу дозволить визначити кут і швидкість вильоту апарату в момент його відокремлення від праці. Ідеалізована геометрична модель є першим етапом дослідження реального пристрою для катапультивання, який після доопрацювання можна використовувати на практиці.

Таким чином можна зробити висновок, що для запуску малого безпілотного літального апарату цінними будуть дослідження, пов'язані із застосуванням требушет, який задовольняє вимогам до недорогих катапульти. Для забезпечення ефективної динаміки требушет розрахунки необхідно виконати у рамках механіки Лагранжа. Цим обґрунтовується актуальність проведення даних досліджень.

### 2. Огляд літератури

У найпоширенішій конструкції катапульти для запуску літальних апаратів використовуються лінійні напрямні, по яким розганяється апарат, використовуючи гумові, пружинні, пневматичні або порохові

прискорювачі [4]. Катапульти з лінійними напрямними встановлюють іноді на дах автомобіля [5]. Інші структурні схеми процесу запуску полягають у наданні прискорення апарату за допомогою його обертання навколо горизонтальної або вертикальної осі [6]. При цьому користуються принципами метання: за допомогою обертання об'єкту у вертикальній площині (принцип праці), або теж у горизонтальній площині (принцип леєра).

Схема процесу запуску за допомогою обертання навколо вертикальної осі ферми з літальним апаратом [7] зображена на рис. 1. Після розкручування літальний апарат від'єднується від ферми в розрахований момент часу, залежно від швидкості її обертання та необхідного напрямку вильоту.

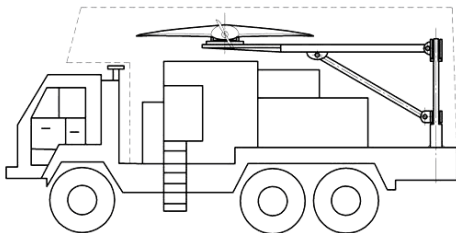


Рис. 1. Мобільна катапульта з вертикальною віссю обертання [7]

Наведений на рис. 1 мобільний комплекс із катапультию дозволяє запускати літальні апарати різної маси без трудомісткого попереднього переналадження. При цьому виключається необхідність орієнтації лінійних напрямних катапульти за напрямком запуску. Також усувається негативний вплив ударних навантажень, які виникають у момент пуску при використанні як розгінного пристрою гумового тросу, пружини, піропатрону, стисненого газу, тощо. В дослідженні [8] наведено математичну модель стартового пристрою з вертикальною віссю обертання, яка дозволила визначити параметри елементів конструкції, що забезпечують плавне безударне прискорення літального апарата.

Інша «обертова» схема процесу запуску літальних апаратів використовує надання їм прискорення завдяки обертання ферми навколо горизонтальної осі. Літак від'єднується від ферми в розрахований момент часу і продовжує політ, залежний від швидкості її обертання та необхідного кута вильоту. Зазначимо, що схема процесу запуску літальних апаратів за допомогою обертання ферми навколо горизонтальної осі подібна дії «коромисловій» схемі требушет [9].

Механізм требушет для запуску безпілотного літального апарату було реалізовано на практиці. В дослідженнях [10, 11] описано установку AVTO-01 Launcher, яка схематично повторює металеву машину требушет. На практиці автори установки продемонстрували можливість запускати у повітря малі безпілотні літальні апарати. Противагою при цьому служить сам автомобіль, на даху якого гарнітура AVTO-01 Launcher кріпиться за допомогою спеціальної рами (рис. 2). Крім того, така система запуску компактно згортається й може перевозитися на легковій машині по дорогах загального користування.

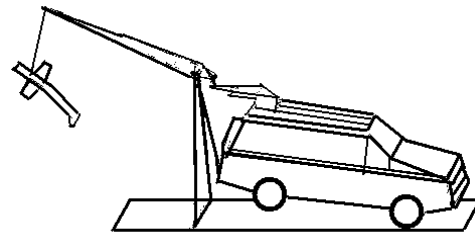


Рис. 2. Установка AVTO-01 Launcher [10]

Для розгортання установки у робочий стан операторові необхідно лише встановити на землі дві металеві опори, закріпити на них важіль требушета і за допомогою електричної лебідки підняти задню частину автомобіля – тобто створити противагу на короткому кінці важеля. За інформацією вчених [10, 11] AVTO-01 Launcher дозволяє «розігнати» безпілотний літальний апарат масою 10 кг до швидкості 12 м/с на висоті 8 м, після чого той продовжує політ на власному двигуні [12].

Суттєвим у AVTO-01 Launcher є те, що запуск здійснюється завдяки потенціальній енергії транспортного засобу. До переваг AVTO-01 Launcher також слід віднести відсутність у конструкції катапульти деталей з гуми, відсутність пневматики і електроніки, характерних для інших технологій запуску малих безпілотних літальних апаратів. Для модернізації установки катапульти та коригування її параметрів залежно від типу безпілотного літального апарату та маси автомобіля доцільним буде розробити математичну модель зазначеного способу катапультивання.

В наукових працях [10, 11] наведено розрахунки параметрів установки AVTO-01 Launcher. Ці розрахунки доцільно доповнити складанням та розв'язанням рівняння Лагранжа другого роду, а також реалізацією одержаних розв'язків у вигляді комп'ютерної програми. У дослідженні [13] було складено рівняння Лагранжа другого роду для визначення траєкторії переміщення вантажу на праці залежно від параметрів конструкції требушет. В науковій праці [14] були розглянуті рівняння Лагранжа другого роду для різновидів конструкцій требушет. В дослідженнях [15, 16] наведені приклади розв'язання рівняння Лагранжа другого роду у середовищах пакетів *maple* і *matlab*.

В результаті огляду літератури були виявлені питання, не досліджені іншими авторами. А саме, ще не зайнятою науковою нішею виявилось геометричне моделювання мобільної установки типу требушет на базі легкового автомобіля для запуску малих безпілотних апаратів. Це дозволило сформулювати наступну проблему досліджень. Для геометричної моделі процесу катапультивання апарату доцільно використати традиційну «коромислову» схему требушет, де противагою служитиме сам автомобіль. Розрахунки доцільно здійснювати у рамках механіки Лагранжа, шляхом складання та розв'язання рівнянь Лагранжа другого роду. Для аналізу динаміки требушет необхідно одержати фазові траєкторії узагальнених координат, а також унаочнити результати розрахунків у вигляді комп'ютерної анімації.

**3. Мета і задачі дослідження**

Мета дослідження – розробка геометричної моделі установки требшет, призначеної для запуску малих безпілотних літальних апаратів типу літака, коли противагою у цій конструкції служитиме сам автомобіль.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі.

1. Розв'язати наближено систему диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду.

2. Визначити координати траєкторії переміщення центральної точки апарату у вертикальній площині за допомогою одержаних наближених розв'язків для функцій узагальнених координат.

3. Запропонувати параметри для тестового прикладу геометричного моделювання машини требшет.

4. Побудувати фазові траєкторії функцій узагальнених координат для кількісної оцінки процесу катапультивання літального апарату.

5. Створити анімаційний фільм процесу катапультивання літального апарату для якісної оцінки цього процесу.

**4. Метод дослідження**

В якості основи конструкції обрано традиційну «коромислово» схему требшет (рис. 3), відому ще з давніх історичних часів. Вона складається з важеля довжиною  $L_1 + L_2$ , до якого шарнірно прикріплено два важеля з довжинами  $L_3$  (позначає пращу) і  $L_4$  (важіль кріплення автомобіля як противаги). До важелів у вузлових точках закріплені вантажі з масами  $m_1$  (автомобіль) і  $m_2$  (безпілотний літальний апарат). Вважаємо, що літальний апарат прикріплений до пращі в точці, яка є центром його маси. Масу  $m_1$  необхідно обрати на декілька порядків більшою порівняно з масою  $m_2$ . Коли перший вантаж під дією гравітації падає донизу, то другому вантажу надається прискорення, яке і спричиняє ефект метання.

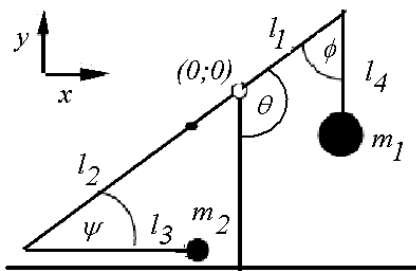


Рис. 3. Схема механізму требшет

При складанні математичної моделі машини требшет було враховано таку ідеалізацію: не оговорені умовою елементи системи невагомі, опори у вузлах відсутні, елементи системи не деформуються, параметри і початкові значення кутів та початкові швидкості їх зміни задаються в умовних одиницях.

У якості узагальнених координат оберемо кути  $\theta(t)$ ,  $\varphi(t)$  і  $\psi(t)$ , зображені на рис. 3. Для опису динаміки требшет використаємо вирази для кінетичної  $T$  і потенціальної  $U$  енергій [13, 14]:

$$T = \frac{1}{2} m_2 l_3^2 \dot{\psi}^2 + \frac{1}{2} m_2 l_3 l_2^2 \dot{\psi}^2 \cos^2 \theta + \frac{1}{2} m_1 l_4^2 \dot{\varphi}^2 + 0.5 m_1 l_1^2 \dot{\theta}^2 + 0.5 m_2 l_2^2 \dot{\theta}^2 + m_1 l_4 l_1 \dot{\varphi} \dot{\theta} \cos \theta + m_1 l_4 l_1^2 \dot{\varphi} \dot{\theta} \cos^2 \theta + m_2 l_3 l_2 \dot{\psi} \dot{\theta} \cos \theta + 0.5 m_2 l_3^2 \dot{\psi}^2 + 0.5 m_1 l_4^2 \dot{\varphi}^2 + 0.5 m_1 l_4^2 \dot{\theta}^2, \quad (1)$$

$$U = m_1 l_1 g \cos \theta + m_2 l_2 g \cos \theta + m_2 l_3 g (\cos \theta \cos \psi + \sin \theta \sin \psi) + m_1 l_4 g (\cos \theta \cos \varphi + \sin \theta \sin \varphi).$$

Тут  $\theta(t)$  – функція зміни в часі кута відхилення від вертикалі важеля довжиною  $L_1 + L_2$ ,  $\varphi(t)$  – функція зміни кута між важелями довжинами  $L_4$  і  $L_1 + L_2$ ,  $\psi(t)$  – функція зміни кута між важелями довжинами  $L_3$  і  $L_1 + L_2$ ,  $g=9,81$ .

З використанням лагранжіану  $L=T-U$  одержуємо систему диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду:

$$\begin{aligned} & m_1 l_1 g \sin \theta + m_2 l_2 g \sin \theta + m_2 l_3 g \sin \theta \\ & m_2 l_3 g \cos \theta \sin \psi + m_1 l_4 g \sin \theta \cos \varphi \\ & m_1 l_4 g \cos \theta \sin \varphi + m_1 l_1^2 \dot{\theta}^2 + m_1 l_4 l_1 \dot{\theta} \dot{\varphi} \cos \theta \\ & m_1 l_1 l_4 \dot{\theta}^2 \sin \psi + 2 m_1 l_1 l_4 \dot{\theta} \dot{\psi} \cos \theta \\ & 2 m_1 l_1 l_4 \dot{\theta} \dot{\psi} \sin \psi + m_2 l_2^2 \dot{\theta}^2 + 2 m_2 l_2 l_3 \dot{\theta} \dot{\psi} \cos \theta \\ & 2 m_2 l_2 l_3 \dot{\theta} \dot{\psi} \sin \psi + m_2 l_2 l_3 \dot{\theta} \dot{\psi} \cos \theta \\ & m_2 l_2 l_3 \dot{\psi}^2 \sin \psi + m_2 l_3^2 \dot{\psi}^2 + m_2 l_3 \dot{\psi}^2 \\ & m_1 l_4^2 \dot{\varphi}^2 + m_1 l_1^2 \dot{\theta}^2 = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & m_2 l_2 l_3 \dot{\psi}^2 \sin \psi + m_2 l_3 g \cos \theta \sin \psi \\ & m_2 l_3 g \sin \theta \cos \psi + m_2 l_2 l_3 \dot{\theta} \dot{\psi} \cos \theta \\ & m_2 l_3^2 \dot{\psi}^2 + m_2 l_3^2 \dot{\psi}^2 = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & m_1 l_1 l_4 \dot{\theta}^2 \sin \psi + m_1 l_4 g \cos \theta \sin \varphi \\ & m_1 l_4 g \sin \theta \cos \varphi + m_1 l_1 l_4 \dot{\theta} \dot{\varphi} \cos \theta \\ & m_1 l_4^2 \dot{\varphi}^2 + m_1 l_1^2 \dot{\theta}^2 = 0. \end{aligned}$$

Систему рівнянь (2) у середовищі Maple розв'яжемо чисельно за допомогою методу Рунге-Кутти з такими початковими умовами:  $\theta_0, \varphi_0, \psi_0$  – початкові значення кутів відхилення важелів;  $\theta'_0, \varphi'_0, \psi'_0$  – початкові швидкості зміни кутів відхилення.

Позначимо через  $\Theta(t)$ ,  $\Phi(t)$  і  $\Psi(t)$  наближені розв'язки для функцій  $\theta(t)$ ,  $\varphi(t)$  і  $\psi(t)$ . Тоді у системі координат  $xOy$  траєкторію переміщення вантажу необхідно будувати за формулами:

$$\begin{aligned} x(t) &= -l_2 \sin(\Theta(t)) + l_3 \sin(\Theta(t) - \Psi(t)); \\ y(t) &= l_2 \cos(\Theta(t)) - l_3 \cos(\Theta(t) - \Psi(t)). \end{aligned} \quad (3)$$

Розглянемо вертикальну площину з системою декартових координат  $xOy$ . В цій площині в певні моменти часу  $t$  за допомогою формул (3) будемо визначити миттєві координати точки центру маси без-

пілотною літальною апарату. Після послідовного сполучення цих точок відрізками одержимо наближену траєкторію центру маси апарату.

**5. Результати дослідження геометричної моделі требушет, призначеної для запуску безпілотних літальних апаратів.**

Наведемо тестовий приклад геометричного моделювання требушет з автомобілем у якості противаги. Для порівняння з результатами досліджень [10, 11] розміри металевих опор та важеля требушета обрано наближено, користуючись фотографією їх установки. Пропонується обрати такі значення параметрів. Маса автомобіля  $m_1=2000$ ; маса літака  $m_2=10$ ; значення параметрів:  $l_1=1$ ;  $l_2=4$ ;  $l_3=2,5$ ;  $l_4=1,5$ ; значення початкових умов  $\theta_0=2,5$ ;  $\theta'_0=0$ ;  $\varphi_0=\pi-2,5$ ;  $\varphi'_0=0$ ;  $\psi_0=\pi/3$ ;  $\psi'_0=0$ ,  $g=9,81$ . Межі часу інтегрування системи рівнянь (2)  $0 < t < 1$  (всі значення в умовних одиницях).

На рис. 4 наведено фазові траєкторії для функцій узагальнених координат кутів  $\Theta(t)$ ,  $\varphi(t)$  і  $\psi(t)$ . Аналіз фазових траєкторій дозволяє з'ясувати деякі кількісні оцінки процесу катапультивання літального апарату. А саме, максимальне значення швидкості зміни кута  $\psi(t)$  дорівнюватиме  $\psi=13$ , що можна вважати швидкістю літального апарату в момент відриву від праці. Тоді ж екстремальної швидкості досягне і зміна кута  $\varphi(t)$ .

Визначимо момент часу, коли безпілотний літальний апарат набуде максимальної швидкості. Для цього необхідно побудувати графік залежності в часі швидкості зміни кута  $\psi$ . На рис. 5, в зображено відповідний графік, з якого видно, що максимальна швидкість зміни кута  $\psi$  відбудеться при  $t = 0,82$ , що є рекомендованим моментом відриву літального апарату.

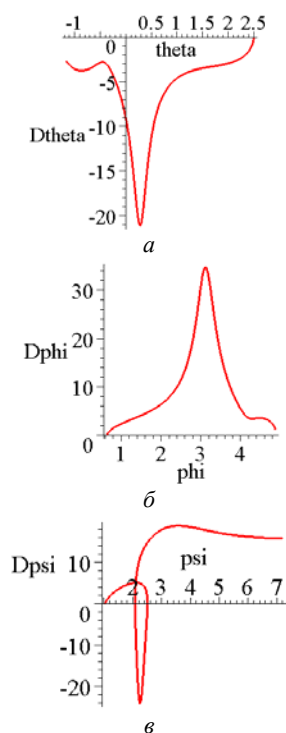


Рис. 4. Фазова траєкторія для параметра:  $a - \Theta(t)$ ;  $b - \varphi(t)$ ;  $c - \psi(t)$

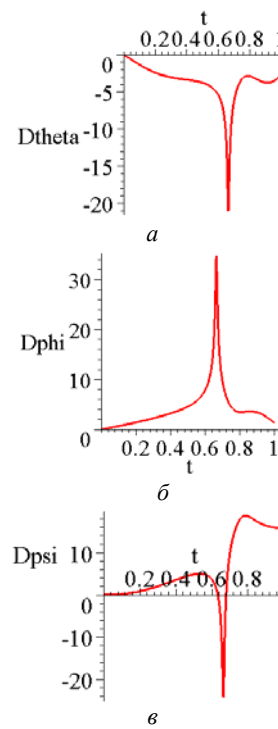


Рис. 5. Графік зміни швидкостей кутів у часі:  $a - \Theta(t)$ ;  $b - \varphi(t)$ ;  $c - \psi(t)$

Також можна проілюструвати деякі якісні оцінки процесу катапультивання літального апарату, у тому числі і визначення кута вильоту летального апарату після від'єднання від праці. Для цього було складено програму побудови кадрів анімаційного фільму схеми дії требушет. На рис. 6, а-в наведено окремі фази переміщення його елементів, а також траєкторію руху центру маси літального апарату (рис. 6, г).

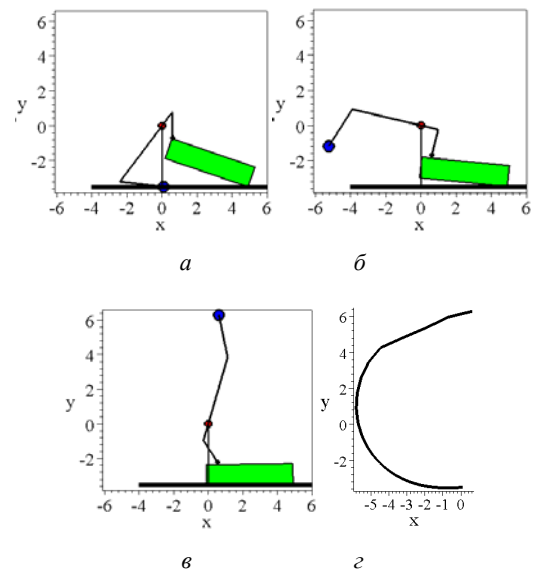


Рис. 6. Одержані зображення:  $a$  – початкове положення елементів,  $b$  – поточна фаза метання;  $c$  – фаза в момент відриву безпілотного літального апарату;  $d$  – траєкторія руху центру ваги літального апарату

З рис. 6  $d$  можна визначити кут вильоту літального апарату в момент від'єднання від праці, врахувавши координати прикінцевих точок траєкторії руху центру ваги літального апарату.

Підводячи підсумки слід зазначити, що в результаті проведених досліджень побудовано геометричну модель механізму требушет для запуску літальних апаратів. У майбутньому дана модель допоможе перейти на практиці до розрахунку реальних катапульт.

Отримані результати можна пояснити можливістю застосувати варіаційний принцип Лагранжа до розрахунку механічних конструкцій з урахуванням кінематичних зв'язків. Це дозволило використати рівняння Лагранжа другого роду для опису траєкторії руху центральної точки маси літального апарату.

Для наближення геометричної моделі до реальної конструкції необхідно врахувати можливі горизонтальні коливання вертикальних металевих опор требушета, а також прогин його «коромислового» важеля. Також слід враховувати можливі горизонтальні переміщення автомобіля під час катапультивання. Це ілюструється наведеними кадрами анімації на рис. 6, б, в, де прямокутник (автомобіль) в цій моделі не рухається горизонтально. При цьому вважається, що маса автомобіля зосереджена в точці його кріплення до стержня требушета. Зрозуміло, що наведена ідеалізована геометрична модель катапультивання потребує подальших досліджень. Розробка ілюстративної геометричної моделі способу катапультивання пояснює використання у тестовому прикладі значення параметрів в умовних одиницях.

Розвиток даного напрямку досліджень допоможе розрахувати процес катапультивання безпілот-

ного літального апарату залежно від його маси. А також розв'язати питання про визначення найбільшої маси апарату, яку здатна катапультиувати установка з цими параметрами. Подальші дослідження доцільно пов'язати з пошуком варіантів раціональних параметрів требушет залежно від типу безпілотного літального апарату та конструкції автомобіля.

Труднощі розвитку досліджень в цьому напрямку пов'язані, в основному, з одержанням адекватного математичного опису процесу катапультивання, і з можливістю розв'язати одержані рівняння Лагранжа другого роду. Все це потребує подальших досліджень.

## 6. Висновки

1. Розв'язано систему диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду.

2. За допомогою наближених розв'язків для функцій узагальнених координат було визначено координати траєкторії переміщення у вертикальній площині точки центру мас апарату.

3. Запропоновано параметри для тестового прикладу геометричного моделювання машини требушет.

4. Для кількісної оцінки процесу катапультивання апарату побудовані фазові траєкторії функцій узагальнених координат.

5. Для якісної оцінки створено анімаційний фільм процесу катапультивання безпілотного літального апарату.

## Література

1. Аленченков, Г. С. Классификация и синтез механизмов старта беспилотных летательных аппаратов [Текст] / Г. С. Аленченков, А. Э. Пушкарев, Л. А. Пушкарева // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1 (21). – С. 66–69.
2. Denny, M. Siege engine dynamics [Text] / M. Denny // European Journal of Physics. – 2005. – Vol. 26, Issue 4. – P. 561–577. – Available at: <http://www.twirpx.com/file/1728866/> doi: 10.1088/0143-0807/26/4/002
3. Jahed, H. Trebuchet Design [Text] / H. Jahed, A. Tajik. – Waterloo: University of Waterloo, 2006. – 72 p. – Available at: [http://fatslab.uwaterloo.ca/data/ME380\\_Project\\_manual\\_F06.pdf](http://fatslab.uwaterloo.ca/data/ME380_Project_manual_F06.pdf)
4. Tariq, I. Design and Analysis of Catapult Launched Mechanism for UAV [Text] / I. Tariq, M. N. Arshad // Student Research Paper Conference. – 2015. – Vol. 2, Issue 29. – P. 152–156.
5. Автомобили УАЗ и БПЛА (Беспилотники, Дроны) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.uazbuka.ru/uaz\\_bppla.html](http://www.uazbuka.ru/uaz_bppla.html)
6. Тарануха, В. П. Об одном способе создания катапульт летательных аппаратов [Текст] / В. П. Тарануха, С. А. Петрушин, А. Ю. Печёнкин, В. А. Глушков // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2014. – № 2 (44). – С. 125–128. doi: 10.18287/1998-6629-2014-0-2(44)-125-128
7. Аленченков, Г. С. Стартовые устройства беспилотных летательных аппаратов, применяемых для мониторинга объектов сельского хозяйства [Электронный ресурс] / Аленченков, Г. С. – Режим доступа: [http://botaniks.ru/ustroistvo\\_bespolotnih\\_letatelnih\\_apparatov.php](http://botaniks.ru/ustroistvo_bespolotnih_letatelnih_apparatov.php)
8. Аленченков, Г. С. Параметрический анализ и синтез механизмов стартовых устройств беспилотных летательных аппаратов малой массы [Текст] / Г. С. Аленченков, А. Э. Пушкарев // Вестник ИжГТУ. – 2012. – № 2 (54). – С. 4–7.
9. Chevedden, P. E. Recent reconstructions and computer simulations reveal the operating principles of the most powerful weapon of its time [Text] / P. E. Chevedden, L. Eigenbrod, V. Foley, W. Soedel // Scientific American. – 1995. – P. 66–71. – Available at: <http://deremilitari.org/wp-content/uploads/2014/02/chevedden1.pdf>
10. Balazs, G. Mobile launching trebuchet for UAVS [Text] / G. Balazs // 30-th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. – Daejeon, 2016. – P. 1–7.
11. Balazs, G. UAV innovativ inditasa – korszeru megoldas a kozepkorbol [Text] / G. Balazs // Repulastudományi kozlemenyek. – 2015. – Vol. 3. – P. 37–49. Available at: [www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015\\_3/2015-3-03-0229\\_Gati\\_Balazs.pdf](http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-03-0229_Gati_Balazs.pdf)
12. AMORES Robotics AVTO-01 UAV Launcher [Electronic resource]. – Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=0zoLDBvFwgA>
13. Siano, D. Trebuchet Mechanics [Electronic resource] / D. Siano. – 2013. – Available at: <http://www.algobeautytreb.com/trebmath356.pdf>
14. Covington, M. The Trebuchet: Physics, numerics, and connections to millennia of human activity [Electronic resource] / M. Covington. – 2000. – Available at: [www.speleophysics.com/mdcovin/play/physfinal3.doc](http://www.speleophysics.com/mdcovin/play/physfinal3.doc)

15. Rutan, S. Modern Siege Weapons: Mechanics of the Trebuchet [Electronic resource] / S. Rutan, B. Wiczorek. – 2005. – Available at: <https://mse.redwoods.edu/darnold/math55/DEProj/sp05/bshawn/TrebuchetMotionPDF.pdf>

16. Johnson, B. Trebuchet parametric design optimization [Electronic resource] / B. Johnson. – 2016. – Available at: <https://www.slideshare.net/BenjaminJohnson81/me-644-trebuchet-parametric-design-optimization>

Дата надходження рукопису 30.11.2017

**Кущенко Леонід Миколайович**, доктор технічних наук, професор, кафедра інженерної та аварійно-рятувальної техніки, Національний університет цивільного захисту України, вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023  
E-mail: leokuts@i.ua

**Семків Олег Михайлович**, доктор технічних наук, доцент, проректор, кафедра наглядово-профілактичної діяльності, Національний університет цивільного захисту України, вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023  
E-mail: legooleg1@i.ua

**Калиновський Андрій Якович**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра інженерної та аварійно-рятувальної техніки, Національний університет цивільного захисту України, вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023  
E-mail: kalinovskiy.a@nuczu.edu.ua

**Піксамов Михайло Михайлович**, кандидат технічних наук, Центр інформаційних технологій, Національний університет цивільного захисту України, вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023  
E-mail: mpiks@nuczu.edu.ua

**Сухарькова Олена Іванівна**, асистент, кафедра нарисної геометрії та комп'ютерної графіки, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха, 7, м. Харків, Україна, 61050

УДК 621.791.

DOI: 10.15587/2313-8416.2017.118409

## ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ДУГИ НА ДЕФЕКТЫ В ШВЕ ПРИ СВАРКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

© Б. В. Ситников, В. П. Маршуба, Н. Н. Мирошниченко, Л. В. Соловей, И. В. Асеева, С. Широков

*Исследовано влияние силового воздействия импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов на металл шва в процессе выполнения сварных соединений из алюминиевых сплавов. В частности, рассмотрены вопросы силового влияния импульсно-дуговой сварки на дегазацию сварочной ванны и разрушение поверхностных окисных пленок в процессе сварки. Изучены механические свойства сварных соединений из алюминиевого сплава АМгб*

**Ключевые слова:** импульсно-дуговая сварка, электрод, аргон, алюминий, сварочная ванна, пленки, воздействие дуги

### 1. Введение

Применение импульсно-дуговой сварки при выполнении сварных соединений алюминиевых сплавов позволяет, как известно, повысить качество их соединения и, в частности, приводит к разрушению оксидных плёнок, снижению пористости сварного шва.

Рекомендации относительно параметров процесса импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов алюминиевых сплавов, в частности сплава АМгб, неоднозначны. При этом используют импульсы сварочного тока различной амплитуды и формы при низкой, средней и высокой частоте. Положительное влияние импульсов объясняют главным образом динамическим воздействием дуги на сварочную ванну, вызывающим ее колебания и перемешивание [1].

### 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Сварные швы, соединений из сплава АМгб, выполненные в защитных газах, при наличии на поверхностях соединяемых кромок и присадочной проволоки окисные пленки, сформированных в процессе длительного атмосферного воздействия, имеют большое количество окисных включений и пор [1]. Это приводит к нарушению целостности сварного шва и образованию течей. Применение импульсно-дуговой сварки при выполнении сварных соединений из алюминиевых сплавов, позволяет повысить их качество, и в частности, приводит к разрушению оксидных плёнок, снижению пористости шва [2]. Однако рекомендации относительно параметров процесса импульсно-дуговой сварки неоднозначны.