

УДК 629.5.01:658:338

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2023.1\(490\).2](https://doi.org/10.15589/znp2023.1(490).2)

SPEED OF THE VESSEL IN UNSTABLE CIRCULATION

ШВИДКІСТЬ РУХУ СУДНА НА НЕСТАЛІЙ ЦИРКУЛЯЦІЇ

Anatoliy Ya. Kazariezov^{1,2}

KazariezovAnatoli1950@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8586-5596

Yuriy M. Pashchenko¹

yurii.pashchenko@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-8307-0316

А.Я. Казарєзов^{1,2},

докт. техн. наук, професор

Ю.М. Пащенко¹,

канд. техн. наук, доцент

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv¹**Mykolaivsky Scientific and Recentexpert-Criminalistic Center, Mykolaiv²**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв¹**Миколаївський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр, м. Миколаїв²*

Abstract. Formulas for determining the change in the speed of the ship at the evolutionary stage of circulation are considered in the paper. Comparative calculated trajectories of the ship's center of gravity in the evolutionary period of circulation depending on the formula for calculating the change in speed of the ship during maneuvering are given. A formula for calculating the change in the ship's speed at the evolutionary stage of circulation is proposed.

It is shown that with weak maneuvers of the ship, all the formulas for calculating the speed of the ship in unsteady circulation, which are analyzed in the article, are suitable for constructing the ship's trajectory. It has been confirmed that the use of empirical formulas for calculating the ship's movement speed at the evolutionary stage of circulation allows to simplify the calculation of the ship's trajectory.

It is proved that the formulas of A.M. Basin's, G.A. Firsov's and R.Ya. Pershits's for the dependence of the ship's speed drop on unsteady circulation give the same results when calculating the ship's trajectory for the entire evolutionary period of the circulation.

The formula proposed by the authors of the article for the quadratic dependence of the speed of the ship on the square of the drift angle and the formula of G.E. Pavlenko and K.K. Fedyavsky's method for the dependence of the drop in the ship's speed on unsteady circulation gives the same results when calculating the ship's trajectory.

The results of the calculation of the ship's trajectory on the evolution using the formulas of the quadratic dependence of the speed of the ship on the square of the drift angle, G.E. Pavlenko, K.K. Fedyavsky for the dependence of the drop in velocity significantly differ from the results obtained by the formulas of A.M. Basin's, G.A. Firsov's and R.Ya. Pershits's. The head is in the direction of increasing the lateral displacement and runout of the vessel's center of gravity.

The formula proposed by the authors of the article for the dependence of the ship's speed on the square of the drift angle is more convenient for constructing a method for calculating the «Zigzag» maneuver, since it can be more easily integrated into a linearized scheme for calculating the ship's motion parameters in the evolutionary period of circulation compared to the formulas of G.E. Pavlenko and K.K. Fedyavsky.

Key words: circulation; ship; speed of the ship; maneuvering stage of circulation; maneuvering characteristics of the ship.

Анотація. В роботі розглянуто формули для визначення зміни швидкості ходу судна на еволюційному етапі циркуляції. Наведено порівняльні розрахункові траєкторії руху центра тяжіння судна в еволюційному періоді циркуляції залежно від формули розрахунку зміни швидкості ходу судна при маневруванні. Запропоновано формулу для розрахунку зміни швидкості ходу судна на еволюційному етапі циркуляції.

Показано, що при слабких маневрах судна всі формули для розрахунку швидкості ходу судна на несталій циркуляції, які проаналізовані в статті, придатні для побудови траєкторії судна. Підтверджено, що використання емпіричних формул для розрахунку швидкості ходу судна на еволюційному етапі циркуляції дозволяє спростити розрахунок траєкторії руху судна.

Доведено, що формули А.М. Басіна, Г.А. Фірсова і Р.Я. Першиця для залежності падіння швидкості судна на несталій циркуляції дають однакові результати при розрахунку траєкторії судна для всього еволюційного періоду циркуляції.

Запропонована авторами статті формула квадратичної залежності швидкості ходу судна від квадрата кута дрейфу та формули Г.Є. Павленка та К.К. Федяєвського для залежності падіння швидкості ходу судна на несталій циркуляції дають однакові результати при розрахунку траєкторії судна. Результати розрахунку траєкторії судна на еволюції з використанням формул квадратичної залежності швидкості ходу судна від квадрата кута дрейфу, формул Г.Є. Павленка, К.К. Федяєвського для залежності падіння швидкості значно відрізняються від результатів, отриманих за формулами А.М. Басіна, Г.А. Фірсова і Р.Я. Першиця в бік збільшення бічного зміщення та вибігу центра тяжіння судна.

Запропонована авторами статті формула залежності швидкості ходу судна від квадрата кута дрейфу більш зручніша для побудови методу розрахунку маневру «зигзаг», оскільки може бути легше вбудована в лінеаризовану схему розрахунку параметрів руху судна в еволюційному періоді циркуляції порівняно з формулами Г.Є. Павленка та К.К. Федяєвського.

Ключові слова: циркуляція; судно; швидкість ходу судна; еволюційний етап циркуляції; маневрені характеристики судна.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Аварії суден, пов'язані із зіткненнями суден і посадкою на мілину, становлять значну частину всіх аварій на водному транспорті [1, с. 24, 76]. Маневрені характеристики судна є важливими характеристиками. Більшість маневрів судна здійснюється в еволюційному періоді циркуляції. Розрахунок траєкторії руху судна на циркуляції дозволяє оцінити відповідність стандартам маневрених якостей та надати проектувальникам та судноводіям оцінку маневрених якостей судна [3].

При випробуванні судна на поворотливість необхідно виконати маневр циркуляції на борт під час перекладки керма на максимальний кут (35°). Випробування на «зигзаг» починаються з перекладки керма на заданий кут з початкового положення керма в діаметральній площині, а потім, коли напрямок руху судна зміниться на певне значення, кермо перекладається на той же кут, на протилежний борт. В обох випадках судно при випробуванні знаходиться на етапі несталій циркуляції.

Траєкторія руху на несталій циркуляції є важливою маневреною характеристикою судна. Визначення діаметра циркуляції та швидкості ходу судна на циркуляції дозволяють у першому наближенні оцінити маневрені характеристики, що важливо як при проектуванні, так і експлуатації судна. Використання наближених формул до розрахунку швидкості ходу на еволюційному етапі циркуляції значно полегшує розрахунок параметрів руху судна. Існує ряд формул для розрахунку швидкості ходу судна на еволюційному етапі циркуляції. Більшість рекомендованих формул мають емпіричний характер. Розробники формул наводять рекомендації щодо використання формул залежно від типу та відносних характеристик судна.

У роботі здійснена спроба на прикладі розрахунку характеристик циркуляції, що не встановилася, показати вплив вибору формули для розрахунку швидкості ходу на тривалість періоду несталій циркуляції

і траєкторію руху центру тяжіння в зазначений період руху судна. Наведено рекомендації щодо вибору формули для розрахунку падіння швидкості ходу судна на маневреному етапі циркуляції.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Розрахунок швидкості ходу судна при русі на несталій циркуляції здійснюється шляхом вирішення системи нелінійних диференціальних рівнянь руху судна. Рівняння руху судна записуються як рівняння рівноваги сил у проекції на осі системи координат, пов'язаної з судном, і рівняння рівноваги моментів щодо точки перетину діаметральної площини судна з площиною мідель-шпангоуту [2, с. 331].

При вирішенні системи диференціальних рівнянь руху судна можливі два шляхи. При прямуванні по першому шляху дослідники лінеаризують рівняння рівноваги сил у проекції на поздовжню вісь судна і вирішують спільно з двома рівняннями, що залишилися. При прямуванні другим шляхом дослідники вносять припущення про характер залежності ряду сил від елементів руху судна та виконують наближену оцінку сил залежно від величини цих елементів руху судна. Обидва шляхи призводять до значного ускладнення розрахунку характеристик руху судна на несталій циркуляції [2, с. 331].

Більшість дослідників щодо швидкості ходу на маневреному етапі циркуляції судна схилиються до введення тієї чи іншої емпіричної формули для визначення залежності швидкості ходу від елементів його руху, що істотно спрощує розрахункову схему характеристик руху судна на несталій циркуляції без значної втрати точності розрахунків.

Дослідами встановлено, що відносне зменшення швидкості ходу суден, які здійснюють циркуляцію однакового відносного радіусу, виявляється близьким. Цей факт дає підставу ряду дослідників рекомен-

дувати для використання при розрахунках падіння швидкості ходу формули, єдиним аргументом у яких є величина відносного радіусу циркуляції [3, с. 603].

Зазначене вище припущення забезпечує простоту практичного розрахунку характеристик руху судна на несталій циркуляції, проте з нього випливає неминучий висновок, що відносний час переходу до стаціонарних значень всіх параметрів руху судна однаковий. При введенні припущення передбачається, що миттєве значення швидкості відповідає швидкості ходу судна при циркуляції з радіусом, що збігається з миттєвим значенням радіуса кривизни траєкторії на несталій циркуляції [2, с. 332]. Це припущення ряд дослідників називає «гіпотезою стаціонарності».

А.М. Басін запропонував формулу для визначення миттєвого значення швидкості ходу судна на несталій циркуляції [5, с. 107]:

$$\bar{v}_c = \frac{v_c}{v_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{3,9}{R_c^2}}}, \quad (1)$$

де: v_c – миттєва швидкість ходу судна на циркуляції, v_0 – швидкість ходу судна до початку циркуляції, R_c – відносний радіус циркуляції, що встановилася. Формула рекомендується для річкових суден та суден з подібними до річкових обводами.

К.К. Федяєвський для морських суден запропонував рівняння для визначення миттєвого значення швидкості ходу судна на несталій циркуляції [5, с. 107]:

$$\frac{5,9}{R_c^2} + 1 = \frac{1}{v_c^3} \sin \frac{\pi}{2} v_c \quad (2)$$

Емпірична формула Г.А. Фірсова для визначення миттєвого значення швидкості ходу судна на несталій циркуляції виглядає наступним чином [5, с. 107]:

$$\bar{v}_c = \frac{v_c}{v_0} = \frac{1}{408 \cdot R_c}. \quad (3)$$

Емпірична формула Р.Я. Першиця застосовується в тих випадках, коли відносний радіус циркуляції $R_c > 1$ або відносна кутова швидкість циркуляції $\omega_c < 1$. Миттєве значення швидкості ходу судна на несталій циркуляції становить [5, с. 107]:

$$\bar{v}_c = \frac{v_c}{v_0} = \frac{R_c^2}{R_c^2 + 1,9}. \quad (4)$$

Деякі дослідники, посилаючись на наявний досвід, стверджують, що застосування наведених формул і рівняння визначення швидкості ходу судна на несталій циркуляції дає близькі результати [5, с. 107].

Ю.П. Потехін, спеціаліст у галузі керованості суден, заперечує можливість використання вищенаведених формул для розрахунку траєкторії судна на несталій циркуляції, віддаючи перевагу виключно формулі Г.Є. Павленка [2, с. 332]:

$$\bar{v}_c = \frac{v_c}{v_0} = 1 - \mu_c \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{\tau}{\tau_y} \right), \quad (5)$$

$$\mu_c = \frac{v_0 - v_y}{v_0},$$

де: v_y – швидкість ходу судна на несталій циркуляції, τ – безрозмірний час ходу судна на несталій циркуляції, τ_y – безрозмірний час встановлення швидкості ходу судна на циркуляції. Відповідно до рекомендації Г.Є. Павленка при миттєвому перекладанні керма $\tau_y = 6$ і формула набуває вигляду:

$$\bar{v}_c = \frac{v_c}{v_0} = 1 - (1 - v_y) \sin^2 \left(\frac{\pi}{12} \tau \right). \quad (6)$$

Якщо за результатами розрахунку кута дрейфу, що встановився, на циркуляції безрозмірний час виявиться $\tau_y > 6$, так Г.Є. Павленко рекомендує скористатися формулою (5).

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Невирішеною частиною проблеми є відсутність порівняння характеристик руху судна на несталій циркуляції під час використання різних емпіричних формул для визначення падіння швидкості ходу судна.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета дослідження полягає в здійсненні кількісної оцінки впливу використання різних формул для визначення падіння швидкості ходу на несталій циркуляції на траєкторію руху судна та в розробці рекомендацій щодо вибору формули для розрахунку швидкості ходу судна на еволюційному етапі циркуляції і при виконанні маневру «зигзаг».

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методи дослідження, використані в роботі, поділяються на загальнонаукові та спеціальні. До загальнонаукових методів належать методи: порівняння, аналізу, синтезу. До спеціальних методів належать методи: числового розв'язку системи диференціальних рівнянь, графічної побудови числових результатів, підбору алгебраїчних рівнянь для встановлення залежності у перехідному процесі.

Об'єктом дослідження є процес розрахунку та графічної побудови траєкторії руху судна на еволюційному етапі циркуляції.

Предметом дослідження є формули, що визначають закономірність падіння швидкості руху судна на еволюційному етапі циркуляції.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Порівняння результатів розрахунку траєкторії судна на несталій циркуляції здійснюється на при-

кладі тестового судна. За основні характеристики тестового судна прийнято вихідні дані прикладу розрахунку, наведеного в [2, с. 335, 360]. Основні характеристики тестового судна зведені у табл. 1.

У [2, с. 332] наведено порядок і приклад розрахунку елементів руху тестового судна за лінеаризованим рівнянням при виході на несталу циркуляцію. Розра-

Таблиця 1. Основні характеристики тестового судна

Вихідні дані	Одиниці виміру	Чисельні значення
Довжина	м	100
Ширина	м	17
Висота борту	м	5,2
Об'ємна водотоннажність повна	м ³	5000
Осадка з вантажем, середня	м	4,6
Осадка носом	м	4,6
Осадка кормою	м	4,6
Диферент		0
Коефіцієнт загальної повноти		0,639
Коефіцієнт поздовжньої повноти		0,67
Коефіцієнт повноти мідель-шпангоуту		0,955
Абсциса центру тяжіння	м	0
Число кермів		1
Відстань осі балера керма від міделя	м	48
Наведена площа керма	м ²	10
Висота пера руля, рахуючи по осі балера	м	3,34
Відносне подовження керма		1,11
Число гвинтів		2
Діаметр гвинта	м	1,65
Дискове відношення гвинта		0,68
Упор гвинта	Н	128000
Швидкість ходу	м/с	7
Число Фруда		0,223
Кут перекладки керма на один борт	град.	30
Площа діаметральної площини	м ²	448
Площа, що доповнює контур кормової частини діаметральної площини	м ²	13,3
Наведений коефіцієнт повноти площі діаметральної площини		0,975
Номер кормового прикордонного шпангоуту		16,5
Наведений коефіцієнт повноти кормової частини площі діаметральної площини		1,117
Поправка на підріз корми		1,146
Момент інерції маси судна щодо вертикальної осі	тс*м*с ²	255000
Коефіцієнт приєднаної маси при поздовжньому русі судна		0,037
Коефіцієнт приєднаної маси при поперечному русі судна		0,48
Коефіцієнт приєданого моменту інерції маси		0,400
Коефіцієнт нормальної сили		0,145
Коефіцієнт позиційного моменту		0,092
Коефіцієнт демпфіруючого моменту		0,0683
Коефіцієнт навантаження гвинта за упором		2,437
Коефіцієнт впливу корпусу		1
Наведений коефіцієнт впливу корпусу		0,3
Наведений коефіцієнт впливу корпусу та гвинта		0,3
Коефіцієнт бічної сили на корпусі судна		1
Наведений кутовий коефіцієнт керма		1,844
Лінеаризований коефіцієнт підйомної сили		0,412

хунки параметрів руху судна, що виконані в [2, с. 337, табл. 5], прийняті як контрольний приклад.

За програмою, складеною авторами статті на підставі алгоритму, наведеного в [2, с. 332], виконані розрахунки параметрів руху судна на несталій циркуляції для тестового судна. Розрахунок здійснено за лінеаризованою схемою. Збіг результатів розрахунку, виконаного авторами статті, з даними контрольного прикладу показує надійність програми, розробленої авторами статті [4].

Також виконано визначення характеристик руху судна на несталій циркуляції, при використанні емпіричних формул (1) – (6), які визначають падіння швидкості ходу судна на еволюційному етапі циркуляції. При цьому безрозмірний час руху судна на етапі несталій циркуляції приймався, як і в контрольному прикладі, 16 одиниць.

При визначенні швидкості судна за методом К.К. Федяєвського виникає необхідність розв'язання рівняння (2). Рішення рівняння виконується шляхом використання допоміжного графіка, наведеного в [2, с. 363, рис. 60].

Як показано в [4] з високим ступенем надійності залежність відносної швидкості ходу судна від відносного радіуса циркуляції при вирішенні рівняння К.К. Федяєвського, апроксимується поліномом:

$$\bar{v}_c = 0,0127 \cdot (R_c)^3 - 0,1391 \cdot (R_c)^2 + 0,5765 \cdot R_c + 0,0185. \quad (7)$$

Отже, рівняння К.К. Федяєвського (2) перетворюється на формулу К.К. Федяєвського (7).

При визначенні швидкості ходу судна за методом Г.Є. Павленка виникає необхідність заздалегідь декларативно призначати час встановлення швидкості ходу судна на циркуляції. Визначення падіння швидкості ходу судна на етапі несталій циркуляції за формулами інших авторів проводиться прямим розрахунком і не викликає будь-яких труднощів.

Безрозмірний час руху судна на етапі несталій циркуляції становить у контрольному прикладі 16 одиниць при розрахунку за лінеаризованою схемою. При розрахунку руху судна на несталому етапі циркуляції за нелінійною схемою в контрольному прикладі безрозмірний час руху судна становить 6 одиниць. Деякій некоректності подібного підходу до порівняння лінеаризованого та нелінійного методів присвячена інша стаття авторів, яка публікується в цьому збірнику.

Траєкторії руху центру тяжіння судна розраховані авторами статті для різних залежностей падіння швидкості судна при русі на несталій циркуляції за лінеаризованою схемою. Безрозмірний час руху судна на несталій циркуляції приймався 6 одиниць як і в контрольному прикладі при використанні нелінійної схеми розрахунку.

Зіставлення траєкторій руху судна при різних залежностях падіння швидкості ходу на несталій циркуляції показано на рис. 1.

З розгляду траєкторій руху центру тяжіння, наведених на рис. 1, можна зробити висновок про досить близький збіг траєкторій, розрахованих при різних залежностях для падіння швидкості судна на несталій циркуляції. Деякі траєкторії, розраховані

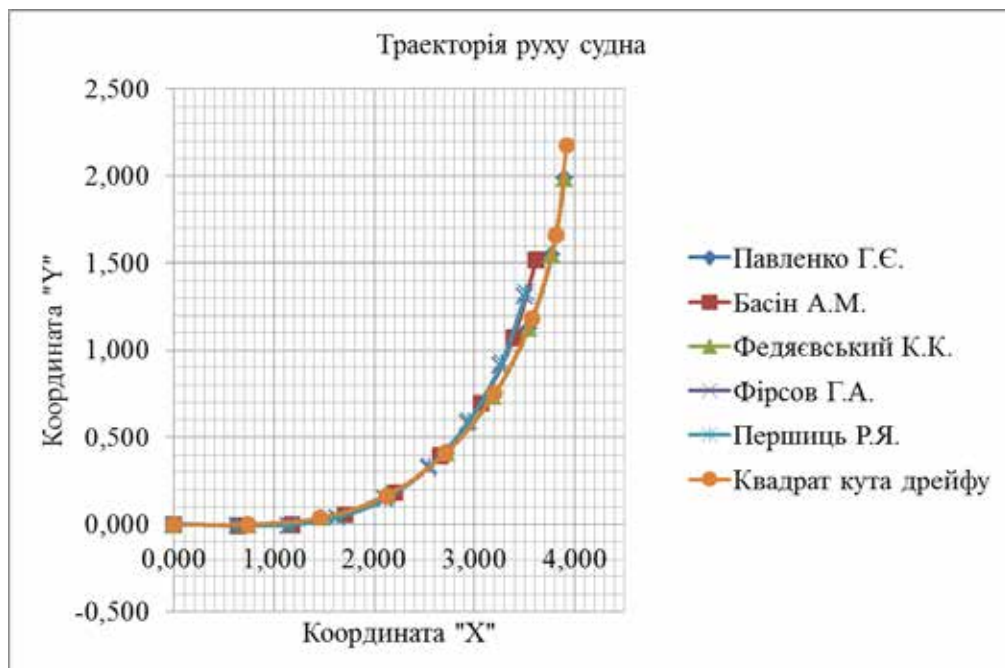


Рис. 1. Траєкторії руху центру тяжіння судна для різних залежностей падіння швидкості на несталій циркуляції

за формулами різних авторів, практично збігаються між собою.

На рис. 2 наведено траєкторії руху центру тяжіння судна, розраховані за формулами Павленка Г.Є., Федяєвського К.К., Фірсова Г.А. та Першиця Р.Я. Траєкторії, розраховані з використанням формул Павленка Г.Є. та Федяєвського К.К. збігаються між собою повністю. Траєкторії, розраховані з використанням формул Фірсова Г.А. і Першиця Р.Я., різняться між собою незначно. Між двома групами траєкторій існує значна відмінність (35%) у координаті "Y" (бічне зміщення центру тяжіння судна) і дещо менша відмінність (10 %) у координаті "X" (вибіг центру тяжіння судна). Вказані розбіжності спостерігаються наприкінці еволюційного етапу маневрування. На початку еволюційного етапу маневрування судна означені розбіжності значно менші, що легко побачити на рис. 2.

Рекомендована авторами цієї статті формула для визначення миттєвого значення швидкості ходу судна на несталій циркуляції, має вигляд:

$$\bar{v}_c = \frac{v_c}{v_0} = 1 - (1 - v_y) \cdot \left(\frac{\beta}{\beta_y}\right)^2. \quad (8)$$

де: v_y – швидкість ходу судна на циркуляції, що встановилася, β – поточний кут дрейфу судна, β_y – кут дрейфу судна, на циркуляції, що встановилася.

Формула сконструйована за подобою до формули Г.Є. Павленка. Відмінність запропонованої авторами статті формули залежності падіння швидкості судна на несталій циркуляції від формули Г.Є. Павленка

полягає в тому, що як аргумент, якій визначає падіння швидкості ходу судна, обрано квадрат кута дрейфу судна. Тоді як у формулі Г.Є. Павленка таким аргументом є час процесу.

При розрахунку траєкторії судна, що виконує маневр «зигзаг», необхідно враховувати перекладку керма судна на протилежний борт. Перекладання керма судна на протилежний борт призводить до зменшення кута дрейфу в часі, що викликає певні складнощі для розрахунку траєкторії судна з використанням формули Г.Є. Павленка. Пропонована у цій статті формула для визначення миттєвого значення швидкості ходу судна на несталій циркуляції, позбавлена зазначеного недоліку.

На рис. 3 показано зіставлення траєкторії руху центру тяжіння судна, що розраховані за формулою для падіння швидкості судна залежно від квадрата кута дрейфу, запропонованої авторами статті, з траєкторіями, розрахованими за формулами інших авторів.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Порівняємо детальніше траєкторії руху центру тяжіння судна, розраховані за різними формулами. На рис. 3 наведено траєкторії руху центру тяжіння судна для залежностей падіння швидкості ходу судна на циркуляції за Г.А. Фірсовим формула (3) та А.М. Басіним формула (1), де спостерігається добрий збіг траєкторій.

Траєкторія, що розрахована з використанням формули А.М. Басіна, відрізняється на 13% у координаті "Y" (бічний зсув центру тяжіння судна) і 6% у координаті "X" (вибіг центру тяжіння судна) від траєкто-

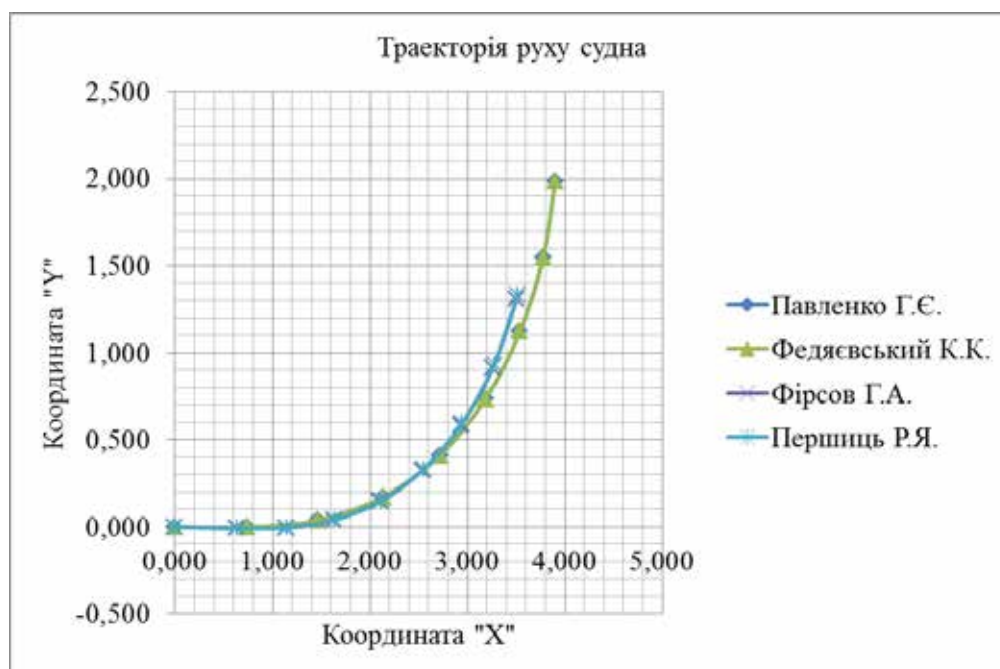


Рис. 2. Траєкторії руху центру тяжіння для різних залежностей падіння швидкості судна на несталій циркуляції

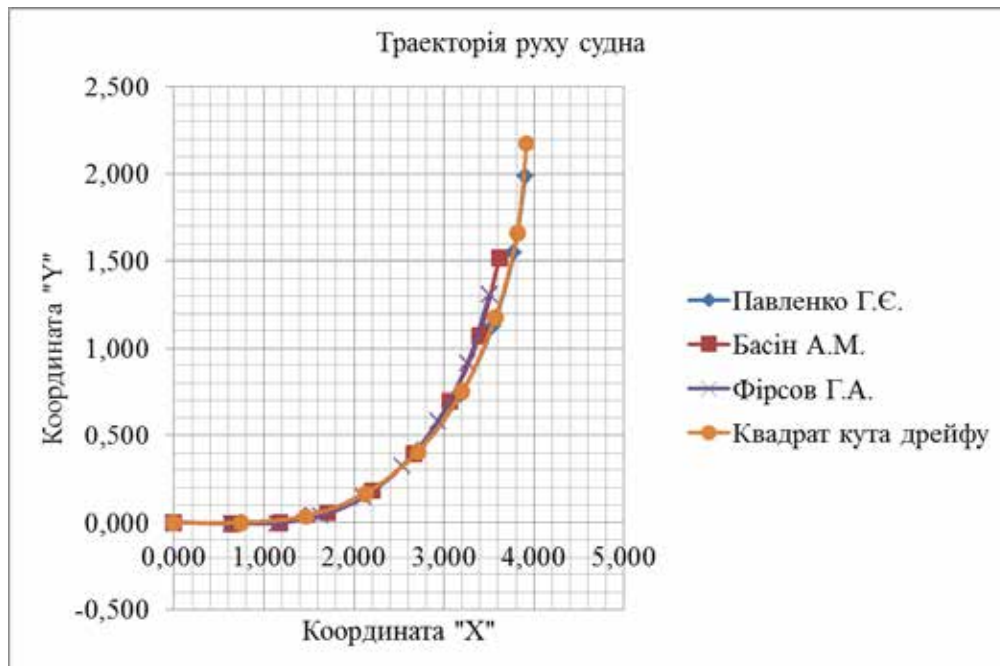


Рис. 3. Траєкторія руху центру тяжіння судна для різних залежностей падіння швидкості судна на несталій циркуляції

рій, розрахованих з допомогою формул Г.А. Фірсова та Р.Я. Першиця (рис. 3). Ця різниця спостерігається наприкінці еволюційного етапу маневрування. На ранній стадії еволюційного етапу маневрування судна різниця в координатах значно менша, що дозволяє стверджувати тотожність результатів розрахунку траєкторії судна за слабких маневрів при використанні формул А.М. Басіна, Г.А. Фірсова та Р.Я. Першиця.

На рис. 3 наведено траєкторії руху центру тяжіння для залежностей падіння швидкості судна на несталій циркуляції, за формулою Г.Є. Павленка – формула (6), і квадратичної залежності від кута дрейфу – формула (8). З розгляду рис. 3 слід зауважити, що траєкторії руху центру тяжіння збігаються між собою, але спостерігається відставання в русі судна при використанні формули Г.Є. Павленка, отже, і формули К.К. Федяєвського, в порівнянні з розрахунком за формулою квадратичної залежності швидкості судна від кута дрейфу.

Траєкторія, що розрахована з використанням формули квадратичної залежності швидкості судна від кута дрейфу, відрізняється у бік більших значень на 8% у координаті "Y" (бічне зміщення центру тяжіння судна) та не відрізняється у координаті "X" (вибіг центру тяжіння судна) від траєкторій, розрахованих з використанням формул Г.Є. Павленка та К.К. Федяєвського.

Ця різниця в 8% у бічному зміщенні центру тяжіння судна спостерігається наприкінці еволюційного етапу маневрування. На ранніх стадіях еволюційного етапу маневрування судна відмінність у координатах значно менша, що також дозволяє використовувати

при розрахунках траєкторії судна при слабких маневрах формулу квадратичної залежності швидкості судна від кута дрейфу замість формул Г.Є. Павленка і К.К. Федяєвського.

Якщо врахувати, що в більшості випадків збільшення бічного зміщення центру тяжіння судна є запасом у безпечний бік при маневруванні судна, так формула, запропонована авторами статті є придатною для практичних розрахунків замість формул Г.Є. Павленка і К.К. Федяєвського.

Враховуючи, що формула квадратичної залежності швидкості судна від кута дрейфу для розрахунку швидкості судна на несталій циркуляції дозволяє простіше побудувати методику для розрахунку траєкторії при маневрі «зигзаг», так остаточно слід рекомендувати цю формулу для подальшого використання.

ВИСНОВКИ

1. Використання наближених формул для розрахунку швидкості ходу судна на еволюційному етапі циркуляції судна дозволяє спростити розрахунок параметрів руху судна. При слабких маневрах всі проаналізовані формули розрахунку швидкості ходу на несталій циркуляції, дають близькі результати при розрахунку траєкторії судна.

2. Формули А.М. Басіна, Г.А. Фірсова і Р.Я. Першиця для залежності падіння швидкості судна на несталій циркуляції дають однакові результати при розрахунку траєкторії судна практично протягом всього еволюційного періоду циркуляції судна.

3. Формули квадратичної залежності швидкості судна від квадрата кута дрейфу, Г.Є. Павленка та К.К. Федяєвського – для залежності падіння швид-

кості судна на несталій циркуляції, дають однакові результати при розрахунку траєкторії судна, які значно відрізняються від отриманих за формулами А.М. Басіна, Г.А. Фірсова і Р.Я. Першиця при сильних маневрах.

4. Запропонована авторами формула залежності швидкості ходу судна від квадрата кута дрейфу більш зручніша для побудови методу розрахунку маневру

«зигзаг», оскільки може бути легше вбудована в лінеаризовану схему розрахунку порівняно з формулами Г.Є. Павленка та К.К. Федяєвського.

5. У подальших дослідженнях необхідно протестувати формули для визначення швидкості ходу судна на циркуляції на різних типах суден та порівняти результати розрахунку з експериментальними даними.

REFERENCES

- [1] Aleksandrov M.N. Bezopasnost' cheloveka na more. L.: Sudostroyeniye, 1983. 208 s. [in Russian].
- [2] Voytkunskiy YA.I. (1973). Spravochnik po teorii korablya. Sudovyye dvizhiteli i upravlyayemost'. YA.I. Voytkunskiy, R.YA. Pershits & A.I. Titov. L.: Sudostroyeniye. 512 s. [in Russian].
- [3] Voytkunskiy YA.I. (1960). Spravochnik po teorii korablya. Khodkost' i upravlyayemost'. YA.I. Voytkunskiy, R.YA. Pershits & A.I. Titov. L.: Gosudarstvennoye soyuznoye izdatel'stvo sudostroitel'noy promyshlennosti. 688 s. [in Russian].
- [4] Kazarezov A.YA., Donchenko M.V. (2019). Raschet trayektorii dvizheniya sudna na neustanovivsheysya tsirkulyatsii. Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii: «Innovatsii v sudostroyenii i okeanotekhnike». V 2 tomakh. T 2. Nikolayev: NUK, 2019. 448 s. [in Ukrainian].
- [5] Voytkunskiy YA.I. (Red.). (1985). Spravochnik po teorii korablya: V trekh tomakh. (T. 3) Upravlyayemost' vodoizmeshchayushchikh sudov. Gidrodinamika sudov s dinamicheskimi printsipami podderzhaniya. L.: Sudostroyeniye. 544 s. [in Russian].
- [6] Tsirkulyarnoye pis'mo MSC/Circ.1053 «Poyasneniya k standartam manevrennykh kachestv sudna. Retrieved from: http://rise.odessa.ua/texts/MSC_Circ1053.php3. [in Russian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Александров М.Н. (1983). Безопасность человека на море. Л.: Судостроение, 208 с.
- [2] Войткунский Я.И. (1973). Справочник по теории корабля. Судовые движители и управляемость. Я.И. Войткунский, Р.Я. Першиц, А.И. Титов. Л.: Судостроение. 512 с.
- [3] Войткунский Я.И. (1960). Справочник по теории корабля. Ходкость и управляемость. Я.И. Войткунский, Р.Я. Першиц, А.И. Титов. Л.: Государственное союзное издательство судостроительной промышленности. 688 с.
- [4] Казарезов А.Я., Донченко М.В. (2019). Расчет траектории движения судна на неустановившейся циркуляции. Материалы X Международной научно-технической конференции: «Инновации в суднобудовании та океанотехнике». У 2 томах. Т 2. Николаев: НУК, 2019. 448 с.
- [5] Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания. Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение. 1985. 544 с.
- [6] Циркулярное письмо MSC/Circ.1053 «Пояснения к стандартам маневренных качеств судна. URL: http://rise.odessa.ua/texts/MSC_Circ1053.php3

© А. Я. Казарезов, Ю. М. Пашенко

Дата надходження статті до редакції: 16.03.2023

Дата затвердження статті до друку: 25.03.2023