

Горалік Є.Т., Крюков М.М., Лупіна Т.О.

ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ РЯТУВАЛЬНИХ ШЛЮПОК ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ ВПРОДОВЖ ФАЗИ ОБЕРТАННЯ З УРАХУВАННЯМ МИТТЄВИХ ЗНАЧЕНЬ СИЛ ТЕРТЯ

В статті наведено короткий огляд досліджень руху рятувальних шлюпок вільного падіння (РШВП) при скиданні з судна, зокрема, розрахункові дослідження руху РШВП протягом фази обертання з урахуванням деяких конструкційних і експлуатаційних факторів виконано з використанням диференціальних рівнянь в узагальнених (полярних) координатах, отриманих за допомогою рівнянь Лагранжа другого роду.

Розглянуто методику та результати дослідження руху РШВП, яка моделюється однорідним стрижнем, при сходженні з похилої рампи протягом фази обертання з урахуванням усереднених значень сил тертя.

Отримано вирази для нормальної реакції рампи та сили тертя в кожний момент руху протягом фази обертання, з використанням яких запропоновано розв'язувальну систему двох звичайних нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку.

Апробація запропонованого підходу здійснена для випадку моделювання шлюпки однорідним тонким стрижнем довжиною L . 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 значеннях кута нахилу рампи $\alpha = 35^\circ$ і $\alpha = 25^\circ$ для стрижнів довжиною 5, 10 і 15 м при початкових швидкостях 6, 8 і 10 м/с відповідно.

Отримані результати розрахунків відносної нормальної реакції рампи, тривалості фази обертання, кута нахилу, радіальної і кутової швидкості порівнюються з відповідними результатами розрахунків при усереднених значеннях сили тертя. Встановлено, що результати, отримані при врахуванні миттєвих значень сили тертя, мало відрізняються від результатів, отриманих при врахуванні їх усередненого значення. При цьому, характер зміни параметрів руху стрижня залежить від кута нахилу рампи α та довжини і швидкості стрижня на початку фази обертання.

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

Мета роботи полягає в розробці та апробації методики дослідження руху рятувальних шлюпок вільного падіння протягом фази обертання з урахуванням миттєвих значень сил тертя в порівнянні з дослідженнями, виконаними з урахуванням усереднених значень цих сил.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При моделюванні спуску рятувальних шлюпок методом вільного падіння їх рух в багатьох роботах зарубіжних і вітчизняних авторів [1-6] поділяється на 4 взаємопов'язані фази (етапи): ковзання по похилій рампі, обертання в кінці рампи, вільне падіння і вхід у воду. Найбільш складним серед фаз руху рятувальної шлюпки до удару об воду є фаза обертання, яка триває з моменту, коли центр мас опиняється над краєм опори (крайнім роликом рампи) до моменту сходу з рампи опорних поверхонь шлюпки [7, 8]. Рух рятувальної шлюпки протягом фази обертання зазвичай [1-6] описується в декартовій системі координат

системою трьох диференціальних рівнянь другого порядку, в кожне з яких входить наперед невідома нормальна реакція рампи. Аналітичний розв'язок таких рівнянь на сьогодні, нажаль, невідомий, тому вони розв'язуються чисельними методами з використанням відповідних комп'ютерних програм.

В роботах [9-13] для дослідження руху рятувальної шлюпки протягом фази обертання з урахуванням деяких конструкційних і експлуатаційних факторів (початкової швидкості, кута нахилу рампи, розташування центру мас шлюпки відносно опорної поверхні) використовуються більш прості системи двох диференціальних рівнянь в полярних координатах з полюсом, розташованим на нижньому кінці рампи, отримані за допомогою рівнянь Лагранжа другого роду [14].

В роботі [15] розглянуто рух РШВП, що моделюється однорідним стрижнем протягом фази обертання в узагальнених (полярних) координатах (рис. 1) з урахуванням усередненого значення сили тертя. В якості узагальнених координат слугують радіус $r = OC$ – відстань від центру мас стрижня до краю опори і кут φ між горизонтальною віссю x і напрямком OC – віссю стрижня.

Кінетична енергія стрижня при його плоско-паралельному русі протягом фази обертання визначається з виразу:

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

де $I_{zc} = \frac{mL^2}{12}$ – момент інерції стрижня відносно центру мас (m – маса, L – довжина стрижня), $V_c = \sqrt{\dot{r}^2 + r^2\dot{\varphi}^2}$ – модуль вектора швидкості центру мас ($\dot{r} = \frac{dr}{dt}$ – модуль радіальної швидкості центру мас, $\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt}$ – модуль кутової швидкості стрижня).

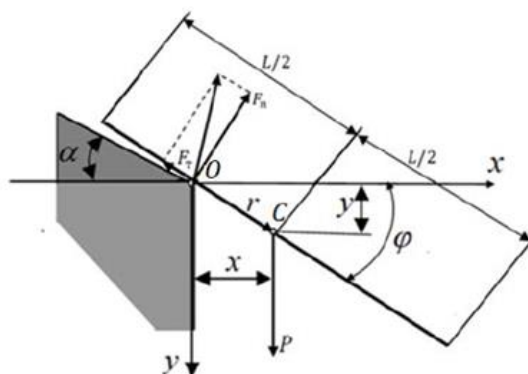


Рисунок 1 – Сходження однорідного стрижня з похилої опори з урахуванням тертя

Після підстановки вищенаведених виразів і алгебраїчних перетворень отримано наступну формулу для кінетичної енергії стрижня в узагальнених координатах:

$$T = \frac{mL^2}{12} \cdot \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + \frac{m(r^2 + r^2\dot{\varphi}^2)}{2}.$$

В даному випадку рівняння Лагранжа другого роду мають вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{r}} \right) - \frac{\delta T}{\delta r} &= Q_1, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta T}{\delta \dot{\varphi}} \right) - \frac{\delta T}{\delta \varphi} &= Q_2, \end{aligned}$$

де Q_1 і Q_2 – узагальнені сили по координатах r і φ .

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

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

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

де $\ddot{r} = \frac{d^2 r}{dt^2}$ – модуль радіального прискорення центру мас, $\ddot{\varphi} = \frac{d^2 \varphi}{dt^2}$ – модуль кутового прискорення стрижня.

З їх урахуванням рівняння Лагранжа записуються так:

$$\begin{aligned} m\ddot{r} - m\dot{\varphi}^2 &= Q_1; \\ 2mr\dot{\varphi} + \left(\frac{L^2}{12} + r^2 \right) m\ddot{\varphi} &= Q_2. \end{aligned} \quad (1)$$

Узагальнену силу Q_1 по координаті r визначили, розглянувши можливе переміщення системи, зумовлене можливим приростом δr узагальненої координати r (рис. 2а).

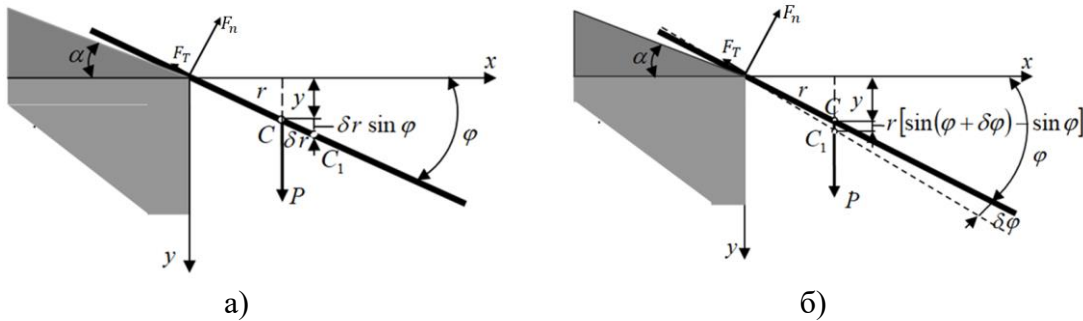


Рисунок 2 – Можливі переміщення системи, зумовлені приростом узагальнених координат:

а) узагальненої координати δr , б) узагальненої координати $\delta \varphi$

В початковий момент фази обертання нормальна реакція рампи F_n і сила тертя F_T мають максимальні значення, які визначаються за формулами:

$$F_n = mg \cos \alpha, \quad F_T = f mg \cos \alpha,$$

де g – прискорення вільного падіння, α – кут нахилу рампи, f – коефіцієнт тертя.

Поклавши силу тертя рівною половині від максимального її значення в початковий момент фази обертання $F_T = 0,5 f mg \cos \alpha$, з рівності роботи узагальненої сили Q_1 на можливому переміщенні δr сумі елементарних робіт всіх активних сил, прикладених до системи на цьому переміщенні, отримано:

$$\delta A = Q_1 \delta r = (mg \sin \varphi - f 0,5 mg \cos \alpha) \delta r.$$

Звідси

$$Q_1 = mg \sin \varphi - f 0,5 mg \cos \alpha.$$

Узагальнену силу Q_2 по координаті φ визначено, розглянувши можливе переміщення системи, зумовлене можливим приростом узагальненої координати $\delta \varphi$ (рис. 2б).

Робота узагальненої сили Q_2 на можливому переміщенні $\delta \varphi$ дорівнює сумі елементарних робіт всіх активних сил, прикладених до системи на цьому переміщенні:

$$\delta A = Q_2 \delta \varphi = mgr (\sin \varphi \cos \delta \varphi + \cos \varphi \sin \delta \varphi - \sin \varphi) \approx mgr \cos \varphi \delta \varphi,$$

оскільки $\cos \delta \varphi \approx 1$ і $\sin \delta \varphi \approx \delta \varphi$.

Звідси

$$Q_2 = mgr \cos \varphi.$$

Підставивши отримані вище вирази для узагальнених сил у рівняння Лагранжа, отримано наступну розв'язувальну систему диференціальних рівнянь другого порядку, яку приведено до нормальної форми Коші і розв'язано чисельно методом Рунге-Кутта.

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

Проведено розрахунки параметрів руху для стрижнів довжиною $L = 5, 10$ і 15 метрів при початкових швидкостях $6, 8$ і 10 метрів за секунду відповідно, кутах нахилу рампи $\alpha=35^\circ$ і $\alpha=25^\circ$ та значеннях коефіцієнту тертя рівних $0; 0,1$ і $0,2$.

Аналіз результатів розрахунків показав, що вплив тертя на параметри руху РШВП протягом фази обертання незначний і залежить від кута нахилу рампи. При зменшенні кута нахилу рампи вплив тертя на кут повороту стрижня і його кутову швидкість зростає, а на лінійну швидкість центру мас, навпаки, зменшується. При цьому, тертя в більшій мірі впливає на поступальний рух стрижня, ніж на його обертання.

Так, зростання часу скочування, кута нахилу стрижня, кутової швидкості та зменшення радіальної швидкості центру мас в усіх випадках при збільшенні коефіцієнту тертя від 0 до $0,2$ не перевищувало $2,75\%$, $1,16\%$, $3,34\%$ та $4,38\%$.

Таким чином, була підтверджена можливість використання запропонованого підходу для розрахунку параметрів руху РШВП при скиданні з судна з урахуванням усереднених значень сил тертя за допомогою чисельних експериментів.

Основні результати дослідження. Для врахування значення сили тертя між РШВП і рампою в кожний момент часу протягом фази обертання в даній роботі автори спиралися на рівняння Лагранжа другого роду (1). При цьому враховуючи, що кутове прискорення стрижня в кожний момент часу протягом фази обертання згідно основного рівняння динаміки тіла, що обертається відносно осі, визначається залежністю $\ddot{\varphi} = \frac{F_n r}{mL^2}$, то сила нормальної реакції рампи та сила тертя

будуть обчислюватись за формулами $F_n = \frac{m \cdot L^2}{12} \cdot \ddot{\varphi} \cdot \frac{1}{r}$ і $F_T = f \cdot \frac{m \cdot L^2}{12} \cdot \ddot{\varphi} \cdot \frac{1}{r}$. Враховуючи останній вираз для сили тертя, в кожний момент часу протягом фази обертання отримуємо наступну систему розв'язувальних диференціальних рівнянь (3):

$$\begin{aligned} \ddot{r} - r\dot{\varphi}^2 &= g \sin \varphi - f \cdot \frac{L^2}{12} \cdot \ddot{\varphi} \cdot \frac{1}{r} \\ 2r\dot{r}\dot{\varphi} + \left(\frac{L^2}{12} + r^2\right)\ddot{\varphi} &= gr \cos \varphi \end{aligned} \quad (3)$$

Початкові умови:

$$r(0) = 0, \dot{r}(0) = V_0, \varphi(0) = \alpha, \dot{\varphi}(0) = 0. \quad (4)$$

Поклавши $z_1 = r$, $z_2 = \dot{r}$, $z_3 = \varphi$, $z_4 = \dot{\varphi}$, $a = L^2/12$, приводимо отриману систему диференціальних рівнянь до нормальної форми Коші:

$$\begin{aligned} \frac{dz_1}{dt} &= z_2, \quad \frac{dz_2}{dt} = z_1(z_4)^2 + g \sin z_3 - a \frac{f}{z_1} \cdot \frac{gz_1 \cos z_3 - 2z_1 z_2 z_4}{(z_1)^2 + a}, \\ \frac{dz_3}{dt} &= z_4, \quad \frac{dz_4}{dt} = \frac{gz_1 \cos z_3 - 2z_1 z_2 z_4}{(z_1)^2 + a}. \end{aligned} \quad (5)$$

Початкові умови мають вигляд

$$z_1(0) = 0, \quad z_2(0) = V_0, \quad z_3(0) = \alpha, \quad z_4(0) = 0. \quad (6)$$

Задачу Коші (5), (6) розв'язуємо за допомогою чисельного методу Рунге-Кутта четвертого порядку точності при кроку в часі $\Delta t_n = 0.001$ с.

В табл.1 представлені результати розрахунків параметрів руху в кінці фази обертання для стрижнів довжиною $L = 5, 10$ і 15 метрів при початкових швидкостях $6, 8$ і 10 метрів за секунду відповідно, кути нахилу опорної поверхні $\alpha = 35^\circ$ і $\alpha = 25^\circ$ та значеннях коефіцієнту тертя, рівних 0 і $0,2$. В табл. 1 наведені також результати розрахунків при значенні коефіцієнту тертя $0,2$ при врахуванні середнього значення нормальної реакції рампи ($0,2^*$), отримані в роботі [15], та відносні різниці $\Delta\%$ цих результатів та результатів отриманих з урахуванням миттєвого значення сили тертя.

На рис. 3 представлені графіки зміни відносної нормальної реакції рампи при скочуванні стрижня довжиною п'ять метрів з початковою швидкістю 6 м/с при коефіцієнті тертя, рівному $0,2$ та кутах нахилу стрижня 35 і 25 градусів, а на рис. 4 – графіки зміни відповідних параметрів руху протягом фази обертання.

Як видно з рис. 3, графік відносної динамічної реакції при куті нахилу рампи 35° розташовується нижче відповідного графіка при куті нахилу рампи 25° . Це свідчить про збільшення сил тертя при зменшенні кута нахилу рампи, що призводить (див. рис. 4) до зменшення радіальної швидкості центру мас стрижня і збільшення часу скочування, кутової швидкості і кутового прискорення.

Таблиця 1 – Результати розрахунків параметрів руху стрижнів з урахуванням сил тертя

		f	$t, \text{с}$	φ°	$\dot{\varphi}, \text{с}^{-1}$	$\dot{r}, \text{м/с}$
$L=5 \text{ м}$ $\alpha = 35^\circ$	$V_0=6 \text{ м/с}$	0	0,356	39,38	0,396	8,112
		0,2	0,363	39,62	0,4066	7,908
		0,2*	0,364	39,61	0,407	7,809
		$\Delta\%$	-0,27	0,03	-0,1	1,25
$L=10 \text{ м}$ $\alpha = 35^\circ$	$V_0=8 \text{ м/с}$	0	0,526	39,73	0,291	11,13
		0,2	0,538	40,02	0,298	10,84
		0,2*	0,539	40,01	0,299	10,69
		$\Delta\%$	-0,19	0,02	-0,34	1,38
$L=15 \text{ м}$ $\alpha = 35^\circ$	$V_0=10 \text{ м/с}$	0	0,635	39,61	0,234	13,78
		0,2	0,649	39,87	0,2405	13,42
		0,2*	0,649	39,84	0,241	13,24
		$\Delta\%$	0,0	0,07	-0,21	1,34
$L=5 \text{ м}$ $\alpha = 25^\circ$	$V_0=6 \text{ м/с}$	0	0,368	30,21	0,460	7,677
		0,2	0,377	30,57	0,475	7,44
		0,2*	0,377	30,50	0,474	7,357
		$\Delta\%$	0,0	0,23	0,21	1,12
$L=10 \text{ м}$ $\alpha = 25^\circ$	$V_0=8 \text{ м/с}$	0	0,545	30,69	0,3383	10,5
		0,2	0,56	31,09	0,3496	10,16
		0,2*	0,56	31,05	0,3496	10,04
		0,2	0,0	0,13	0,0	1,18
$L=15 \text{ м}$ $\alpha = 25^\circ$	$V_0=10 \text{ м/с}$	0	0,657	30,53	0,2726	13,01
		0,2	0,675	30,904	0,2814	12,59
		0,2*	0,674	30,85	0,2814	12,44
		$\Delta\%$	0,15	0,17	0,0	1,19

*Дані роботи [15]

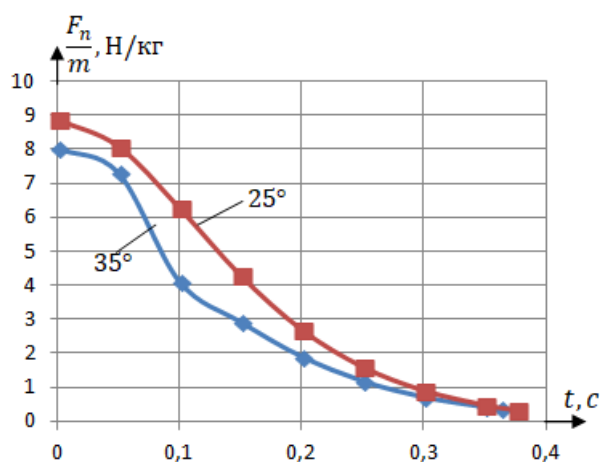
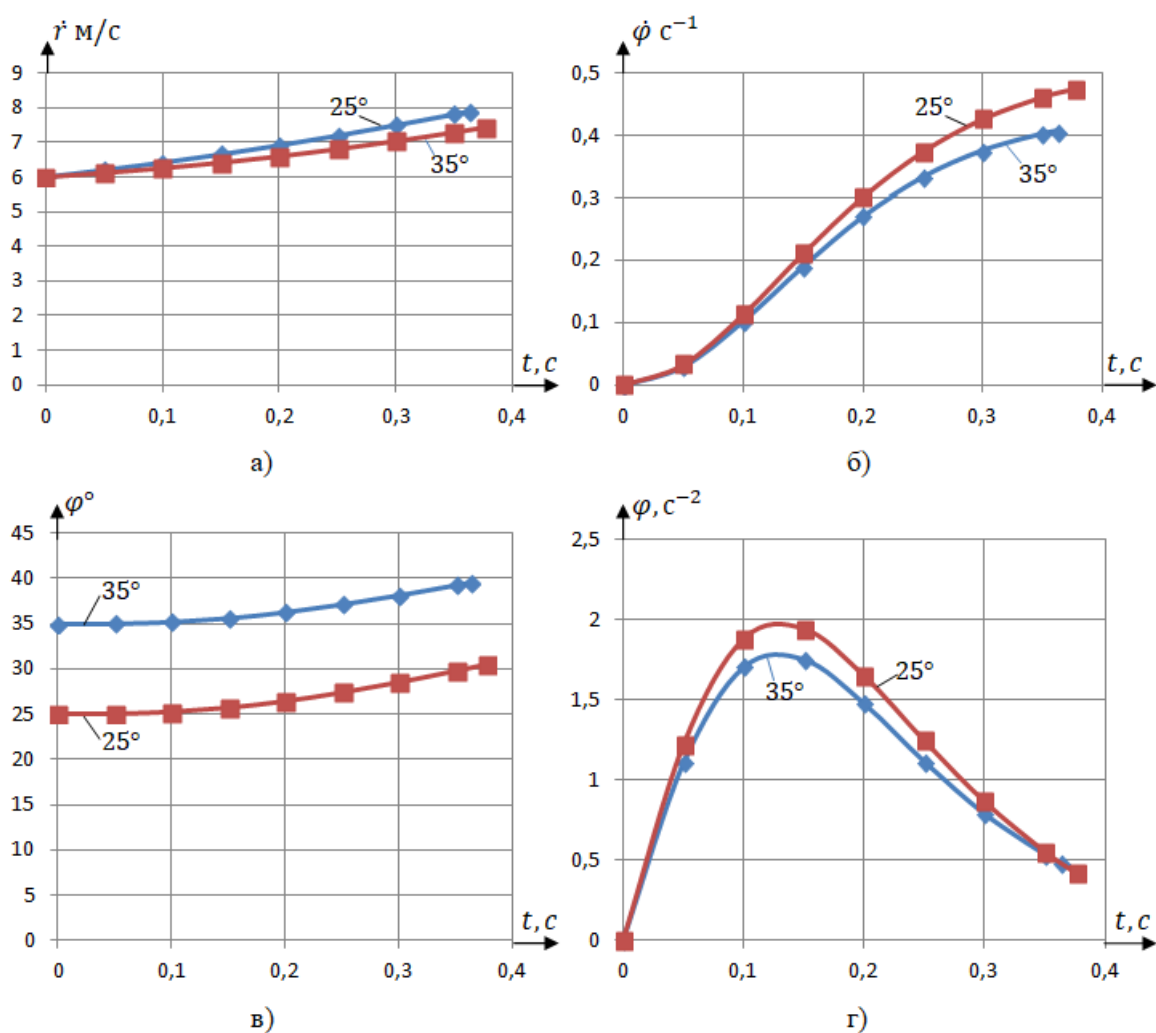


Рисунок 3 – Графіки зміни відносної нормальної реакції рампи протягом фази обертання

Рисунок 4 – Графіки зміни параметрів руху стрижня протягом фази обертання:
а) радіальна швидкість, б) кутова швидкість, в) кут нахилу, кутове прискорення

З представлених в табл.1 даних видно, що результати, отримані при врахуванні миттєвих значень сили тертя, мало відрізняються від результатів, отриманих при врахуванні усередненого значення цих сил, що підтверджує правильність аналізу характеру зміни сили тертя протягом фази

обертання [14]. При цьому характер зміни параметрів руху стрижня при миттєвих і усереднених значеннях сили тертя залежить від кута нахилу рампи α та довжини і швидкості стрижня.

Так, при $\alpha = 35^\circ$ час t фази обертання, обчислений при врахуванні миттєвого значення сили тертя, зменшується або залишається незмінним в порівнянні з часом, обчисленим при усередненій силі тертя ($\Delta\% = -0,27 \dots 0,00$), кутова швидкість в кінці фази обертання також зменшується ($\Delta\% = -0,10 \dots -0,21$), а кут повороту, навпаки, зростає ($\Delta\% = 0,03 \dots 0,07$) так само, як і радіальна швидкість ($\Delta\% = 1,25 \dots 1,38$).

При $\alpha = 25^\circ$ час t фази обертання, обчислений при врахуванні миттєвого значення сили тертя, залишається незмінним або зростає в порівнянні з часом, обчисленим при усередненій силі тертя ($\Delta\% = 0,00 \dots 0,15$), кутова швидкість в кінці фази обертання зростає або залишається без зміни ($\Delta\% = 0,21 \dots 0,00$), кут повороту також зростає ($\Delta\% = 0,13 \dots 0,23$) так само, як і радіальна швидкість ($\Delta\% = 1,12 \dots 1,19$).

Таким чином, використання при розрахунках миттєвих значень сили тертя в порівнянні з усередненим її значенням в найбільшій мірі впливає на величину радіальної швидкості центру мас стрижня.

Висновки. Запропонована методика дозволяє за допомогою чисельних експериментів проводити дослідження руху рятувальної шлюпки вільного падіння протягом фази обертання при сходженні з похилої рампи з урахуванням миттєвих значень сили тертя, початкової швидкості, довжини шлюпки та кута нахилу рампи.

ЛІТЕРАТУРА

1. 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. 147-158, 1990.
2. 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.
3. 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.
4. Reaz, M., and Khondoker, H., 1998, "Effects of Launching Parameters on the Performance of a Free-Fall Lifeboat," *Nav. Eng. J.*, 110(4), pp. 67–73.
5. Karim, 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*, 4(1), pp. 77–88.
6. 616 Evaluation of Free-fall Lifeboats launch performance. Netherlands Regulatory Framework (NE RF) – Maritime. Retrieved from https://puc.overheid.nl/nsi/doc/PUC_1746_14/1/
7. Микитюк, В. Е. Расчет параметров движения шлюпки свободного падения при аварийном сбросе [Текст] / В. Е. Микитюк, Д. А. Миронов // Матер. конф. "Безопасность мореплавания и ее обеспечение при проектировании и постройке судов". – Николаев: НУК, 2007. – С. 99–100.
8. В.Е.Микитюк, Д.А.Миронов. Параметры движения шлюпки свободного падения перед приводнением / Матеріали І Міжнар. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» Миколаїв: - НУК, 2010. – С. 84-89.
9. Goralik J.T., Kryukov M.M., Lupina T.O. Investigation of the rotation phase of a free-fall lifeboat movement. *International periodic scientific journal "Modern engineering and innovative technologies"*. Issue 12/Part2., pp. 65-76, 2020.
10. Є.Т. Горалік, М.М. Крюков. Математическое моделирование фазы вращения движения твердого тела при сходжении с наклонной рампы. *Прикладні питання математичного моделювання*. Т.3, № 2.2., 2020. С. 113-122.
11. Горалік Є.Т., Крюков М. М., Лупіна Т. О. Рівняння фази обертання руху тіла, що скочується з похилої плоскої опори, в декартових і узагальнених координатах. Матеріали ІХ Міжнар. наук.-практ. конф.

- «Математика в сучасному технічному університеті», Київ, 28–29 грудня 2020 р. — Вінниця: Видавець ФОП Кушнір Ю. В., 2021. С 53-56.
12. Є.Т. Горалік, М.М. Крюков, Т.О. Лупіна. Рух рятувальної шлюпки вільного падіння при сходженні з похилої рампі. Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – К.: ДУІТ, 2021. – Випуск 2(33). – С.23-35.
 13. Є.Т. Горалік, М.М. Крюков, Т.О. Лупіна. Оцінка впливу зміщення центру мас рятувальної шлюпки вільного падіння відносно опорної поверхні на її рух при скиданні з судна. Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – К.: ДУІТ, 2022. – Випуск 2(33). – С.165-176.
 14. Теоретична механіка: підручник для студентів ВНТЗ/ кол. авторів за заг. ред. І.В. Кузьо. Харків: Фоліо, 2017. 780 с.
 15. Є.Т. Горалік, М.М. Крюков, Т.О. Лупіна. Вплив сил тертя на сходження рятувальної шлюпки вільного падіння з похилої рампі. Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – К.: ДУІТ, 2024. – Випуск 2 (40). – С.127-137.

REFERENCES

1. 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].
2. 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].
3. 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].
4. Reaz, M., and Khondoker, H.(1998). Effects of Launching Parameters on the Performance of a Free-Fall Lifeboat, Nav. Eng.J., Vol. 110(4), 67–73. [in English].
5. 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].
6. 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/
7. Mykytyuk, V.E. (2007) “*Raschet parametrov dvyzheniya shliupky svobodnogo padeniya pry avaryinom sbrose*” [Tekst] [Calculation of the parameters of a free-fall boat during an emergency drop] / V. E. Mykytiuk, D. A. Myronov // Mater. konf. "Bezopasnost moreplavaniya y ee obespechenye pry proektyrovanny y postroiike sudov". – Nykolaev : NUK, 99–100. [in Russian].
8. V.E.Mykytyuk, D.A.Myronov. (2010) “*Parametry dvyzheniya shlyupky svobodnogo padeniya pered pryvodnemyem*” [Parameters of free fall boat motion before flooding] / Materialy I Mizhnar. nauk.-tekh. konf. «Innovatsiyi v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi» Mykolayiv: - NUK, 84-89. [in Russian].
9. Goralik J.T., Kryukov M.M., Lupina T.O. (2020) Investigation of the rotation phase of a free-fall lifeboat movement. International periodic scientific journal "Modern engineering and innovative technologies". Issue 12/Part2., 65-76. [in Ukrainian].
10. Horalik Ye.T., Kriukov M.M. (2020) “*Matematycheskoe modelyrovanye fazy vrashcheniya dvyzheniya tverdoho tela pry skhozhdenniy s naklonnoi rampy*” [Mathematical modeling of the rotation phase of a solid body movement when descending from the inclined ramp]. Prykladni pytannia matematychnoho modeliuvannia. Vol.3, No 2.2., 113-122. [in Russian].
11. Goralik Ye.T., Kryukov M.M., Lupina T.O. (2021) “*Rivniannia fazy obertannia rukhu tila, shcho skochuietsia z pokhyloi ploskoi opory, v dekartovykh i uzahalnenykh koordynatak*”. [Equation of the phase of rotation of the motion of a body rolling from an inclined flat support in Cartesian and generalized

- coordinates] *Materialy IX Mizhnar. nauk.-prakt. konf. «Matematyka v suchasnomu tekhnichnomu universyteti»* [Proceedings of Ninth International Scientific-Practical Conference “Mathematics in Modern Technical University”], Kyiv, 28–29 hrudnia 2020 r. — Vinnytsia: Vydavets FOP Kushnir Yu. V., 53-56. [in Ukrainian].
12. Goralik Ye.T., Kryukov M.M., Lupina T.O. “*Rukh riatsuvalnoi shliupky vilnoho padinnia pry skhodzhenni z pokhyloi rampy*” [The movement of the freefall lifeboat when descending from the inclined ramp], *Vodnyi transport* [Water transport], *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii*. – K.: DUIT, 2021. – Vypusk 2(33), 23-35. [in Ukrainian].
 13. Goralik Ye.T., Kryukov M.M., Lupina T.O. “*Otsinka vplyvu zmishchennia tsentru mas riatsuvalnoi shliupky vilnoho padinnia vidnosno opornoj poverkhni na yii rukh pry skydanni z sudna*” [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], *Vodnyi transport* [Water transport], *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii*. – K.: DUIT, 2022. – Vypusk 2(33), 165-176. [in Ukrainian].
 14. *Teoretychna mekhanika. Pidruchnyk* [Theoretical mechanics: textbook] (2017) / Count.authors per zag. Ed. I.V.Kuzio. – Kharkiv: Folio, 780 s. [in Ukrainian].
 15. Goralik Ye.T., Kryukov M.M., Lupina T.O. “*Vplyv syl tertia na skhodzhennia riatsuvalnoi shliupky vilnoho padinnia z pokhyloi rampy*” [Effect of frictional forces on freefall lifeboat descent from inclined ramp], *Vodnyi transport* [Water transport], *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii*. – K.: DUIT, 2024. – Vypusk 2 (40), 127-137. [in Ukrainian].

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

STUDY OF THE FREE FALL LIFEBOATS MOVEMENT DURING THE ROTATION PHASE, TAKING INTO ACCOUNT INSTANTANEOUS VALUES OF FRICTIONAL FORCES

The article provides a brief overview of the free fall lifeboats movement studies during discharge from the vessel, in particular, the calculated studies of the lifeboats movement during the rotation phase, taking into account some structural and operational factors, which were performed using differential equations in generalized (polar) coordinates obtained using Lagrange equations of the second kind.

The method and results of studying the free fall lifeboats movement, which are simulated by a homogeneous rod, when descending from an inclined ramp, during the rotation phase, taking into account the average values of frictional forces, are considered.

Formulas for the normal reaction of the ramp and the frictional force at each moment of movement during the rotation phase are obtained, using which a solution system of two ordinary nonlinear differential equations of the second order is proposed.

The proposed approach was tested on the case of modeling a boat like a homogeneous rod of length L . A corresponding solution system of four ordinary nonlinear differential equations of the first order in the form of Cauchy in generalized coordinates r i φ was obtained, for which the Cauchy problem was formulated, which was solved numerically by the Runge-Kutt method of the fourth order of accuracy at the values of the ramp angle of inclination $\alpha=35^\circ$ and $\alpha=25^\circ$ for rods of length 5, 10 and 15 m at initial speeds of 6, 8 and 10 m/s, respectively.

The obtained results of calculations of the relative normal reaction of the ramp, the duration of the rotation phase, the angle of inclination, the radial and angular velocities are compared with the corresponding calculation results at the average values of the frictional force. It has been established that the results obtained taking into account the instantaneous values of the frictional force differ little from the results obtained when taking into account their average value. At the same time, the nature of the change in the parameters of the rod movement depends on the angle of inclination of the ramp α , and the length and speed of the rod at the beginning of the rotation phase.

Key words: free-fall lifeboat, inclined ramp, frictional force, Lagrange equations of the second kind, ordinary differential equations, Cauchy problem, numerical modeling, Runge-Kutt method.