УДК 531+629.5

ПРО РУХ РЯТУВАЛЬНОЇ ШЛЮПКИ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ПРИ СХОДЖЕННІ З ПОХИЛОЇ РАМПИ

Горалик Є. Т., *к.т.н., доцент, завідувач кафедри природничо-технічного забезпечення діяльності водного транспорту Державного інституту інфраструктури та технологій, e-mail: et_gor@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2399-5373;*

Крюков М. М., *д.т.н., професор кафедри вищої та прикладної математики, Державного інституту інфраструктури та технологій, e-mail: mmkryukov@ukr.net, ORCID: 0000-8156-1720*

Розглядається задача про рух рятувальної шлюпки вільного падіння, яка моделюється однорідним стрижнем, при сходженні з похилої рампи. Мета дослідження полягає в розробці та використанні адекватної математичної моделі для дослідження параметрів руху рятувальної шлюпки вільного падіння при сходженні з нахиленої під кутом 35° рампи для дослідження впливу початкової швидкості та довжини шлюпки на її швидкість, кутову швидкість та кут тангажу протягом першої фази падіння. Отримано розв'язувальну систему звичайних диференціальних рівнянь і сформульовано відповідну задачу Коші, яка розв'язується чисельно за допомогою методу Рунге-Кутта. Диференціальні рівняння руху стрижня складені за допомогою рівнянь Лагранжа другого роду. Запропонований підхід дозволяє за допомогою чисельних експериментів проводити раціональний вибір параметрів руху РШВП, що сходить з похилої рампи. На основі отриманих результатів в подальших дослідженнях слід з'ясувати вплив кута нахилу рампи і розташування центру мас шлюпки на параметри її руху на початку вільного падіння.

Ключові слова: *плоско-паралельний рух, стрижень, похила рампа, рівняння Лагранжа другого роду, звичайні диференціальні рівняння, задача Коші, чисельне моделювання, метод Рунге-Кутта.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.2.23.015–027

Постановка проблеми. Рух рятувальної шлюпки вільного падіння (РШВП) по похилій рампі, відрив від рампи і вільне падіння по балістичній траєкторії, занурення і наступне виринання на поверхні моря взаємопов'язані. Величина небезпечних прискорень діючих на РШВП і розміщених в ній людей залежить від швидкості і орієнтації шлюпки в момент контакту її носового кінця з поверхнею води, які визначаються попередніми етапами руху. Найбільш цікавим і складним для дослідження з цих етапів є фаза падіння з наростаючим кутом нахилу – з моменту, коли центр мас шлюпки опиняється над краєм опори (крайнім роликом рампи) до моменту сходу з рампи кінця опорних поверхонь шлюпки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Рятувальні шлюпки вільного падіння є найбільш надійним рятувальним засобом, який забезпечує евакуацію людей з аварійного судна практично при будь-яких погодних умовах. Вони мають дві суттєві переваги: більш надійні при спуску з аварійного судна, яке має великий крен або диферент та при сильній хитавиці; після скидання з корми судна, здатні швидко віддалитися від місця катастрофи на безпечну відстань.

Сьогодні в світі вже більшість сучасних морських вантажних суден та танкерів обладнані РШВП. Актуальним є їх розробка і встановлення в майбутньому і на пасажирських суднах. РШВП обладнані також сучасні морські нафтодобувні платформи.

Історія створення рятувальної шлюпки вільного падіння нерозривно пов'язана з скандинавськими країнами. Концепція такої шлюпки вперше з'явилась на світ у 1897 році [1] коли шведський конструктор А.Е. Фальк запатентував конструкцію закритої рятувальної шлюпки, яка зісковзувала з корми судна. Але знадобилося ще 80 років технічного розвитку для того, щоб у 1977 році відбувся перший пілотований спуск рятувальної шлюпки вільного падіння по балістичній траєкторії з морського судна на верфі Oresundsavarvet (Ересунн Швеція).

Подальший розвиток ідея застосування рятувальних засобів, які спускаються на воду шляхом скидання, отримала під час виконання затвердженої норвезьким парламентом

програми дослідження перспективного обладнання і методів спасіння людей на морі (1977-1983) [2].

Відтоді і по сьогодення роботи по вдосконаленню та розробці нових конструкцій та технологій РШВП тривають зусиллями багатьох країн. При цьому норвежці продовжують зберігати лідерство в цих розробках. Так інженери норвезької компанії «*Norsafe AS*», яка спеціалізується на рятувальній техніці, розробляють рятувальний засіб майбутнього «*ResCube*» – систему морських РШВП, розташованих вертикально вздовж бортів пасажирського судна, завдяки чому пасажири можуть увійти відразу з шести палуб [3]. «*ResCube*» дозволяє розмістити на борту 330 пасажирів. Під час рятувальної операції під дією сили тяжіння система повертається на 90 градусів. Вага рятувальної шлюпки складає понад 50 тонн. Компанія Norsafe у 2015 році встановила новий світовий рекорд по висоті падіння шлюпки з пасажирами [4]. Шлюпка *GES50 MKIII*, розрахована на 70 пасажирів, була скинута з висоти 40 м, коли на борту знаходилось 10 чоловік. Трохи раніше (у вересні 2013 року) Norsafe успішно скинула шлюпку GES52 без пасажирів з рекордної висоти 66,8 м.

Роботи по розробці РШВП в СРСР та СНГ [2] тривали з 1984 по 1994 рік за участю ЦНДІ Морського флоту та ЦКБ «Редан». Шляхом експериментів на моделях була визначена оптимальна форма корпусу, розроблена конструкція, виготовлений і випробуваний у 1993 році дослідний зразок, який підтвердив його відповідність вимогам: перевантаження не перевищували шестикратних, спуско-підйомний пристрій (СПП) для скидання РШВП по балістичній траєкторії виготовлений миколаївським ПКБ «Прогрес» забезпечував усі параметри скидання.

Для вирішення проблем пов'язаних з перевантаженнями при входженні у воду при розробці нових РШВП, крім експериментів, важливими є теоретичні дослідження руху шлюпки при скиданні з спуско-підйомного пристрою. На жаль, відкриті публікації, які відносяться до розрахункових і експериментальних робіт, пов'язаних з дослідженнями динаміки руху РШВП при аварійному скиданні відсутні. В монографії [5] є лише згадки про РШВП та їх конструктивні особливості в порівнянні з традиційними рятувальними шлюпками. Міжнародна конвенція SOLAS – 74 [6] вкрай лаконічно формулює вимоги до РШВП: «Рятувальна шлюпка, призначена для спуску методом вільного падіння, повинна мати таку конструкцію, щоб, будучи завантаженою повним комплектом людей і спорядження, вона забезпечувала захист від небезпечних прискорень, які виникають при спусканні її на воду з висоти, щонайменше рівній максимальній проектній висоті її встановлення над ватерлінією при найменшій експлуатаційній осадці судна, несприятливих умовах диферента до 10° і крені не менше 20° на будь-який борт. Деякі технічні характеристики РШВП містяться в [7-10].

В роботі [11] приведена математична модель процесу падіння ШСП, але дані конкретних розрахунків не наводяться. Коротко розглянуті этапи (фази) руху ШСП в роботі [12] і запропоновані залежності для визначення основних параметрів (лінійних і кутових швидкостей, кутів тангажу тощо). В роботі [13] пропонується алгоритм для визначення параметрів руху і орієнтації РШВП перед приводненням після скидання з аварийного судна, одначе відсутні порівняння результатів розрахунку за цим алгоритмом з більш точними розрахунками або даними експериментів.

В останній роботі пропонується схема руху РШВП представлена на рис. 1 до контакту з водою, яка складається з трьох послідовних етапів:

1) розгін РШВП по похилій рампі до суміщення її центру мас з крайніми (нижніми) роликами рампи;

2) продовження прискореного переміщення РШВП по рампі з наростаючим кутом нахилу (тангаж) аж до сходу її корми з крайніх роликів рампи (перша фаза падіння);

3) вільне падіння до моменту торкання носовим кінцем поверхні води (друга фаза падіння).

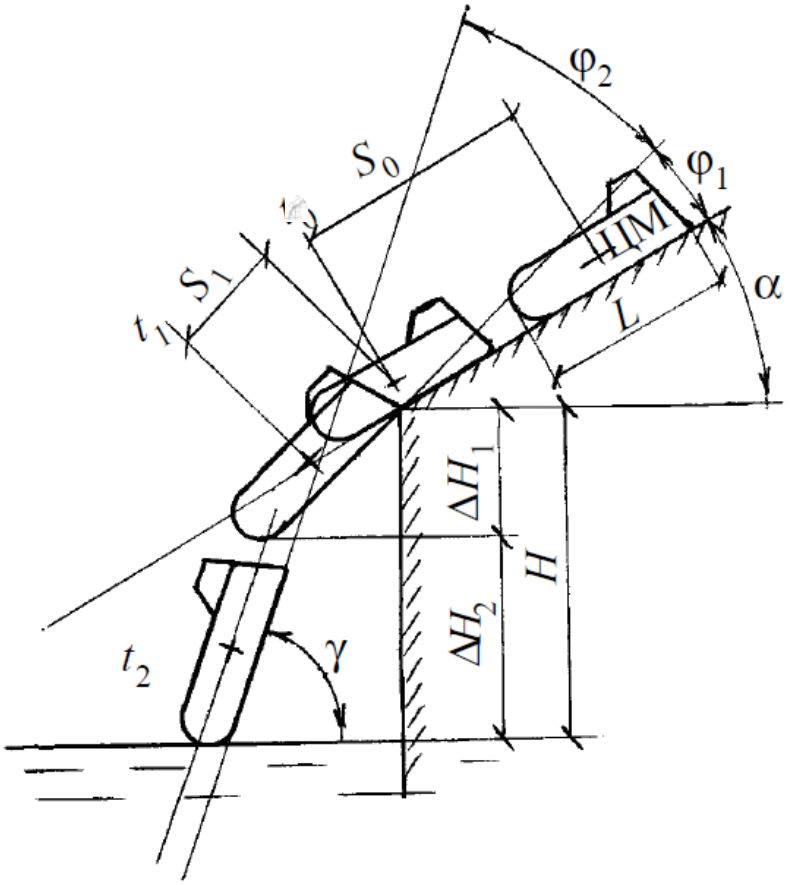

Рисунок 1 – Схема руху РШВП до контакту з водою

Мета дослідження полягає в розробці та використанні адекватної математичної моделі для дослідження параметрів руху рятувальної шлюпки вільного падіння при сходженні з нахиленої під кутом 35° рампи для дослідження впливу початкової швидкості та довжини шлюпки на її швидкість, кутову швидкість та кут тангажу протягом першої фази падіння.

Результати дослідження. Найбільш складним і малодослідженим етапом руху рятувальної шлюпки вільного падіння при її сходженні з напрямних опорної рампи є перша фаза падіння з наростаючим кутом нахилу з моменту, коли центр мас опиняється над краєм опори (крайнім роликом рампи) до моменту сходу з рампи опорних поверхонь шлюпки

Рятувальні шлюпки вільного падіння, які використовуються на морських суднах та нафтодобувних платформах, при сходженні з похилої рампи та подальшому вільному падінні до поверхні води рухаються плоско-паралельно.

При дослідженні плоско-паралельного руху тіл в теоретичній механіці його зазвичай представляють як суму двох рухів: поступального разом з центром мас та обертального навколо цієї точки [14]. При цьому реальні тіла в багатьох випадках з достатньою точністю можуть моделюватися однорідним стрижнем.

В подальшому в даній роботі при дослідженні руху РШВП при сходженні з похилої рампи застосуємо полярну системі координат (r,φ) а в якості моделі будемо використовувати саме однорідний стрижень масою m довжиною L (рис. 2). В початковий момент центр мас стрижня знаходиться над крайнім роликом рампи і має початкову швидкість $\vec{V}_0$ напрямлену вздовж рампи вниз.

Переміщення центру мас стрижня за край опори на довжину відрізка $\vec{r} = O\vec{C}$ під дією сили тяжіння $\vec{P} = m\vec{g}$ викликає появу обертального моменту величиною

$M = Px = mgr\cos\varphi$, під дією якого стрижень обертається з кутовим прискоренням у вертикальній площині.

Для складання диференціальних рівнянь руху тіла застосуємо рівняння Лагранжа другого роду. При цьому силами тертя знехтуємо.

Рисунок 2 – Сходження однорідного стрижня з похилої опори

В якості узагальнених координат приймемо радіус $r = OC$ – відстань від центру мас стрижня до краю опори і полярний кут φ між горизонтальною віссю x і напрямком OC – віссю стрижня.

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 тіла, $\dot{r} = \frac{dr}{dt}$ – модуль радіальної швидкості центру мас, $\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt}$ – модуль кутової швидкості стрижня, $\ddot{\varphi} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$ – модуль кутового прискорення стрижня, Q_1 і Q_2 – узагальнені сили.

Кінетична енергія стрижня при його русі визначається з виразу:

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

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

З урахуванням відомих формул для моменту інерції стрижня відносно центру мас $I_{zc} = \frac{mL^2}{12}$ і модуля вектора швидкості точки в полярній системі координат $V = \sqrt{\dot{r}^2 + r^2\dot{\varphi}^2}$ отримаємо наступний вираз для кінетичної енергії стрижня: $T = \frac{mL^2}{12}\cdot\frac{\dot{\varphi}^2}{2} + \frac{m\left(\dot{r}^2 + r^2\dot{\varphi}^2\right)}{2}$.

Знайшовши вирази для похідних, що входять у ліві частини рівнянь Лагранжа, отримаємо:

$$\frac{\delta T}{\delta \dot{r}} = m\dot{r};\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\delta T}{\delta \dot{r}}\right) = m\ddot{r};\ \frac{\delta T}{\delta r} = mr\dot{\varphi}^2;\ \frac{\delta T}{\delta \dot{\varphi}} = \frac{L^2}{12}\,m\dot{\varphi} + mr^2\dot{\varphi};$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\delta T}{\delta \dot{\varphi}}\right) = 2mr\dot{r}\dot{\varphi} + (\frac{L^2}{12} + r^2)m\ddot{\varphi};\ \frac{\delta T}{\delta \varphi} = 0.$$

Визначимо узагальнену силу Q_1 по координаті $q_1 = r$. Для цього розглянемо можливе переміщення системи, зумовлене можливим приростом узагальненої координати δr (рис. 3).

Рисунок 3 – Можливе переміщення системи, зумовлене можливим приростом узагальненої координати δr.

Сума елементарних робіт всіх активних сил, прикладених до системи на цьому переміщенні дорівнює: $\delta A = P\,\delta r \sin\varphi = m\,g\,\delta r \sin\varphi$.

З іншого боку $\delta A = Q_1 \delta q_1 = Q_1 \delta r$. Отже, $Q_1 = m\,g \sin\varphi$. Так само визначимо узагальнену силу Q_2 по координаті $q_2 = \varphi$.

Розглянемо можливе переміщення системи, зумовлене можливим приростом узагальненої координати $\delta\varphi$ (рис. 4).

Сума елементарних робіт всіх активних сил, прикладених до системи на цьому переміщенні дорівнює $\delta A = P\,r[\sin(\varphi + \delta\varphi) - \sin\varphi] = m\,g\,r[\sin\varphi\cos\delta\varphi + \cos\varphi\sin\delta\varphi - \sin\varphi]$.

Оскільки $\cos\delta\varphi \approx 1$ і $\sin\delta\varphi \approx \delta\varphi$, можна записати $\delta A = m\,g\,r\cos\varphi\,\delta\varphi$. З іншого боку $\delta A = Q_2 \delta q_2 = Q_2 \delta\varphi$. Отже, $Q_2 = m\,g\,r\cos\varphi$.

Рисунок 4 – Можливе переміщення системи, зумовлене можливим приростом узагальненої координати $\delta\varphi$

Підставимо отримані вище вирази у рівняння Лагранжа і отримаємо наступну розв'язувальну систему диференціальних рівнянь другого порядку:

$$\begin{aligned} &\ddot{r} - r\dot{\varphi}^2 = g \sin \varphi ; \\ &2r\dot{r}\dot{\varphi} + (\frac{L^2}{12} + r^2)\ddot{\varphi} = gr\cos\varphi . \end{aligned} \tag{1}$$

Для формулювання задачі Коші для отриманої системи диференціальних рівнянь (1) необхідно додати початкові умови:

$$r(0) = 0 , \ \dot{r}(0) = V_0 , \ \varphi(0) = \alpha , \ \dot{\varphi}(0) = 0 . \tag{2}$$

Приведемо отриману систему диференціальних рівнянь до нормальної форми Коші:

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{dt} &= y_2, \\ \frac{dy_2}{dt} &= y_1 y_4^2 + g \sin y_3, \\ \frac{dy_3}{dt} &= y_4, \\ \frac{dy_4}{dt} &= \frac{g y_1 \cos y_3 - 2 y_1 y_2 y_4}{a + y_1^2} . \end{aligned} \tag{3}$$

Тут $y_1 = r$, $y_2 = \dot{r}$, $y_3 = \varphi$, $y_4 = \dot{\varphi}$, $a = \frac{L^2}{12}$. Початкові умови мають вигляд:

$$y_1(0) = 0 , \ y_2(0) = V_0 , \ y_3(0) = \alpha , \ y_4(0) = 0 . \tag{4}$$

Запишемо задачу Коші (3), (4) у векторній формі:

$$\frac{d\vec{Y}}{dt} = \vec{F}(t, \vec{Y}), \quad \vec{Y}(0) = \vec{Y}_0, \tag{5}$$

де $\vec{Y} = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}^T$. Будемо розв'язувати задачу (5) за допомогою чисельного методу Рунге-Кутта четвертого порядку точності за схемою (Березин, Жидков, 1962):

$$\vec{Y}_{n+1} = \vec{Y}_n + \vec{\Lambda}_n , \ (n = 0, 1, 2, \cdots),$$

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

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

На основі запропонованого підходу проведено серію чисельних експериментів для визначення часу скочування шлюпки, горизонтальної та вертикальної складової швидкості центру мас, кутів повороту та кутової швидкості шлюпки в момент відриву від рампи при значенні кута нахилу рампи $\alpha = 35^\circ$ та різних значеннях початкової швидкості центру мас в діапазоні від 1 до 10 м/с і довжини шлюпки в діапазоні від 5 до 15 м.

В табл. 1 та для більшої наочності на рис. 5–8 представлені результати розрахунків часу скочування шлюпки (першого етапу падіння), кута тангажу, кутової швидкості тангажу та модуля швидкості центру мас шлюпки в момент її відриву від рампи для шлюпок довжиною 5, 10 і 15 м при початкових швидкостях в діапазоні 1–10 м/с.

Таблиця 1 – Результати розрахунків часу скочування, кута тангажу, кутової швидкості тангажу та модуля швидкості центру мас в момент відриву шлюпки довжиною 5, 10 і 15 м при початкових швидкостях в діапазоні 1–10 м/с.

L=5 м										
V_0, м/с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t, с	0,762	0,64	0,543	0,466	0,405	0,356	0,316	0,284	0,257	0,234
$\varphi - 35°$	14,873	12,006	9,312	7,191	5,586	4,382	3,522	2,834	2,376	1,975
$\dot{\varphi}$, $с^{-1}$	0,616	0,585	0,539	0,489	0,44	0,396	0,358	0,326	0,297	0,273
V_1, м/с	5,944	6,083	6,39	6,851	7,435	8,112	8,857	9,654	10,489	11,352
L=10 м										
V_0, м/с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t, с	1,136	1,001	0,887	0,79	0,707	0,637	0,577	0,525	0,481	0,444
$\varphi - 35°$	15,56	13,73	11,66	9,713	8,108	6,732	5,643	4,726	4,038	3,465
$\dot{\varphi}$, $с^{-1}$	0,439	0,428	0,41	0,387	0,362	0,337	0,313	0,29	0,27	0,252
V_1, м/с	8,387	8,459	8,643	8,945	9,361	9,874	10,469	11,13	11,846	12,604
L=15 м										
V_0, м/с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t, с	1,424	1,283	1,16	1,053	0,958	0,875	0,803	0,739	0,683	0,634
$\varphi - 35°$	15,847	14,471	12,752	11,089	9,5987	8,2229	7,0764	6,1019	5,2994	4,612
$\dot{\varphi}$, $с^{-1}$	0,359	0,354	0,344	0,33	0,315	0,298	0,281	0,264	0,249	0,234
V_1, м/с	10,267	10,314	10,443	10,669	10,992	11,407	11,903	12,47	13,095	13,773

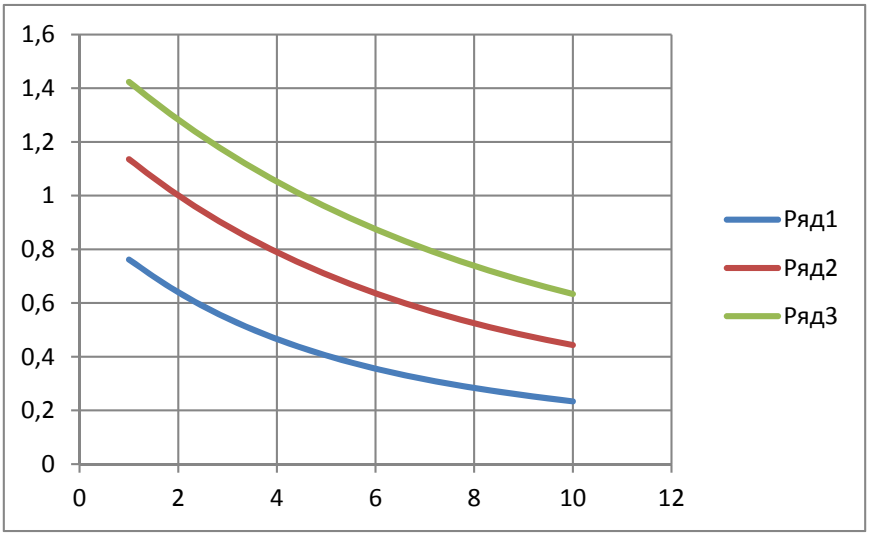

Рисунок 5 – Залежність часу скочування шлюпки (с) від початкової швидкості (м/с) при куті нахилу рампи 35°: ряд 1 – $L = 5$ м; ряд 2 – $L = 10$ м; ряд 3 – $L = 15$ м

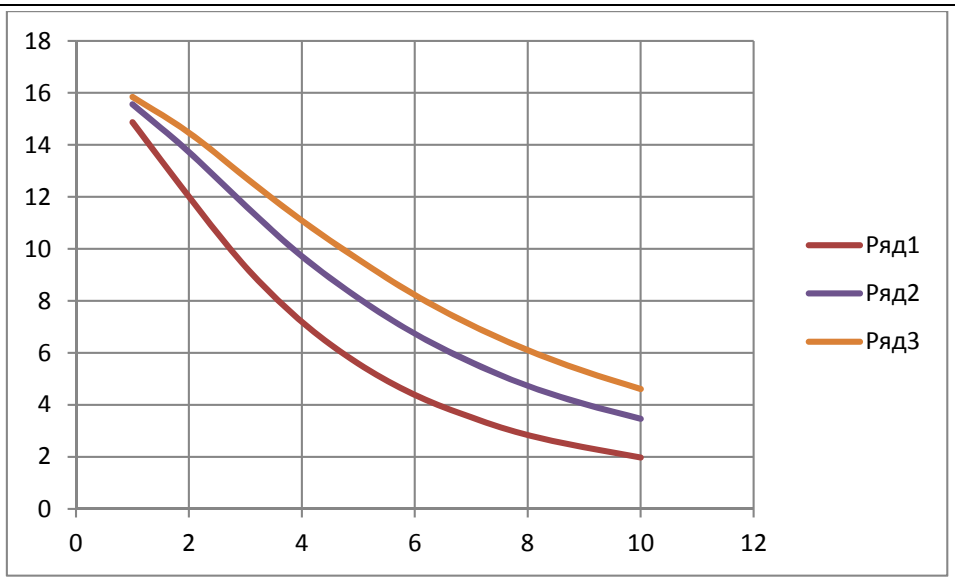

Рисунок 6 – Залежність кута тангажу ($с^{-1}$) від початкової швидкості (м/с) при скочуванні з похилої рампи при куті нахилу рампи 35°: ряд 1 – $L = 5$ м; ряд 2 – $L = 10$ м; ряд 3 – $L = 15$ м

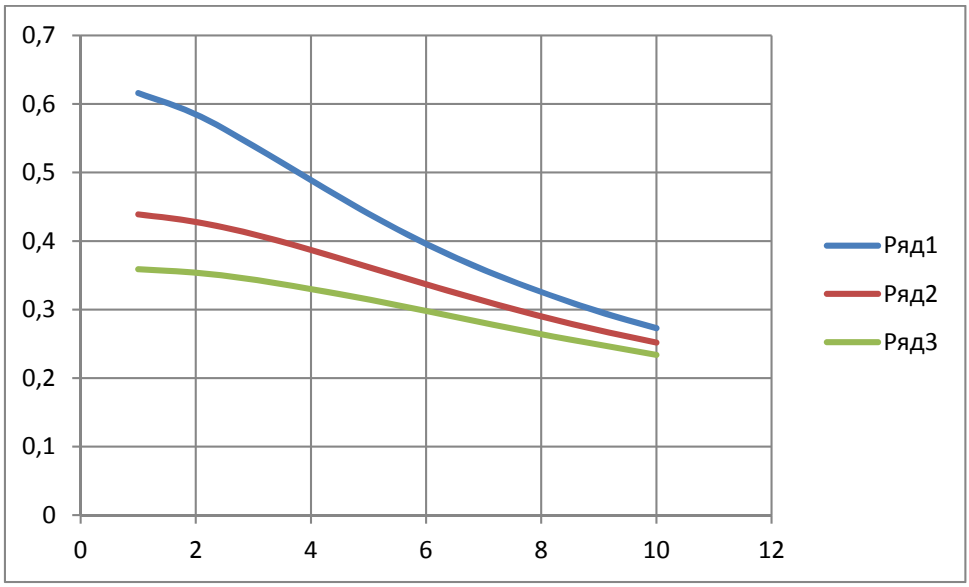

Рисунок 7 – Залежність кутової швидкості тангажу ($с^{-1}$) від початкової швидкості (м/с) при скочуванні з похилої рампи при куті нахилу рампи 35°: ряд 1 – $L = 5$ м, $V_0 = 6$ м/с; ряд 2 – $L = 10$ м, $V_0 = 8$ м/с; ряд 3 – $L = 15$ м, $V_0 = 10$ м/с

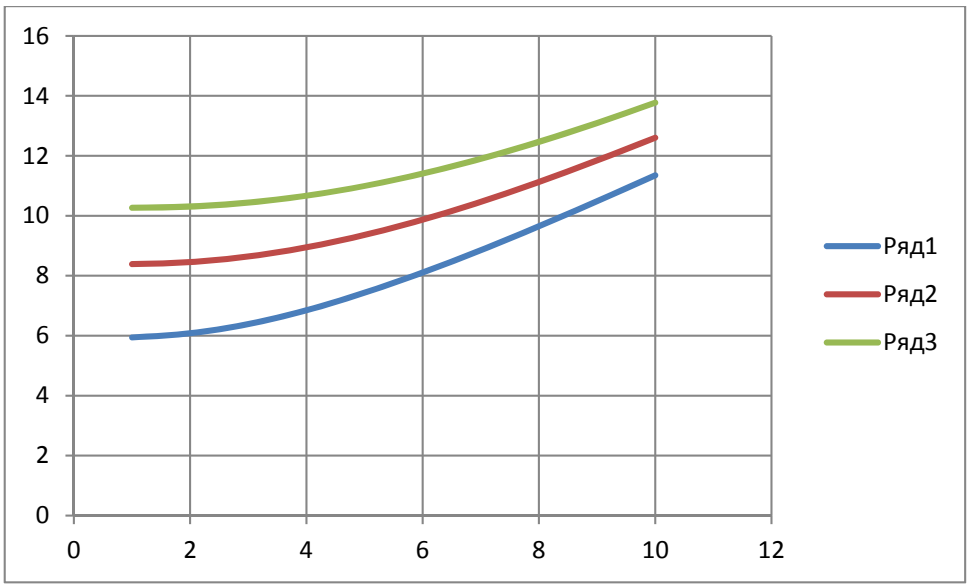

Рисунок 8 – Залежність швидкості центру мас шлюпку (м/с) в момент відриву від рампи від початкової швидкості (м/с) при куті нахилу рампи 35°: ряд 1 – $L = 5$ м, $V_0 = 6$ м/с; ряд 2 – $L = 10$ м, $V_0 = 8$ м/с; ряд 3 – $L = 15$ м, $V_0 = 10$ м/с

Як видно з графіків рис. 5 та даних табл. 1 час скочування зі збільшенням довжини шлюпки зростає а зі збільшенням початкової швидкості зменшується. Графіки залежностей часу скочування для шлюпок довжиною 5, 10 и 15 метрів мають вигляд майже еквідистантних вгнутих кривих. Час скочування для шлюпок довжиною 5, 10 и 15 м при зростанні початкової швидкості з 1 до 10 м/с зменшується з 0,762 до 0,234 с, з 1,136 до 0,444 с, і з 1,424 до 0,634 с відповідно, тобто зменшення часу при зростанні швидкості зі збільшенням довжини для досліджуваних шлюпок складає 0,528, 0,692 і 0,79 м/с.

З рис. 6 видно, що кути тангажу зі збільшенням швидкості зменшуються, а зі збільшенням довжини шлюпки зростають. Графіки являють собою спадні вгнуті криві, причому криві для більших довжин розташовуються вище, а їх кривизна зменшується – (залежність наближається до лінійної). Максимальні кути тангажу мають місце при початковій швидкості 1 м/с і для шлюпок довжиною 5, 10 і 15 м (табл. 1) складають 14,873°, 15,56° і 15,847° відповідно. При збільшенні початкової швидкості до 10 м/с кути тангажу цих шлюпок зменшуються до 1,975°, 3,465° і 4,612°.

Кутові швидкості тангажу зі збільшенням початкової швидкості так само, як і зі збільшенням довжини спадають (рис. 7). При мінімальній початковій швидкості для досліджуваних довжин відповідні кутові швидкості тангажу дорівнюють (табл. 1) 0,616 $с^{-1}$, 0,439 $с^{-1}$ і 0,359 $с^{-1}$. При максимальній початковій швидкості ці величини зменшуються до 0,273 $с^{-1}$, 0,252 $с^{-1}$ і 0,234 $с^{-1}$.

Навпаки, швидкості центру мас шлюпок в момент відриву від рампи зі збільшенням початкової швидкості так само, як і зі збільшенням довжини зростають (рис. 8): для шлюпок довжиною 5 м, 10 м і 15 м - з 5,944 м/с до 11,352 м/с, з 8,387 м/с до 12,604 м/с і з 10,267 м/с до 13,773 м/с. Зі збільшенням початкової швидкості різниця швидкості центрів мас шлюпок різної довжини в момент відриву зменшується (відповідні криві сходяться).

На рис. 9 і 10 представлені графіки змінювання кута тангажу та кутової швидкості тангажу для щлюпок довжиною 5,10,15 м під час їх скочування.

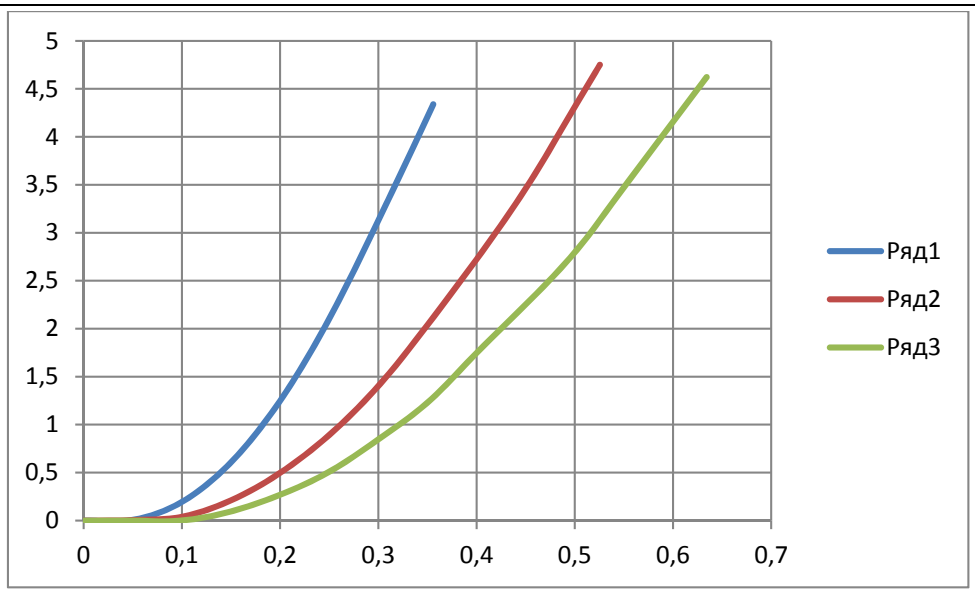

Рисунок 9 – Залежність кута тангажу ($с^{-1}$) від часу (с) при скочуванні з похилої рампи при куті нахилу рампи 35°: ряд 1 – $L = 5$ м, $V_0 = 6\frac{м}{с}$; ряд 2 – $L = 10$ м, $V_0 = 8\frac{м}{с}$; ряд 3 – $L = 15$ м, $V_0 = 10\frac{м}{с}$

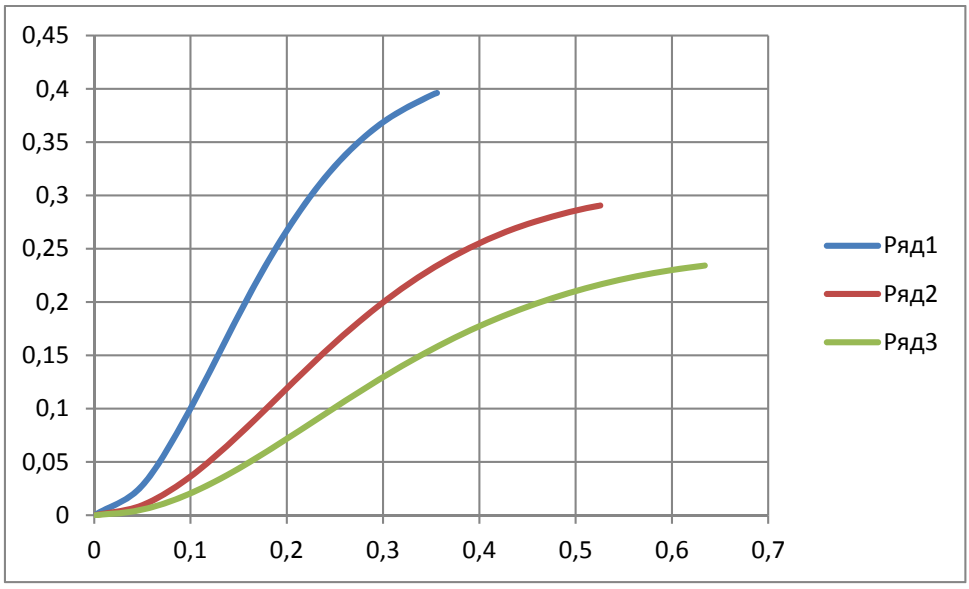

Рисунок 10 – Залежність кутової швидкості тангажу ($с^{-1}$) від часу (с) при скочуванні з похилої рампи при куті нахилу рампи 35°: ряд 1 – $L = 5$ м, $V_0 = 6\frac{м}{с}$; ряд 2 – $L = 10$ м, $V_0 = 8\frac{м}{с}$; ряд 3 – $L = 15$ м, $V_0 = 10\frac{м}{с}$

Як видно з рис. 9 і 10 графіки залежності кута тангажу представлені вгнутими, а графіки залежності кутової швидкості тангажу – опуклими кривими. При цьому зі збільшенням часу кривини графіків зменшуються, а самі графіки для шлюпок більшої довжини розташовуються нижче. Кути тангажу для шлюпок довжиною 5, 10, і 15 м в момент відриву від рампи при заданих початкових швидкостях при розгоні шлюпки по похилій рампі, складають 4,34°, 4,75° і 4,62°, а кутові швидкості – 0,396 $с^{-1}$, 0,291 $с^{-1}$ і 0,262 $с^{-1}$ відповідно.

Висновки. Запропонований підхід дозволяє за допомогою чисельних експериментів проводити раціональний вибір параметрів руху РШВП, що сходить з похилої рампи.

На основі отриманих результатів в подальших дослідженнях слід з'ясувати вплив кута нахилу рампи і розташування центру мас шлюпки на параметри її руху на початку вільного падіння.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Free-fall lifeboat. *Wärtsilä : webportal*. URL : https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/free-fall-lifeboat

2. Ныряющий катер. *MSD.com.ua : webportal*. URL : https://msd.com.ua/katera/nyryayushhij-kater/

3. Современные спасательные средства. *Korabley.net : webportal*. URL : http://korabley.net/news/spasatelnaja_shljupka_i_sovremennye_spasatelnye_sredstva/2010-12-13-724

4. *Seafarers.com.ua : webportal*. URL : http://seafarers.com.ua/manned-free-fall-lifeboat-world-record-drop-40-meters-up/4013/

5. Александров М. Н. Безопасность человека на море. Ленинград : Судостроение, 1983. 208 с.

6. Консолидированный текст конвенции СОЛАС-74. Санкт-Петербург. : ЗАО ЦНИИМФ, 1999.

7. Бугаенко Б. А., Нгуен Нгок Тан Особенности экстренного спуска с судна плавсредства с людьми. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв : НУК, 2010. № 1 (430). С. 17–24.

8. Казарезов А. Я. Сбрасываемые спасательные шлюпки. *Збірник наукових праць УДМТУ*. Миколаїв : УДМТУ, 1998. № 1 (349). С. 76–80.

9. Колегаев, М. А., Иванов Б. Н., Басанец Н. Г. Безопасность жизнедеятельности и выживание на море : учебное пособие. Одесса : ОГМА, 2008. 352 с.

10. Михрин Л. М. Безопасность мореплавания. Санкт-Петербург : АМКОС, 2009. 559 с.

11. Бугаенко Б. А., Галь А. Ф. Принципы проектирования и особенности конструирования судовых устройств и судовой техники морских технологий. Николаев : УГМТУ, 1995. Ч. 2. С. 86–101.

12. Микитюк В. Е., Миронов Д. А. Расчет параметров движения шлюпки свободного падения при аварийном сбросе. *Материалы конференции «Безопасность мореплавания и ее обеспечение при проектировании и постройке судов»*. Николаев : НУК, 2007. С. 99–100.

13. Микитюк В. Е., Миронов Д. А. Параметри движения шлюпки свободного падения перед приводнением. *Матеріали І Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці»*. Миколаїв : НУК, 2010. С. 84–89.

14. Теоретична механіка: підручник для студентів ВНТЗ / кол. авторів за заг. ред. І.В.Кузьо. Харків : Фоліо, 2017. 780 с.

15. Березин И. С., Жидков Н. П. Методы вычислений. Москва : Физматгиз, 1962. Т.2. 639 с.

REFERENCES

1. Free-fall lifeboat. *Wärtsilä : webportal*. URL : https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/free-fall-lifeboat

2. Nihryayuthiyj kater. *MSD.com.ua : webportal*. URL : https://msd.com.ua/katera/nyryayushhij-kater/

3. Sovremennihe spasateljnihe sredstva. *Korabley.net : webportal*. URL : http://korabley.net/news/spasatelnaja_shljupka_i_sovremennye_spasatelnye_sredstva/2010-12-13-724

4. *Seafarers.com.ua : webportal*. URL : http://seafarers.com.ua/manned-free-fall-lifeboat-world-record-drop-40-meters-up/4013/

5. Aleksandrov, M. N. (1983). *Bezopasnostj cheloveka na more.* Leningrad : Sudostroenie.

6. Konsolidirovannihyj tekst konvencii SOLAS-74. (1999). Sankt-Peterburg. : ZAO CNIIMF.

7. Bugaenko B. A., Nguen Ngok Tan. (2010). Osobennosti ehkstrennogo spuska s sudna plavsredstva s lyudjmi. *Zbirnyk naukovykh prats NUK.* Mykolaiv : NUK. *1 (430),* 17–24.

8. Kazarezov A. Ya. (1998). Sbrasihvaemihe spasateljnihe shlyupki. *Zbirnyk naukovykh prats UDMTU.* Mykolaiv : UDMTU. *1 (349),* 76–80.

9. Kolegaev, M. A., Ivanov, B. N., Basanec, N. G. (2008). *Bezopasnostj zhiznedeyateljnosti i vihzhivanie na more : uchebnoe posobie.* Odessa : OGMA.

10. Mikhrin L. M. (2009). *Bezopasnostj moreplavaniya.* Sankt-Peterburg : AMKOS.

11. Bugaenko B. A., Galj A. F. (1995). *Principih proektirovaniya i osobennosti konstruirovaniya sudovihkh ustroyjstv i sudovoyj tekhniki morskikh tekhnologiyj.* Nikolaev : UGMTU. Ch. 2.

12. Mikityuk V. E., Mironov D. A. (2007). Raschet parametrov dvizheniya shlyupki svobodnogo padeniya pri avariyjnom sbrose. *Materialih konferencii «Bezopasnostj moreplavaniya i ee obespechenie pri proektirovanii i postroyjke sudov».* Nikolaev : NUK. 99–100.

13. Mikityuk V. E., Mironov D. A.(2010). Parametri dvizheniya shlyupki svobodnogo padeniya pered privodneniem. *Materialy I Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Innovatsii v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi».* Mykolaiv : NUK. 84–89.

14. *Teoretychna mekhanika : pidruchnyk dlia studentiv VNTZ* / kol. avtoriv za zah. red. I. V.Kuzo. Kharkiv : Folio.

15. Berezin I. S., Zhidkov N. P. (1962). *Metodih vihchisleniyj.* Moskva : Fizmatgiz. T. 2.

Горалик Е. Т., Крюков Н. Н. О ДВИЖЕНИИ СПАСАТЕЛЬНОЙ ШЛЮПКИ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ ПРИ СХОЖДЕНИИ С НАКЛОННОЙ РАМПЫ

Рассматривается задача о движении спасательной шлюпки свободного падения, которая моделируется однородным стержнем, при сходе с наклонной рампы. Цель исследования заключается в разработке и использовании адекватной математической модели для исследования параметров движения спасательной шлюпки свободного падения при сходе с наклоненной под углом 35 ° рампы для исследования влияния начальной скорости и длины шлюпки на ее скорость, угловую скорость и угол тангажа в течение первой фазы падения. Получено решающих систему обыкновенных дифференциальных уравнений и сформулированы соответствующую задачу Коши, которая решается численно с помощью метода Рунге-Кутта. Дифференциальные уравнения движения стержня составленные с помощью уравнений Лагранжа второго рода. Предложенный подход позволяет с помощью численных экспериментов проводить рациональный выбор параметров движения РШВП, что сходит с наклонной рампы. На основе полученных результатов в дальнейших исследованиях следует выяснить влияние угла наклона рампы и расположение центра масс шлюпки на параметры ее движения в начале свободного падения.

Ключевые слова: *спасательная шлюпка свободного падения, плоско-параллельное движение, стержень, наклонная рампа, уравнения Лагранжа второго рода, обыкновенные дифференциальные уравнения, задача Коши, численное моделирование, метод Рунге-Кутта.*

Goralik E. T., Kryukov N. N. ON THE MOVEMENT OF A FREE FALL LIFEBOAT WHEN DESCENDING FROM THE INCLINED RAMP

The problem of the motion of a free-fall lifeboat, which is modeled by a homogeneous rod, when descending from an inclined ramp, is considered. The aim of the study is to develop and use an adequate mathematical model to study the parameters of the free-fall lifeboat when descending from a ramp inclined at an angle of 35 ° to study the effect of initial speed and length of the boat on its speed, angular velocity and pitch angle during the first phase. The solution system of ordinary differential equations is obtained and the corresponding Cauchy problem is formulated, which is solved numerically using the Runge-Kutta method. Differential equations of rod motion are compiled using Lagrange equations of the second kind. The proposed approach allows using numerical experiments to make a rational choice of motion parameters of the RSHVP, descending from the inclined ramp. Based on the results obtained, further studies should determine the effect of the angle of the ramp and the location of the center of mass of the boat on the parameters of its movement at the beginning of free fall.

Keywords: *free fall lifeboat, plane-parallel motion, rod, inclined ramp, Lagrange equation of the second kind, ordinary differential equations, Cauchy problem, numerical simulation, Runge-Kutta method.*

© Горалик Є. Т., Крюков М. М.

Статтю прийнято
до редакції 03.06.20