

Гончарук І.П., Головань А.І., Піменова А.Ю.

АНАЛІЗ І МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РУХУ СУДНА ПІД ЧАС ЗАХОДУ В КАМЕРУ ШЛЮЗУ

У статті представлено результати дослідження гідродинамічних особливостей руху суден під час заходу в камеру шлюзу, що є складним і відповідальним маневром, особливо для великотоннажних суден. Встановлено, що в умовах обмеженого простору камери шлюзу виникають значні гідродинамічні явища, включаючи інтерференцію хвиль, підвищення рівня води перед носовою частиною судна, стиснення потоку та збільшення хвильового опору. Ці процеси суттєво впливають на параметри руху судна, зокрема на його швидкість, осідання, диферент та стабільність під час маневру. Розроблено математичну модель руху судна, яка враховує специфіку гідродинамічних умов у камері шлюзу. Вона поєднує рівняння руху судна, опис стану потоку обтікання та хвильові явища. Особлива увага приділена впливу ступеня стиснення потоку на критичні швидкості, що є важливими для оцінки безпеки та ефективності маневрування. Модель дозволяє прогнозувати поведінку судна під час заходу в шлюз, аналізувати вплив різних факторів і розробляти рекомендації для практичного застосування. Експериментальні дослідження підтвердили, що запропонована модель є ефективною для аналізу руху великотоннажних суден, які мають підвищені вимоги до точності маневрування. Результати роботи можуть бути використані для оптимізації процесів шлюзування, розробки нових підходів до навігаційного забезпечення і підвищення безпеки експлуатації шлюзів. Також вони сприяють вдосконаленню існуючих методик проектування шлюзів і процедур маневрування в обмежених водних просторах. Запропоновані підходи мають значний потенціал для інтеграції у сучасні навігаційні системи, дозволяючи враховувати складні гідродинамічні умови і зменшувати екологічні та економічні ризики, пов'язані із судноплавством у вузьких та обмежених водних шляхах.

Ключові слова: маневрування, судно, безпека судноплавства, шлюзування, критична швидкість, прийняття рішень, гідродинаміка, камера шлюзу, математичне моделювання, оптимізація, великотоннажні судна, вузькості.

Постановка проблеми. Процес заходу судна в камеру шлюзу є складним маневром, який супроводжується виникненням численних гідродинамічних явищ, що зумовлені обмеженим простором, великим ступенем стиснення потоку та хвильовою інтерференцією. Ці явища суттєво впливають на характеристики руху судна, такі як додатковий опір, осідання, диферент та коливальні рухи. Особливо це актуально для великотоннажних суден, які мають значні інерційні характеристики та підвищені вимоги до точності маневрування.

Існуючі математичні моделі маневрування суден не враховують у достатній мірі специфіку гідродинамічних умов у камері шлюзу, що обмежує їхню точність і придатність для прогнозування поведінки судна в реальних умовах шлюзування. Відсутність комплексного підходу до моделювання цього процесу створює ризики для безпеки маневрування, підвищує витрати палива та ускладнює експлуатацію шлюзів.

Таким чином, виникає потреба в дослідженні гідродинамічних особливостей руху судна в умовах обмеженого простору шлюзу, розробці уточненої математичної моделі цього процесу, а також у формуванні рекомендацій для підвищення ефективності та безпеки заходу суден у шлюз.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Гідродинаміка суден у вузьких водних шляхах, особливо під час входу в шлюзи, є складною і залежить від різних факторів. До них відносяться трансляційні хвилі, зворотна течія, ефект подушки і сили гальмування [1,2,3]. Для розрахунку

хвильових систем у шлюзах були розроблені математичні моделі, такі як модель шести хвиль, що враховують залежність від швидкості і форми корпусу судна [4,5]. Хоча методи потенційного потоку можуть точно прогнозувати бічні сили і моменти крену при взаємодії судна з берегом і дном, вони мають проблеми з прогнозуванням моменту рискання через ефекти перехресного потоку [6,7,8]. Збільшення розмірів суден підвищило важливість оцінки маневреності на етапі проектування, при цьому використовуються як експериментальні, так і обчислювальні методи [9,10]. Розуміння цих гідродинамічних явищ має вирішальне значення для оптимізації входу судна в шлюзи і забезпечення безпечного маневрування в обмежених водах, особливо для великотоннажних суден.

Мета дослідження полягає у розробці науково-обґрунтованої математичної моделі руху судна під час заходу в камеру шлюзу, яка враховує гідродинамічні явища, що виникають в умовах обмеженого простору, для аналізу і прогнозування поведінки судна, оптимізації маневрування та забезпечення безпеки шлюзування, особливо для великотоннажних суден.

Основні результати дослідження. Гідродинамічні явища, що виникають під час заходу судна в камеру шлюзу, де є великі обмеження за шириною і глибиною, відрізняються від явищ, що спостерігаються під час руху на мілководді або в каналі.

Ці явища характеризуються:

- великими швидкостями в потоці, що обтікає судно, які зумовлені високим коефіцієнтом стиснення камери шлюзу корпусом судна;
- явищем інтерференції хвиль: суднові хвилі, відбиті від стінок камери шлюзу і корпусу судна, створюють складну картину утворення хвиль;
- підвищенням рівня води перед носовою частиною судна при вході;
- рух здійснюється з перемінним у часі диферентом.

Унаслідок цього збільшується опір тертя (завдяки збільшенню швидкості потоку обтікання), хвильовий опір (завдяки інтерференції і трансформації хвиль), з'являється додатковий опір від диференціації судна.

Експериментальні дослідження показують, що хвильовий опір є домінуючим під час входу судна в шлюз.

Режим у потоці обтікання можна вважати турбулентним через наявність великих місцевих збурень і нестационарний характер руху судна.

Під час поступального горизонтального руху судна в камері шлюзу спостерігається вертикальна хитація судна, що є нестационарним процесом. При цьому збурюючі сили хвильової природи, що підкоряються закону подібності Фруда, відіграють основну роль.

Зазначені гідродинамічні явища впливають на швидкість руху судна, його додаткове осідання і диферент.

Натурні спостереження показали, що великотоннажні судна рухаються певний час під час входу в шлюз на ділянці короткої пали і голови шлюзу з першою критичною швидкістю. Це пояснюється тим, що до сили упору рушіїв додається сила інерції судна, а значення першої критичної швидкості на короткій ділянці руху падає в 4-7 разів порівняно з її значенням у підхідному каналі внаслідок різкого збільшення ступеня стиснення живого перерізу потоку і збільшення швидкості обтікання.

З теорії гідравліки відомо, що критична швидкість потоку визначається для прямокутних перерізів за виразом:

$$V_{кр} = \sqrt{\frac{g \cdot (F_k - \Omega)}{B_k}} \quad (1)$$

Нескладні розрахунки для реальних співвідношень стиснення потоку корпусом судна під час шлюзування показують, що значення критичної швидкості в цьому випадку можуть мати значення $V_{кр} \leq 2,5$ м/с.

Таким чином, інтенсивність гідродинамічних явищ здебільшого визначає ступінь стиснення потоку.

Загальна схема руху судна в шлюзі показана на рисунку 1.

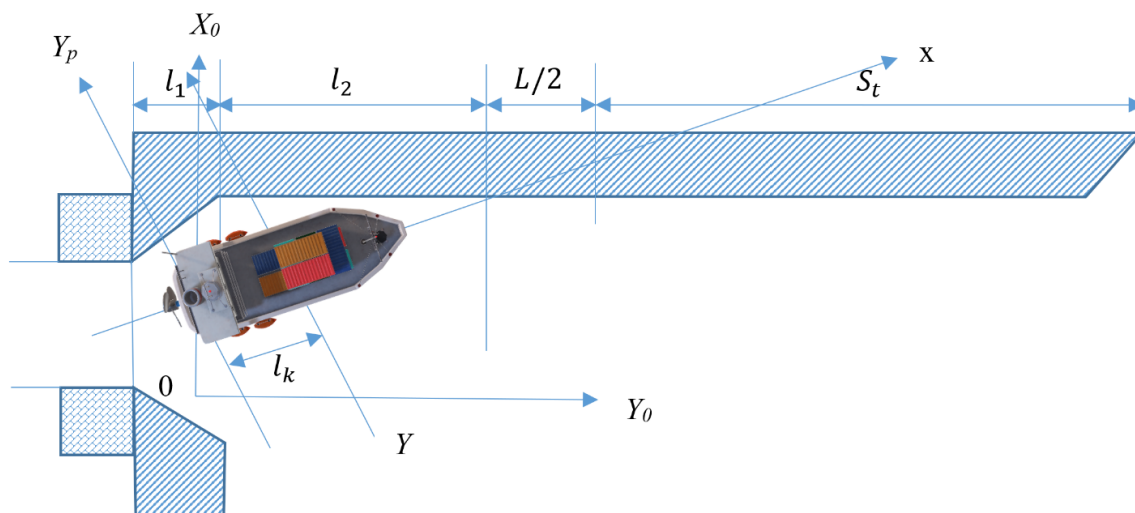


Рисунок 1 – Схема руху судна в шлюзі

Специфічна відмінність конструйованої математичної моделі від традиційної моделі керованості полягає в тому, що гідродинамічні характеристики як інерційного (приєднані маси), так і неінерційного походження залежать додатково від розташування судна по відношенню до шлюзу (тобто від миттєвих координат системи).

Положення судна щодо шлюзу в будь-який момент часу визначається узагальненими координатами центру мас (G): $q_1 = x_0$; $q_2 = y_0$, кутом курсу $q_3 = \theta$.

Узагальнені швидкості (у нерухомій системі координат X_0, Y_0) можуть бути представлені у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \dot{q}_1 &= V_{x_0} = \frac{dx_0}{dt} \\ \dot{q}_2 &= V_{y_0} = \frac{dy_0}{dt} \\ \dot{q}_3 &= \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Зв'язок між проекціями швидкості в рухомій і нерухомій системах координат виражаються відомими формулами:

$$\left. \begin{aligned} V_{x_0} &= V_x \cos \theta - V_y \sin \theta \\ V_{y_0} &= V_x \sin \theta + V_y \cos \theta \\ V_x &= V_{y_0} \sin \theta + V_{x_0} \cos \theta \\ V_y &= V_{y_0} \cos \theta - V_{x_0} \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Уявімо корпусні сили, що діють на судно в шлюзі, у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} X_k &= X_{k\infty} + X_{k\text{шл}} \\ Y_k &= Y_{k\infty} + Y_{k\text{шл}} \\ M_k &= M_{k\infty} + M_{k\text{шл}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де $X_{k\infty}, Y_{k\infty}, M_{k\infty}$ - зусилля під час руху з тими самими швидкостями V_x, V_y, ω на глибокій воді; $X_{k\text{шл}}, Y_{k\text{шл}}, M_{k\text{шл}}$ - додаткові зусилля, що виникають у шлюзі.

Слід зазначити, що ці додаткові умови залежать не тільки від швидкості, а й від положення судна в шлюзі в момент часу (t). Таким чином,

$$\left. \begin{aligned} X_{k\text{шл}} \\ Y_{k\text{шл}} \\ M_{k\text{шл}} \end{aligned} \right\} = f(V_x, V_y, \omega, x_0, y_0, \theta)$$

Проекції головного вектору і головного моменту всіх зовнішніх сил на осі рухомої (пов'язаної із судном) системи координат:

$$\left. \begin{aligned} X &= T_E - X_{k\infty} - X_{k\text{шл}} - X_A \\ Y &= Y_{k\infty} + Y_{k\text{шл}} - Y_p - Y_A \\ M &= M_{k\infty} + M_{k\text{шл}} + Y_p l_k - M_A \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Проекції головного вектору системи сил на рухомі й нерухомі осі координат пов'язані між собою очевидними співвідношеннями:

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= X \cos \theta - Y \sin \theta \\ Y_0 &= X \sin \theta + Y \cos \theta \\ X &= Y_0 \sin \theta + X_0 \cos \theta \\ Y &= Y_0 \cos \theta - X_0 \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Для отримання рівняння руху скористаємося відомими з аналітичної механіки рівняннями Лагранжа II роду:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_c}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T_c}{\partial q_i} = \bar{Q}_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

Далі керуватимемося методом, викладеним В.Г. Павленком і, зберігаючи запропоновану індексацію, зробимо лише доповнення й уточнення, що враховують особливості маневру, який ми розглядаємо. Так, вважаємо, що кінетична енергія системи судно-рідина визначається виразом:

$$T_c = T_{c\infty} + T_{c\text{шл}} \quad (8)$$

де $T_{c\infty} = f(V_x, V_y, \omega)$; $T_{c\text{шл}} = f(V_x, V_y, \omega, x_0, y_0, \theta)$.

Через специфіку визначення додаткових зусиль не можна рівняння розв'язувати як у традиційній моделі керованості відносно швидкостей V_x, V_y, ω незалежно від рівнянь траєкторії. Система в цьому разі залишається незамкненою. Кінематичні рівняння, необхідні для замикання математичної моделі, зручно подати у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_0}{dt} &= V_x \cos \theta - V_y \sin \theta \\ \frac{dy_0}{dt} &= V_x \sin \theta + V_y \cos \theta \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

У зв'язку із зазначеними вище гідродинамічними особливостями, що супроводжують процес заходу судна в шлюз, рівняння плоского руху необхідно доповнити рівняннями, що характеризують стан потоку обтікання і хвильові явища, які також визначають кінематику маневру.

З огляду на те, що поперечні розміри судна і камери шлюзу малі порівняно з поздовжніми, а поперечні обурення незначні (вітровий вплив, обурення, спричинені несиметрією обтікання корпусу судна), можна вважати, що переважним рухом води і судна буде рух у напрямку поздовжньої осі камери. У цьому разі можна застосувати теорію мілководдя (рівняння Сен-Венана в лінійній формі), вважаючи, що всі величини, які визначають рух рідини, залежать лише від координати (x) і часу (t).

Як такі величини можна прийняти витрату рідини $Q(x,t)$ і ординату її вільної поверхні $\xi(x,t)$. При цьому функції $Q(x,t)$ і $\xi(x,t)$ вважатимемо безперервними і диференційованими. За наявності витрати динамічний ефект виражається в появі додаткового перепаду рівня. Рівняння нерозривності в цьому випадку можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (10)$$

де $Q = u_i \Omega_i$;

u_i – поздовжня швидкість потоку обтікання;

Ω_i – площа поперечної течії води на ділянці, що розглядається;

$\Omega = f(x, \xi, z_0)$ – на вільній ділянці камери (рис.1)

$\Omega = F_k - \Omega_x + B_c(z_0 - \Delta \xi)$ – на ділянці, зайнятій судном,

q – витрата води під час обтікання корпусу в процесі заходу в шлюз.

Динамічне рівняння руху рідини в камері для виділеного об'єму може бути представлено у вигляді:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{\Omega} \right) + g \Omega \frac{\partial \xi}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

Це рівняння являє собою рівняння довгих хвиль у камері шлюзу з відтоком по довжині. Крім рівнянь (10) і (11), що описують рух рідини, необхідно додати ще рівняння коливань судна.

Натурні та експериментальні дослідження засвідчили, що під час заходу в шлюз поперечні горизонтальні зміщення центру тяжіння судна і бортова хитація практично відсутні. Тому положення судна під час маневру визначається додатковими координатами: вертикальним зміщенням центру тяжіння судна і кутовим нахилом судна (диферентом). За наявності поступальної швидкості вертикальна і кільова хитація симетричного щодо осі симетрії судна протікають спільно.

При складанні рівнянь зробимо такі допущення:

- поверхню незворушеної води вважаємо плоскою;
- судно симетричне щодо діаметральної площини відносно форми обводів корпусу і розподілу завантаження;
- переміщення і кутові відхилення судна від положення рівноваги вважаємо малими і нехтуємо величинами другого порядку.

З урахуванням цього, рівняння, що характеризують вертикальну і кильову хитавицю судна, можна подати у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} (m + \lambda_{33}) \frac{d^2 z_G}{dt^2} + f_{1\xi} \frac{dz_G}{dt} + f_{2\xi}(z_G) &= f_{3\xi}(t) \\ (J_y + \lambda_{55}) \frac{d^2 \Psi}{dt^2} + f_{1\Psi} \frac{d\Psi}{dt} + f_{2\Psi}(\Psi) &= f_{3\Psi}(t) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

де λ_{33} – приєднана маса в напрямку осі Z;

λ_{55} – приєднаний момент інерції відносно осі Y;

$f_{1\xi}, f_{1\Psi}$ – відповідно величини, що визначають опір вертикальній хитавиці і момент опору кильовій хитавиці, що залежать від швидкості руху;

$f_{2\xi}, f_{2\Psi}$ – відповідно величини, що враховують додаткову силу і момент підтримання і являють собою відновлювальну силу і момент;

$f_{3\xi}, f_{3\Psi}$ – відповідно величини, що визначають дію збурювальних сили і моменту, які залежать від часу;

Диференціальне рівняння вертикальної хитавиці отримано з урахуванням того, що Архімедові сили підтримання (y, V) врівноважується силою ваги (D).

Вид диференціальних рівнянь залежить від характеру функцій f_1, f_2, f_3 .

Відновлювальні сили і моменти ($f_{2\xi}$) і ($f_{2\Psi}$), а також головна частина сил, що обурюють, ($f_{3\xi}$) і ($f_{3\Psi}$) характеризують вплив на судно навколишньої рідини і не враховують зміни її руху, спричиненої хитавицею судна. Інерційні сили і демпферні сили, а також додаткова частина сил, що обурюють, є наслідком зворотного впливу корпусу судна на характер руху навколишньої рідини.

Якщо припустити, що поблизу ватерлінії обводи корпусу є прямостінними, то вертикальна і кильова хитавиці в чистому вигляді відбуваються за умови, коли центр тяжіння знаходиться на одній вертикалі з центром ваги площі ватерлінії. На цій же вертикалі має розташовуватися центр інерції приєднаних мас (ця умова у транспортних суден без диференту дотримується з достатньою для практики точністю).

У разі вертикального занурення центру тяжіння судна величина відновлювальної сили визначиться з виразу:

$$f_{2\xi} = \gamma \cdot S \cdot Z_g \quad (13)$$

де $\gamma = \rho \cdot g$ – питома вага води; S – площа діючої ватерлінії.

Експериментальні дослідження показали, що за малих амплітуд коливань судна всі види опору хитавиці можуть бути представлені лінійними функціями від відповідних швидкостей хитавиці:

$$\left. \begin{aligned} f_{1\xi} \left(\frac{dz_G}{dt} \right) &= N_\xi \frac{dz_G}{dt} \\ f_{1\Psi} \left(\frac{d\Psi}{dt} \right) &= N_\Psi \frac{d\Psi}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Тут N_ξ і N_Ψ – коефіцієнти пропорційності, звані коефіцієнтами опору хитавиці або коефіцієнтами демпфуючих сил.

За кильової хитавиці відновлювальний момент визначається за метацентричною формулою поздовжньої остійності:

$$f_{2\Psi}(\Psi) = DH_0\Psi = D(R - a)\Psi \quad (15)$$

де $H_0 = (R - a)$ – початкова поздовжня метацентрична висота;

R – великий метацентричний радіус;

a – підвищення центру тяжіння над центром величини.

Система рівнянь, що характеризує коливальні рухи судна в процесі маневру, набуває вигляду:

$$\left. \begin{aligned} (m + \lambda_{33}) \frac{d^2 Z_G}{dt^2} + N_\xi \frac{dZ_G}{dt} + \gamma S Z_G &= \int_{l_1}^{l_2} B_c \xi \, dx \\ (m + \lambda_{55}) \frac{d^2 \Psi}{dt^2} + N_\Psi \frac{d\Psi}{dt} + DH_0 \Psi &= \int_{l_1}^{l_2} B_c (x - l_0) \xi \, dx \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Таким чином, рівняння (9), (10), (11), (12) являють собою повну математичну модель маневру заходу судна в камеру шлюзу. Невідомими в цій математичній моделі є величини:

$$x_0, y_0, \theta, V_x, V_y, \omega, Q, \xi, Z_G, \Psi$$

Для однозначного розв'язання задачі основні невідомі повинні задовольняти і деяким додатковим умовам:

початковим (при $t=0$) та граничним (при $x=0$ та $x=1$), тут l – загальна довжина розглянутої ділянки шлюзу, що розглядається.

Вочевидь, цю задачу в повній її постановці можна розв'язати тільки чисельно. Однак, основні закономірності з достатньою для практики точністю можна одержати за допомогою низки спрощувальних припущень, що дають змогу знайти й аналітичне розв'язання.

Висновки. Аналіз показав, що маневрування судна під час входу в камеру шлюзу супроводжується інтенсивними гідродинамічними явищами, такими як хвильова інтерференція, підвищення рівня води перед носовою частиною судна, збільшення опору тертя і хвильового опору. Ці явища значною мірою визначають динаміку руху судна та впливають на параметри його осідання, диференту і швидкості. Представлена математична модель дозволяє врахувати гідродинамічні характеристики судна як інерційного, так і неінерційного походження, що залежить від положення судна відносно стінок шлюзу. Модель об'єднує рівняння руху судна, обтікання рідиною корпусу і хвильові явища. Це дозволяє більш точно прогнозувати поведінку судна під час маневру. Встановлено, що на коротких ділянках входу в шлюз критична швидкість потоку суттєво знижується через збільшення ступеня стиснення потоку. Це створює додаткові сили інерції, які впливають на керованість судна. Розрахунки підтверджують, що для різних співвідношень стиснення потоку значення критичних швидкостей суттєво змінюються, що вимагає врахування цих факторів у процесі планування маневру. Використання теорії мілководдя дозволило детально описати динаміку потоку, включаючи витрати рідини і зміни рівня вільної поверхні. Ці аспекти є ключовими для оцінки впливу рідини на корпус судна в умовах обмеженого простору шлюзу. Вивчено вертикальні і кильові коливання судна, які виникають під час маневру. Було показано, що ці рухи суттєво впливають на керованість судна і можуть бути описані лінійними рівняннями, що враховують демпфуючі сили та моменти. Запропонована модель і отримані результати можуть бути використані для розробки рекомендацій щодо оптимізації заходу суден у шлюз, підвищення точності прогнозування їх поведінки та забезпечення безпеки маневрування. Це має особливе значення для великотоннажних суден, які мають підвищені вимоги до точності заходу в шлюз.

Проведене дослідження дає змогу поглибити розуміння складних гідродинамічних процесів, що відбуваються під час шлюзування суден, та створює науково-обґрунтовану базу для удосконалення

методів управління цими процесами. Результати роботи можуть бути інтегровані у системи навігаційного забезпечення та моделювання для підвищення ефективності та безпеки експлуатації шлюзів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Yuan, Z. (2018). Ship hydrodynamics in confined waterways. *Journal of Ship Research*, 63(01), 16–29. <https://doi.org/10.5957/josr.04170020>
2. Maljković, M., Pavić, I., Meštrović, T., & Perković, M. (2024). Ship Maneuvering in Shallow and narrow Waters: Predictive Methods and model Development review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(8), 1450. <https://doi.org/10.3390/jmse12081450>
3. Linde, F., Ouahsine, A., Huybrechts, N., & Sargent, P. (2016). Three-Dimensional numerical simulation of ship resistance in restricted waterways: effect of ship sinkage and channel restriction. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 143(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ww.1943-5460.0000353](https://doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000353)
4. Sjöberg, H.; Roos, H.; Edvall, A.; Hallbjörner, F. Safe Handling of Ultra Large Container Ships in Strong Wind; Gothenburg Pilot 2016-12-01; Final Report—Version 2.0; Swedish Maritime Administration: Norrköping, Sweden.
5. Fan, S.; Yang, Z.; Wang, J.; Marsland, J. Shipping accident analysis in restricted waters: Lesson from the Suez Canal blockage in 2021. *Ocean Eng.* 2022, 266, 113119.
6. Terziev, M.; Tezdogan, T.; Oguz, E.; Gourlay, T.; Demirel, Y.K.; Incecik, A. Numerical investigation of the behaviour and performance of ships advancing through restricted shallow waters. *J. Fluids Struct.* 2018, 76, 185–215.
7. Lee, S.; Hong, C. Study on the course stability of very large vessels in shallow water using CFD. *Ocean Eng.* 2017, 145, 395–405.
8. Gucma, L. Risk Management in the Area of Bridges Situated on Waterways in the Aspect of Ship Collisions, 1st ed.; Marine Traffic Engineering—MTE: Szczecin, Poland, 2024.
9. Özden, M.C.; Kurdoğlu, S.; Demir, E.; Sariöz, K.; Gören, Ö. A compact motion controller-based planar motion mechanism for captive manoeuvring tests. *Ocean Eng.* 2021, 220, 108195.
10. Zhang, X.G.; Zou, Z.J. Identification of Abkowitz model for ship manoeuvring motion using ε -support vector regression. *J. Hydrodyn.* 2011, 23, 353–360.

REFERENCES

1. Yuan, Z. (2018). Ship hydrodynamics in confined waterways. *Journal of Ship Research*, 63(01), 16–29. <https://doi.org/10.5957/josr.04170020>
2. Maljković, M., Pavić, I., Meštrović, T., & Perković, M. (2024). Ship Maneuvering in Shallow and narrow Waters: Predictive Methods and model Development review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(8), 1450. <https://doi.org/10.3390/jmse12081450>
3. Linde, F., Ouahsine, A., Huybrechts, N., & Sargent, P. (2016). Three-Dimensional numerical simulation of ship resistance in restricted waterways: effect of ship sinkage and channel restriction. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 143(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ww.1943-5460.0000353](https://doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000353)
4. Sjöberg, H.; Roos, H.; Edvall, A.; Hallbjörner, F. Safe Handling of Ultra Large Container Ships in Strong Wind; Gothenburg Pilot 2016-12-01; Final Report—Version 2.0; Swedish Maritime Administration: Norrköping, Sweden.
5. Fan, S.; Yang, Z.; Wang, J.; Marsland, J. Shipping accident analysis in restricted waters: Lesson from the Suez Canal blockage in 2021. *Ocean Eng.* 2022, 266, 113119.
6. Terziev, M.; Tezdogan, T.; Oguz, E.; Gourlay, T.; Demirel, Y.K.; Incecik, A. Numerical investigation of the behaviour and performance of ships advancing through restricted shallow waters. *J. Fluids Struct.* 2018, 76, 185–215.
7. Lee, S.; Hong, C. Study on the course stability of very large vessels in shallow water using CFD. *Ocean Eng.* 2017, 145, 395–405.

8. Gucma, L. Risk Management in the Area of Bridges Situated on Waterways in the Aspect of Ship Collisions, 1st ed.; Marine Traffic Engineering—MTE: Szczecin, Poland, 2024.
9. Özden, M.C.; Kurdoğlu, S.; Demir, E.; Sarıöz, K.; Gören, Ö. A compact motion controller-based planar motion mechanism for captive manoeuvring tests. *Ocean Eng.* 2021, 220, 108195.
10. Zhang, X.G.; Zou, Z.J. Identification of Abkowitz model for ship manoeuvring motion using ε -support vector regression. *J. Hydrodyn.* 2011, 23, 353–360.

Honcharuk I.P., Golovan A.I., Pimenova A.Y.

ANALYSIS AND MODELING OF THE VESSEL MOVEMENT PROCESS DURING THE ENTRY INTO THE LOCK CHAMBER

The article presents the results of a study of the hydrodynamic features of ship movement during entry into the lock chamber. This is a complex and responsible maneuver, especially for large-tonnage vessels. The study established that significant hydrodynamic phenomena arise in the conditions of limited space in the lock chamber. These include wave interference, an increase of the water level in front of the bow of the vessel, flow compression and an increase of wave resistance. These processes significantly affect the ship's motion parameters, in particular, its speed, draft, differential, and stability during maneuver. A mathematical model of ship motion was developed that takes into account the specifics of hydrodynamic conditions in the lock chamber. It combines the equations of ship motion, the description of the flow state and wave phenomena. Particular attention is paid to the impact of flow compression on critical speeds, which are important for assessing safety and maneuvering efficiency. The model allows predicting the vessel's behavior during lock entry, analyzing the impact of various factors and developing recommendations for practical application. Experimental studies have confirmed that the proposed model is effective for analyzing the movement of large-tonnage vessels with increased requirements for maneuvering accuracy. The results of the work can be used to optimize locking processes, develop new approaches to navigation support and improve the safety of locks. They also improve existing lock design methods and procedures for maneuvering in confined water areas. The proposed approaches have significant potential for integration into modern navigation systems, allowing for complex hydrodynamic conditions and reducing environmental and economic risks associated with navigation in narrow and restricted waterways.

Keywords: maneuvering, vessel, navigation safety, locking, critical speed, decision-making, hydrodynamics, lock chamber, mathematical modeling, optimization, large vessels, narrowness.