

Горалік Є.Т., Крюков М.М., Луїна Т.О.

ОЦІНКА ВПЛИВУ ЗМІЩЕННЯ ЦЕНТРУ МАС РЯТУВАЛЬНОЇ ШЛЮПКИ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ВІДНОСНО ОПОРНОЇ ПОВЕРХНІ НА ЇЇ РУХ ПРИ СКИДАННІ З СУДНА

Розглянуто задачу про рух рятувальних шлюпок вільного падіння (РШВП) при скиданні з судна з урахуванням зміщення центру мас відносно опорних поверхонь протягом фази обертання – з моменту, коли центр мас шлюпки опиняється над краєм опори (крайнім роликотом рами) до моменту сходу з рами кінця опорних поверхонь шлюпки. Для складання диференціальних рівнянь руху РШВП впродовж фази обертання застосовано рівняння Лагранжа другого роду в полярній системі координат (диференціальні рівняння плоско-паралельного руху шлюпки в узагальнених координатах, де r – відстань від краю опори до проекції центру мас на опорну поверхню і φ – кут нахилу опорної поверхні шлюпки до горизонту).

Отримано розв'язувальну систему двох звичайних нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку і сформульовано відповідну задачу Коші, яка розв'язується чисельно за допомогою методу Рунге-Кутта четвертого порядку точності.

Апробація розробленого підходу здійснена для випадку моделювання шлюпки однорідним стрижнем у формі прямокутного паралелепіпеда довжиною L і товщиною h . Отримано відповідну розв'язувальну систему чотирьох звичайних нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку у формі Коші в узагальнених координатах r і φ , для якої сформульовано задачу Коші, що розв'язувалась чисельно методом Рунге-Кутта четвертого порядку точності при значенні кута нахилу рами $\alpha = 35^\circ$ для стрижнів товщиною 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 м і довжиною 5, 10 і 15 м при початкових швидкостях відповідно 6, 8 і 10 м/с.

Результати розрахунків тривалості фази обертання, кута нахилу та кута тангажу, радіальної і кутової швидкості, швидкості центру мас та її вертикальної і горизонтальної складових, кута нахилу вектора швидкості центру мас до опорних поверхонь шлюпки свідчать, що при розташуванні центру мас над опорною поверхнею напрямного бруса збільшення його відстані до опорної поверхні призводить до зростання усіх параметрів руху РШВП в кінці фази обертання. При цьому вплив зміщення зростає зі зменшенням довжини шлюпки (моменту інерції відносно центру мас).

За результатами роботи зроблено висновок про можливість використання запропонованого підходу і проведення чисельних експериментів для раціонального вибору параметрів руху РШВП та визначені напрями подальших досліджень.

Ключові слова: рятувальна шлюпка вільного падіння, похила рама, зміщення центру мас, плоско-паралельний рух, стрижень, прямокутний паралелограм, рівняння Лагранжа другого роду, звичайні диференціальні рівняння, задача Коші, чисельне моделювання, метод Рунге-Кутта.

Постановка проблеми. Перші системи рятувальних шлюпок вільного падіння (РШВП) були розроблені в 1970-х роках як рятувальні системи, які забезпечували безпечну і швидку евакуацію людей з аварійного судна навіть при несприятливих погодних умовах. Подальші розробки РШВП супроводжуються як експериментальними, так і теоретичними дослідженнями з метою оптимізації конструкції шлюпки та спускного пристрою для забезпечення вимог Міжнародної конвенції з охорони людського життя на морі SOLAS –

74 щодо відсутності будь-якого шкідливого для пасажирів прискорення при запуску рятувальної шлюпки у воду. Величина небезпечних прискорень, яких зазнає РШВП разом з евакуйованими людьми при входженні в воду, визначається попередніми взаємно пов'язаними етапами її руху при скиданні з судна: ковзанням по похилій рампи до досягнення її центром мас краю рампи (фаза ковзання), обмеженим падінням до відриву від рампи (фаза обертання) і вільним падінням до контакту носової частини шлюпки з водою (фаза вільного падіння) [1, 2, 3]. Найбільш складним з етапів для теоретичного дослідження є фаза обертання, рух РШВП протягом якої описується диференціальними рівняннями, розв'язування яких через відсутність відомих аналітичних розв'язків потребує застосування чисельних методів.

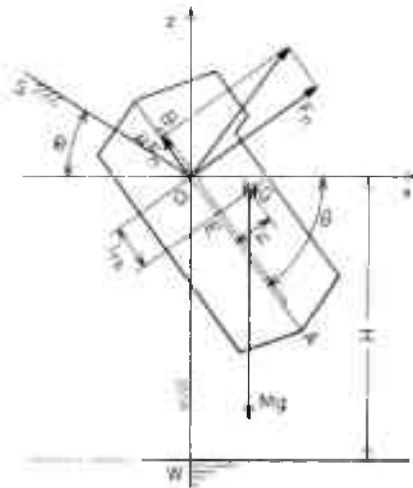


Рисунок 1. Рух РШВП протягом фази обертання

Рух рятувальної шлюпки (рис.1), в декартовій системі координат протягом фази обертання зазвичай [2, 4, 5, 6] описується трьома диференціальними рівняннями, два з яких описують рух центру мас човна, а третє – обертальний рух човна. Зокрема, в роботах [5, 6] ці рівняння мають вигляд (1):

$$\begin{aligned} M\ddot{x} &= F_n \sin(\theta - \varphi) / \cos \varphi, \\ M\ddot{z} &= F_n \cos(\theta - \varphi) / \cos \varphi - Mg, \\ I\ddot{\theta} &= F_n \{x \cos(\theta - \varphi) - z \sin(\theta - \varphi)\} / \cos \varphi, \end{aligned} \quad (1)$$

де M – маса рятувальної шлюпки, I – момент інерції шлюпки відносно горизонтальної осі, що проходить через центр мас перпендикулярно до площини рисунка, θ – кут нахилу осі шлюпки до горизонталі, x і z – координати центру мас шлюпки, \dot{x} , \dot{z} , $\dot{\theta}$ – другі похідні за часом координат центру мас шлюпки та кута нахилу шлюпки до горизонталі, φ – кут тертя ковзання ($\mu = \tan \varphi$ – коефіцієнт тертя ковзання), Mg – сила тяжіння, F_n – нормальна реакція рампи, μF_n – сила тертя паралельна опорній поверхні напрямного бруса.

Окрім цих трьох рівнянь, записується також рівняння сумісності переміщень.

$$x \sin \theta + z \cos \theta = h,$$

де h – відстань центру мас шлюпки від опорної поверхні напрямного бруса.

Розв'язування цих рівнянь вочевидь є досить складним завданням, оскільки присутня в них динамічна реакція F_n є наперед невідомою змінною величиною, а інформація щодо методики їх розв'язування у відомих відкритих джерелах на жаль відсутня.

В роботі [3] наведено розв'язок задачі про рух РШВП при скочуванні з похилої рампі впродовж фази обертання. При цьому шлюпка моделюється однорідним стрижнем (рис. 2) і використовується більш проста система двох диференціальних рівнянь в полярній системі координат (2), отримана за допомогою рівнянь Лагранжа другого роду.

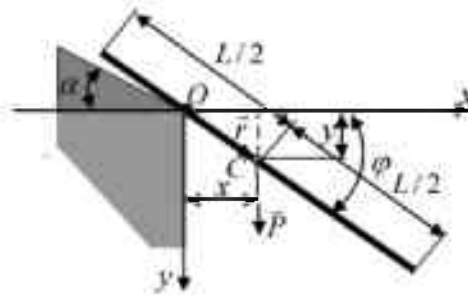


Рисунок 2. Сходження шлюпки, що моделюється однорідним стрижнем, з похилої рампі

$$\begin{aligned} \ddot{r} - r\dot{\varphi}^2 &= g \sin \varphi; \\ 2r\dot{r}\dot{\varphi} + \left(\frac{L^2}{12} + r^2 \right) \ddot{\varphi} &= gr \cos \varphi, \end{aligned} \quad (2)$$

де $r = OC$ – відстань від початку координат (полюса), розташованого на краю рампі, до центру мас стрижня, φ – полярний кут між горизонтальною віссю x і напрямком OC – віссю стрижня, $\dot{r} = \frac{dr}{dt}$ і $\ddot{r} = \frac{d^2r}{dt^2}$ – радіальні швидкість і прискорення центру мас, $\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt}$ і $\ddot{\varphi} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$ – кутова швидкість і кутове прискорення стрижня в обертальному русі.

Для отриманої розв'язувальної системи звичайних диференціальних рівнянь сформульовано відповідну задачу Коші, яка розв'язується чисельно за допомогою методу Рунге-Кутта четвертого порядку точності. За результатами роботи зроблено висновок про можливість використання запропонованого підходу і чисельних експериментів для раціонального вибору параметрів руху РШВП, що сходять з похилої рампі. Як правило, центр мас шлюпки зміщений по відношенню до опорної поверхні, тому пошук способів врахування цієї обставини в диференціальних рівняннях руху шлюпки в полярній системі координат є безумовно актуальним.

Мета дослідження полягає в розробці та використанні адекватної математичної моделі та методики для дослідження впливу зміщення центру мас рятувальної шлюпки

вільного падіння по відношенню до опорної поверхні на параметри її руху впродовж фази обертання та на початку вільного падіння.

Основні матеріали дослідження. Для складання диференціальних рівнянь руху РШВП впродовж фази обертання (рис. 3) застосуємо рівняння Лагранжа другого роду [8, 9]. Враховуючи те, що для відомих спускних пристроїв значення приведених коефіцієнтів тертя малі ($\mu = 0,02 \dots 0,05$), силами тертя, як і в роботі [7] знехтуємо.

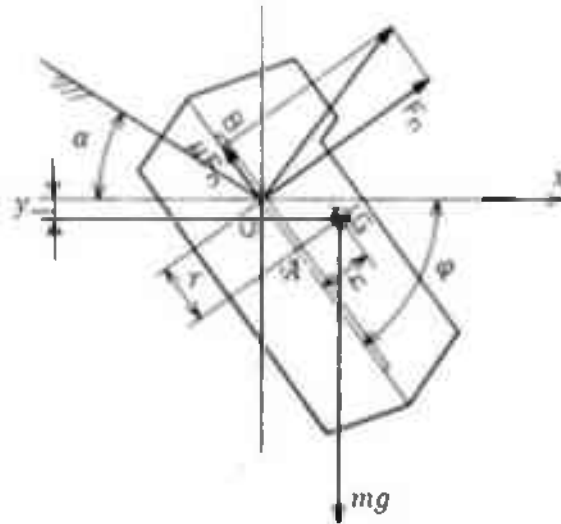


Рисунок 3 – Сходження РШВП з похилої рампі:

В якості узагальнених координат приймемо радіус $r = OA$ – відстань від проекції центру мас стрижня на його опорну поверхню до краю опори і полярний кут φ між горизонтальною віссю x і напрямком OA – опорною поверхнею напрямного бруса.

В даному випадку рівняння Лагранжа другого роду мають вигляд:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{r}} \right) - \frac{\delta T}{\delta r} = Q_1,$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{\varphi}} \right) - \frac{\delta T}{\delta \varphi} = Q_2,$$

де T – кінетична енергія рятувальної шлюпки, $\dot{r} = \frac{dr}{dt}$ – модуль швидкості проекції центру мас шлюпки на опорну поверхню напрямного бруса, $\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt}$ – модуль кутової швидкості шлюпки, Q_1 і Q_2 – узагальнені сили.

Кінетична енергія шлюпки при її русі визначається з виразу:

$$T = \frac{I_{zc} \dot{\varphi}^2}{2} + \frac{mV_c^2}{2},$$

де I_{zc} – момент інерції шлюпки відносно центру мас, V_c – модуль вектора швидкості центру мас.

Швидкість точки G – центру мас шлюпки, яка здійснює плоско-паралельний рух, дорівнює сумі швидкості точки A та швидкості точки G при обертанні шлюпки навколо точки A :

$$\vec{V}_G = \vec{V}_A + \vec{V}_{GA},$$

де швидкості \vec{V}_A і \vec{V}_{GA} визначаються формулами $\vec{V}_A = \dot{r} + \dot{\varphi} \times \vec{r}$ і $\vec{V}_{GA} = \dot{\varphi} \times \vec{AG}$.

Враховуючи, що колінеарні вектори \vec{r} та \vec{V}_{GA} мають модулі $|\vec{r}| = r$ та $|\vec{V}_{GA}| = h\dot{\varphi}$, а перпендикулярний до них вектор - вектор векторного добутку $\dot{\varphi} \times \vec{r}$ має модуль $|\dot{\varphi} \times \vec{r}| =$

$\dot{\varphi}r$, а також те, що у випадку розташування центру мас шлюпки над опорною поверхнею вектори \vec{r} та \vec{V}_{GA} співнаправлені, модуль вектора швидкості центру мас РШВП визначиться з виразу:

$$V_c = \sqrt{(\dot{r} + h\dot{\varphi})^2 + (r\dot{\varphi})^2} = \sqrt{\dot{r}^2 + 2h\dot{r}\dot{\varphi} + (r^2 + h^2)\dot{\varphi}^2} \quad (3)$$

Отримаємо наступний вираз для кінетичної енергії шлюпки:

$$T = \frac{I_{zc}\dot{\varphi}^2}{2} + \frac{m}{2}(\dot{r}^2 + 2h\dot{r}\dot{\varphi} + (r^2 + h^2)\dot{\varphi}^2). \quad (4)$$

Знайдемо похідні, що входять в ліву частину першого рівняння Лагранжа.

$$\begin{aligned} \frac{\delta T}{\delta \dot{r}} &= m(\dot{r} + h\dot{\varphi}); \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{r}} \right) &= \frac{d}{dt} (m(\dot{r} + h\dot{\varphi})) = m(\ddot{r} + h\ddot{\varphi}), \\ \frac{\delta T}{\delta r} &= \frac{m}{2} \cdot \frac{\delta}{\delta r} (\dot{r}^2 + 2h\dot{r}\dot{\varphi} + (r^2 + h^2)\dot{\varphi}^2) = \frac{m}{2} (2r\dot{\varphi}^2) = mr\dot{\varphi}^2, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{r}} \right) - \frac{\delta T}{\delta r} &= m(\ddot{r} + h\ddot{\varphi}) - mr\dot{\varphi}^2 = m(\ddot{r} + h\ddot{\varphi} - r\dot{\varphi}^2) = Q_1. \end{aligned}$$

Визначимо узагальнену силу Q_1 по координаті $q_1 = r$.

Розглянемо можливе вертикальне переміщення центру мас шлюпки δy , зумовлене можливим приростом узагальненої координати δr :

$$\delta y = (r + \delta r)\sin\varphi - \frac{h}{2}\cos\varphi - r\sin\varphi + \frac{h}{2}\cos\varphi = \delta r\sin\varphi.$$

Можлива робота δA сили тяжіння mg шлюпки на цьому можливому переміщенні дорівнює:

$$\delta A = mg\delta r\sin\varphi;$$

З іншого боку $\delta A = Q_1\delta q_1 = Q_1\delta r$. Отже, $Q_1 = mg\sin\varphi$.

Підставляючи отриманий вираз в перше рівняння Лагранжа, отримаємо наступне диференціальне рівняння руху центру мас шлюпки:

$$\ddot{r} = g\sin\varphi + r\dot{\varphi}^2 - h\ddot{\varphi} \quad (5)$$

Знайдемо похідні, що входять в ліву частину другого рівняння Лагранжа для шлюпки

$$\begin{aligned} \frac{\delta T}{\delta \dot{\varphi}} &= I_{zc}\dot{\varphi} + m(h\dot{r} + (r^2 + h^2)\dot{\varphi}); \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{\varphi}} \right) &= I_{zc}\ddot{\varphi} + m(h\ddot{r} + 2r\dot{\varphi}\dot{r} + (r^2 + h^2)\ddot{\varphi}); \\ \frac{\delta T}{\delta \varphi} &= 0; \end{aligned}$$

Визначимо узагальнену силу Q_2 по координаті $q_2 = \varphi$.

Розглянемо можливе вертикальне переміщення центру мас шлюпки δy , зумовлене можливим приростом узагальненої координати $\delta\varphi$.

$$\begin{aligned} \delta y &= r\sin(\varphi + \delta\varphi) - h\cos(\varphi + \delta\varphi) - r\sin\varphi + h\cos\varphi = \\ &= r\sin\varphi\cos\delta\varphi + r\cos\varphi\sin\delta\varphi - h\cos\varphi\cos\delta\varphi + h\sin\varphi\sin\delta\varphi - r\sin\varphi + h\cos\varphi. \end{aligned}$$

Оскільки $\cos\delta\varphi \approx 1$, $\sin\delta\varphi \approx \delta\varphi$, то можна вважати, що

$$\delta y = \delta\varphi(rcos\varphi + hsin\varphi).$$

Тоді можлива робота δA сили тяжіння mg шлюпки на цьому можливому переміщенні $\delta A = mg\delta\varphi(rcos\varphi + hsin\varphi)$. З іншого боку $\delta A = Q_2\delta q_2 = Q_2\delta\varphi$.

Отже, $Q_2 = mg(rcos\varphi + hsin\varphi)$.

Підставивши отриманий вираз в друге рівняння Лагранжа, отримаємо наступне диференціальне рівняння для обертального руху шлюпки:

$$I_{zG}\ddot{\varphi} + m(r^2 + h^2)\ddot{\varphi} + mh\dot{r} = mg(rcos\varphi + hsin\varphi) - m2r\dot{\varphi}\dot{r}; \quad (6)$$

Після необхідних алгебраїчних перетворень отримаємо остаточну систему диференціальних рівнянь руху РШВП протягом фази обертання (7)

$$\begin{aligned} \dot{r} &= g\sin\varphi + r\dot{\varphi}^2 - h\frac{m(grcos\varphi - 2r\dot{\varphi}\dot{r} - hr\dot{\varphi}^2)}{I_{zG} + mr^2}, \\ \ddot{\varphi} &= \frac{m(grcos\varphi - 2r\dot{\varphi}\dot{r} - hr\dot{\varphi}^2)}{I_{zG} + mr^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Приведемо отриману систему диференціальних рівнянь для шлюпки до нормальної форми Коші:

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{dt} &= y_2, \\ \frac{dy_2}{dt} &= g\sin(y_3) + y_1y_4^2 - h\left(\frac{m(gy_1\cos(y_3) - 2y_1y_2y_4 - hy_1y_4^2)}{I_{zG} + my_1^2}\right), \\ \frac{dy_3}{dt} &= y_4, \\ \frac{dy_4}{dt} &= \frac{m(gy_1\cos(y_3) - 2y_1y_2y_4 - hy_1y_4^2)}{I_{zG} + my_1^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Тут $y_1 = r$, $y_2 = \dot{r}$, $y_3 = \varphi$, $y_4 = \dot{\varphi}$.

Початкові умови мають вигляд $y_1(0) = 0$, $y_2(0) = V_0$, $y_3(0) = \alpha$, $y_4(0) = 0$.

Для апробації запропонованої математичної моделі та методики розрахунку параметрів руху рятувальної шлюпки вільного падіння впродовж фази обертання з урахуванням зміщення її центру мас по відношенню до опорної поверхні та отримання відповідних чисельних оцінок в даній роботі визначаються параметри руху РШВП, яка моделюється однорідним стрижнем у вигляді прямокутного паралелепіпеда довжиною L і товщиною h (рис. 4), в кінці фази обертання при його сходженні з нахиленої під кутом $\alpha = 35^\circ$ до горизонту рампи.

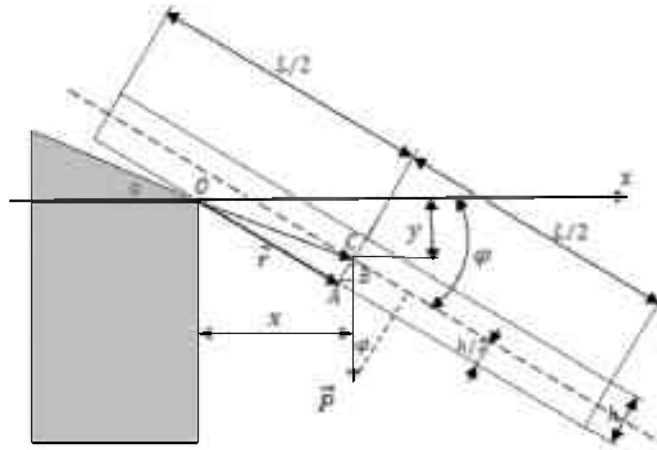


Рисунок 4. Модель рятувальної шлюпки вільного падіння.

З урахуванням виразу для швидкості V_c центру мас прямокутного паралелепіпеда при його скочуванні з рампи (9) та відомої формули (10) для моменту інерції I_{zc}^{np} прямокутного паралелепіпеда відносно горизонтальної осі z що проходить через центр мас [10]

$$V_c = \sqrt{(\dot{r} + 0,5h\dot{\varphi})^2 + (r\dot{\varphi})^2} = \sqrt{\dot{r}^2 + h\dot{r}\dot{\varphi} + (r^2 + 0,25h^2)\dot{\varphi}^2}. \quad (9)$$

$$I_{zc}^{np} = \frac{m}{12}(L^2 + h^2) \quad (10)$$

отримаємо вираз (11) для його кінетичної енергії:

$$T^{np} = \frac{m}{24}(L^2 + h^2)\dot{\varphi}^2 + \frac{m}{2} \cdot (\dot{r}^2 + h\dot{r}\dot{\varphi} + (r^2 + 0,25h^2)\dot{\varphi}^2) \quad (11)$$

Диференціальні рівняння руху прямокутного паралелепіпеда при скочуванні з похилої рампи впродовж фази обертання (12) отримані з використанням рівнянь Лагранжа другого роду та вище наведеної методики мають вигляд:

$$\begin{aligned} \ddot{r} &= g\sin\varphi + r\dot{\varphi}^2 - 0,5h \left(\frac{g(r\cos\varphi + \frac{h}{2}\sin\varphi) - 2r\dot{\varphi}\dot{r} - 0,5h(g\sin\varphi + r\dot{\varphi}^2)}{\frac{L^2 + h^2}{12} + r^2} \right), \\ \ddot{\varphi} &= \frac{g(r\cos\varphi + \frac{h}{2}\sin\varphi) - 2r\dot{\varphi}\dot{r} - 0,5h(g\sin\varphi + r\dot{\varphi}^2)}{\frac{L^2}{12} + \frac{h^2}{12} + r^2} \end{aligned} \quad (12)$$

Приведемо отриману систему диференціальних рівнянь для призми до нормальної форми Коші:

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{dt} &= y_2, \\ \frac{dy_2}{dt} &= g\sin(y_3) + y_1y_4^2 - \\ &0,5h \left(\frac{g(y_1\cos(y_3) + 0,5\sin(y_3)) - 2y_1y_2y_4 - 0,5h(g\sin(y_3) + y_1y_4^2)}{\frac{L^2 + h^2}{12} + r^2} \right), \\ \frac{dy_3}{dt} &= y_4, \\ \frac{dy_4}{dt} &= \frac{g(y_1\cos(y_3) + 0,5\sin(y_3)) - 2y_1y_2y_4 - 0,5h(g\sin(y_3) + y_1y_4^2)}{\frac{L^2}{12} + \frac{h^2}{12} + y_1^2} \end{aligned} \quad (13)$$

Тут $y_1 = r$, $y_2 = \dot{r}$, $y_3 = \varphi$, $y_4 = \dot{\varphi}$.

Початкові умови мають вигляд $y_1(0) = 0$, $y_2(0) = V_0$, $y_3(0) = \alpha$, $y_4(0) = 0$.

Запишемо задачу Коші (13) у векторній формі

$$\frac{d\vec{Y}}{dt} = \vec{F}(t, \vec{Y}), \quad \vec{Y}(0) = \vec{Y}_0, \quad (14)$$

де $\vec{Y} = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}^T$. Будемо розв'язувати задачу (14) за допомогою чисельного методу Рунге-Кутта четвертого порядку точності за схемою [11]:

$$\vec{Y}_{n+1} = \vec{Y}_n + \vec{\lambda}_n, \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad \vec{K}_4 = h\vec{F}\left(t_n + \frac{h}{2}, \vec{Y}_n + \vec{K}_3\right)$$

де $\vec{\lambda}_n = \frac{1}{6}(\vec{K}_1 + 2\vec{K}_2 + 2\vec{K}_3 + \vec{K}_4)$, $\vec{K}_1 = h\vec{F}(t_n, \vec{Y}_n)$, $\vec{K}_2 = h\vec{F}\left(t_n + \frac{h}{2}, \vec{Y}_n + \frac{\vec{K}_1}{2}\right)$,

$\vec{K}_3 = h\vec{F}\left(t_n + \frac{h}{2}, \vec{Y}_n + \frac{\vec{K}_2}{2}\right)$, $\vec{K}_4 = h\vec{F}\left(t_n + \frac{h}{2}, \vec{Y}_n + \vec{K}_3\right)$, $t_n = nh$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), $h > 0$ – крок в часі $\Delta t_n = t_{n+1} - t_n = h$.

На основі запропонованого підходу проведено серію чисельних експериментів для визначення часу скочування t , радіальної складової \dot{r} швидкості точки A (проекції центру мас на опорну поверхню стрижня), кутів нахилу до горизонту φ та φ° , кутів тангажу $(\varphi - 35)^\circ$ та кутової швидкості $\dot{\varphi}$ стрижнів товщиною до 1,0 м, довжиною 5, 10 і 15 м в момент відриву від рампи при значеннях початкової швидкості центру мас 6, 8 і 10 м/с відповідно та значенні кута нахилу рампи $\alpha = 35^\circ$. Прийняті значення початкової швидкості відповідають швидкості, яка досягається стрижнем при проходженні його центру мас над краєм рампи за умови, що на початку руху відстань від центру мас стрижня до краю рампи складає $0,65 L$, а коефіцієнт тертя між стрижнем і рампою дорівнює 0,1.

На основі результатів чисельних експериментів проведені розрахунки швидкості центру мас стрижня V_C , кута β між вектором швидкості \vec{V}_C і віссю стрижня та значень горизонтальної V_{Cx} та вертикальної V_{Cy} складових цієї швидкості за формулами (15):

$$\begin{aligned} V_C &= \sqrt{(\dot{r} + 0,5h\dot{\varphi})^2 + (r\dot{\varphi})^2}; \\ \beta &= \arcsin\left(\frac{r \cdot \dot{\varphi}}{V_C}\right); \\ V_{Cx} &= V_C \cdot \cos(\varphi + \beta); \\ V_{Cy} &= V_C \cdot \sin(\varphi + \beta). \end{aligned} \quad (15)$$

Результати проведених розрахунків представлені в табл. 1.

Таблиця 1. Результати розрахунків параметрів руху при скочуванні з похилої рампи стрижнів у формі прямокутного паралелепіпеда довжиною 5, 10 і 15 м при початкових швидкостях відповідно 6, 8 і 10 м/с.

L=5 м, V ₀ =6 м/с						
h, м	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
t, с	0,356	0,365	0,375	0,385	0,394	0,404
φ°	39,38	39,59	39,81	40,02	40,22	40,42

$(\varphi - 35)^\circ$	4,38	4,59	4,81	5,02	5,22	5,42
$\dot{\varphi}, \text{c}^{-1}$	0,396	0,340	0,403	0,405	0,407	0,408
$r, \text{м}$	2,5	2,571	2,641	2,710	2,780	2,851
$\dot{r}, \text{м/с}$	8,112	8,135	8,159	8,182	8,204	8,228
$V_c, \text{м/с}$	8,172	8,239	8,308	8,376	8,443	8,512
β°	6,97	7,17	7,36	7,53	7,71	7,87
$V_{cx}, \text{м/с}$	5,644	5,646	5,650	5,655	5,660	5,667
$V_{cy}, \text{м/с}$	5,910	6,001	6,091	6,178	6,264	6,352
L=10 м, V₀=8 м/с						
$h, \text{м}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$t, \text{с}$	0,525	0,532	0,539	0,547	0,554	0,561
φ°	39,74	39,86	39,98	40,09	40,21	40,32
$(\varphi - 35)^\circ$	4,74	4,86	4,98	5,09	5,21	5,32
$\dot{\varphi}, \text{c}^{-1}$	0,290	0,292	0,293	0,294	0,295	0,296
$r, \text{м}$	5,0	5,071	5,140	5,211	5,280	5,351
$\dot{r}, \text{м/с}$	11,13	11,15	11,17	11,18	11,20	11,22
$V_c, \text{м/с}$	11,224	11,277	11,329	11,372	11,425	11,474
β°	7,44	7,54	7,64	7,74	7,84	7,93
$V_{cx}, \text{м/с}$	7,633	7,636	7,640	7,637	7,642	7,646
$V_{cy}, \text{м/с}$	8,230	8,298	8,365	8,426	8,493	8,560
L=15 м, V₀=10 м/с						
$h, \text{м}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$t, \text{с}$	0,634	0,640	0,645	0,651	0,657	0,662
φ°	39,62	39,69	39,77	39,85	39,92	39,40
$(\varphi - 35)^\circ$	4,62	4,69	4,77	4,85	4,92	4,40
$\dot{\varphi}, \text{c}^{-1}$	0,234	0,235	0,236	0,236	0,237	0,237
$r, \text{м}$	7,501	7,570	7,641	7,711	7,781	7,851
$\dot{r}, \text{м/с}$	13,77	13,79	13,80	13,82	13,83	13,84
$V_c, \text{м/с}$	13,882	13,928	13,964	14,010	14,046	14,083
β°	7,277	7,342	7,411	7,477	7,545	7,609
$V_{cx}, \text{м/с}$	9,490	9,497	9,496	9,501	9,500	9,499
$V_{cy}, \text{м/с}$	10,131	10,188	10,238	10,296	10,346	10,396

Аналіз представлених в табл. 1 даних свідчить, що збільшення товщини стрижня h до 1 м (зміщення центру мас від 0 до 0,5 м) для стрижнів довжиною 5, 10 і 15 метрів призводить до зростання значень усіх параметрів руху. Однак зі збільшенням довжини стрижня, вплив зміщення центру мас відносно опорної поверхні на параметри його руху в кінці фази обертання зменшується. Так, величина зміщення 0,5 м при довжині стрижня 5, 10 і 15 м призвела відповідно до зростання: тривалості фази обертання на 0,048, 0,035 і 0,028 с; кута нахилу до горизонту та кута тангажу – на 1,044, 0,579 і 0,379 градусів; кутової швидкості – на 0,688, 0,304 і 0,18 град/с; абсолютної швидкості центру мас – на 0,34, 0,25 і 0,201 м/с; горизонтальної складової швидкості центру мас – на 0,023, 0,013 і 0,009 м/с; вертикальної складової швидкості центру мас – на 0,441, 0,33 і 0,265 м/с. Найбільше відносне зростання параметрів руху в % для найбільш короткого стрижня склало: тривалості фази обертання – 13,51; кута тангажу – 23,86; кутової швидкості – 3,03; швидкості центру мас – 4,16; горизонтальної і вертикальної складової швидкості центру мас відповідно 0,41 і 7,47.

Висновки. Запропонований підхід дозволяє з метою оптимізації за допомогою чисельних експериментів проводити розрахунок параметрів руху РШВП при скиданні з судна з урахуванням зміщення її центру мас відносно опорної поверхні прямого бруса.

Отримані результати розрахунків свідчать, що при розташуванні центру мас над опорною поверхнею прямого бруса збільшення його відстані до опорної поверхні призводить до зростання усіх параметрів руху РШВП в кінці фази обертання. При цьому вплив зміщення зростає зі зменшенням довжини шлюпки (моменту інерції відносно центру мас). В подальших дослідженнях слід з'ясувати вплив зміщення центру мас на параметри руху РШВП у випадку його розташування під опорною поверхнею напрямних брусів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бугаенко, Б. А. Принципы проектирования и особенности конструирования судовых устройств и судовой техники морских технологий [Текст] / Б. А. Бугаенко, А. Ф. Галь. Николаев : УГМТУ, 1995. – Ч. 2. – С. 86–101.
2. Netherlands Regulatory Framework (NE RF) – Maritime. 616 Evaluation of Free-fall Lifeboats launch performance. Geldigheid: 22-06-1993 t/m. Status: Geldig vandaag. Retrieved from https://puc.overheid.nl/nsi/doc/PUC_1746_14/1/
3. Є.Т. Горалік, М.М. Крюков, Т.О. Лупіна. Рух рятувальної шлюпки вільного падіння при сходженні з похилої рампи. Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – К.: ДУІТ, 2021. – Випуск 2(33). – С.23-35.
4. Tasaki, R., Ogawa Atsushi, Tsukino, Y. Numerical Simulation and its Application on the Falling Motion of Freefall Lifeboats. Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol. 167, pp. 1147-158, 1990.
5. Arai, M., Khondoker, M. R. H., Inoue, Y. Water Entry Simulation of Free-fall Lifeboat First Report : Analysis of Motion and Acceleration. Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol. 178, pp. 193-201, 1995.
6. Karim, M. M., Iqbal, K. S., Khondoker, M. R. H., Rahman, S. M. H. (2011) Influence of Falling Height on the Behavior of Skid-Launching Free-Fall Lifeboat in Regular Waves. Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 4, No. 1, pp. 77-88, 2011.
7. В.Е.Микитюк, Д.А.Миронов. Параметри движения шлюпки свободного падения перед приводнением / Матеріали І Міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» Миколаїв: - НУК, 2010. – С. 84-89.
8. Теоретична механіка: підручник для студентів ВНТЗ/ кол. авторів за заг. ред. І.В.Кузьо. – Харків: Фоліо, 2017. – 780 с.
9. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов и др. М.: Машиностроение, 1999. Т. 1-2. Теоретическая механика. Термодинамика. Теплообмен. / Под общ.ред. К.С. Колесникова, А.И. Леонтьева. 600 с.
10. Булгаков В.М., Бурлака В.В., Лукач В.С., Дроннік Ю.М., Кучеренко С.І., Мазоренко Д.І., Тіщенко Л.М. Теоретична механіка. Посібник для практичних занять. / За ред. С.І.Кучеренка. – Ніжин: В-во «Міланік», 2009. – 639 с.
11. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. – М.: Физматгиз, 1962. – Т.2. - 639 с.

REFERENCES

1. Bugayenko, B. A. (1995) "Printsipy proyektirovaniya i osobennosti konstruirovaniya sudovykh ustroystv i sudovoy tekhniki morskikh tekhnologiy" [Design principles and design features of ship devices and marine equipment of marine technology] [Tekst] / B. A. Bugayenko, A. F. Gal. Nikolayev : UGMTU, CH. 2, 86–101. [in Russian].
2. Netherlands Regulatory Framework (NE RF) – Maritime. 616 Evaluation of Free-fall Lifeboats launch performance. Geldigheid: 22-06-1993 t/m. Status: Geldig vandaag. Retrieved from https://puc.overheid.nl/nsi/doc/PUC_1746_14/1/
3. Horalik Ye.T., Kriukov M.M., Lupina T.O. (2021). Rukh riatuvalnoi shliupky vilnoho padinnia pry skhodzhenni z pokhyloi rampy [The movement of the freefall lifeboat when descending from the inclined ramp]. Vodnyi transport [Water transport], no.2, 23-35. [in Ukrainian].
4. Tasaki, R., Ogawa Atsushi, Tsukino, Y.(1990) Numerical Simulation and its Application on the Falling Motion of Freefall Lifeboats. Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol. 167, 1147-158. [in Japanese].
5. Arai,M., Khondoker, M. R. H., Inoue, Y. (1995). Water Entry Simulation of Free-fall Lifeboat First Report : Analysis of Motion and Acceleration. Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol. 178, 193-201. [in English].
6. Karim, M. M., Iqbal, K. S., Khondoker, M. R. H., Rahman, S. M. H.(2011) Influence of Falling Height on the Behavior of Skid-Launching Free-Fall Lifeboat in Regular Waves. Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 4, No. 1, 77-88. [in English].
7. V.E.Mykytyuk, D.A.Myronov. (2010) "Parametry dvyzhenyia shlyupky svobodnoho padenyia pered pryvodnenyem" [Parameters of free fall boat motion before flooding] / Materialy I Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. «Innovatsiiv v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi» Mykolayiv: - NUK, 84-89. [in Russian].
8. Teoretychna mekhanika. Pidruchnyk [Theoretical mechanics: textbook] (2017) / Count. authors per zag. Ed. I.V.Kuzio. – Kharkiv: Folio, 780 s.
9. Mashinostroenie. Entsiklopediya / Red. sovet: K. V. Frolov i dr. – M.: Mashinostroenie. Teoreticheskaya mehanika. Termodinamika. Teploobmen. T. 1-2 / Pod obsch. red. K. S. Kolesnikova, A. I. Leonteva. 1999. 600 s.
10. Bulhakov V.M., Burlaka V.V., Lukach V.S., Dronnik Yu.M., Kucherenko S.I., Mazorenko D.I., Tishchenko L.M. Teoretychna mekhanika. Posibnyk dlia praktychnykh zaniat. [Theoretical mechanics. Guide for practical classes] (2009) / Za red. S.I.Kucherenka. – Nizhyn: V-vo «Milanik». – 639 s.
11. Berezin I.S., Zhidkov N.P. Metody vychisleniy (Calculation Methods). – M.: Fizmatgiz, 1962. – T.2. - 639 s.

Goralik J.T., Kryukov N.N., Lupina T.O.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF THE DISPLACEMENT OF THE CENTER OF MASS OF THE FREE-FALL LIFEBOAT RELATIVE TO THE SUPPORT SURFACE ON ITS MOTION WHEN DROPPING FROM THE SHIP

The problem of the motion of free-fall lifeboats (FFLB) when dropping from the ship, taking into account the displacement of the center of mass relative to the supporting surfaces during the rotation phase – from the moment when the center of mass of the boat is above the edge of the support (extreme roller of the ramp) until the end of the supporting surfaces of the boat leaves the ramp. To compile the differential equations of motion of the FFLB during the phase of rotation, the Lagrange equation of the second kind in the polar coordinate system (differential equations of

flat-parallel motion of the boat in generalized coordinates, where r is the distance from the edge of the support to the projection of the center of mass on the support surface and φ - the angle of inclination of the supporting surface of the boat to the horizon) is applied.

The solving system of two ordinary nonlinear differential equations of the second order is obtained and the corresponding Cauchy problem is formulated, which is solved numerically using the Runge-Kutta method of the fourth order of accuracy.

The approbation of the developed approach was carried out for the case of modeling the boat with a homogeneous rod in the form of a rectangular parallelepiped with length L and thickness h . The corresponding solving system of four ordinary nonlinear differential equations of the first order in the Cauchy form in generalized coordinates r i φ was obtained, for which the Cauchy problem was formulated, which was solved numerically by the Runge-Kutta method of the fourth order of accuracy at the angle of inclination of the ramp $\alpha=35^\circ$ for rods with a thickness of 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1.0 m and a length of 5, 10 and 15 m at initial speeds of 6, 8 and 10 m/s, respectively. The results of calculations of the duration of the phase of rotation, the angle of inclination and pitch angle, radial and angular velocity, the speed of the center of mass and its vertical and horizontal components, the angle of inclination of the vector of the speed of the center of mass to the supporting surfaces of the boat indicate that when the center of mass is located above the supporting surface of the guide beam, an increase in its distance to the supporting surface leads to an increase in all parameters of the RSV motion at the end of the rotation phase. At the same time, the effect of displacement increases with a decrease in the length of the boat (the moment of inertia relative to the center of mass). Based on the results of the work, it was concluded that it was possible to use the proposed approach and conduct numerical experiments for the rational choice of the parameters of the RSHVP motion and the directions for further research were determined.

Keywords: *free-fall lifeboat, inclined ramp, displacement of the center of mass, flat-parallel motion, rod, rectangular parallelogram, Lagrange equation of the second kind, ordinary differential equations, Cauchy problem, numerical modeling, Runge-Kutta method.*