

DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-6-82-2>

УДК 629.123

Шемонаєв В.Ю.

Національний університет «Одеська морська академія»

ВПЛИВ МІЛКОВОДДЯ НА МАНЕВРУВАННЯ СУДНА

Анотація. Плавання на мілководді є однією з найбільш складних умов, в яких опиняється судно в процесі експлуатації. І складність ситуації полягає не тільки в тому, що малий запас води під кілем в даних умовах являє собою реальну навігаційну небезпеку, але і в тому, що поведінка судна на мілководді істотно відрізняється від поведінки на глибокій воді. До основних відмінних особливостей поведінки судна на мілководді можна віднести погіршення керованості, збільшення гальмівного шляху, додаткове просідання зі зміною посадки і падіння швидкості при тих же енергетичних витратах. Ще більш складним управлінням судном стає при плаванні на мілководді з обмеженою акваторією (протоки, канали), де на поведінку судна впливають як берега, так і інші судна. Незнання або нехтування особливостями поведінки судна на мілководді нерідко призводить до аварії. Рух суден на мілководді і в умовах обмеженого простору (вузькості, канали, фарватери) пов'язане зі збільшенням опору води, зміною роботи гвинто-рульового комплексу, зміною осадки судна. Осадка судна збільшується, виникає або збільшується диферент на корму або на ніс, погіршується керованість судна через мілководдя і гідродинамічної взаємодії з ґрунтом і іншими суднами (явище присмокування). Зміну осадки судна (просідання) і диференту, що виникає на мілководді, необхідно визначати для розрахунку прохідної осадки судна, яку повинен визначати судоводій згідно вимог нормативних документів. Всі перераховані фактори необхідно враховувати під час руху судна на мілководді, так як їх неврахування може призвести судно до аварійної ситуації або закінчиться аварією (торкання ґрунту, посадка на мілину, зіткнення).

Ключові слова: торкання ґрунту, посадка на мілину, зіткнення, диферент на мілководді, явище присмокування, рух суден на мілководді.

Shemonayev Volodymyr

National University "Odessa Maritime Academy"

SHALLOW WATER EFFECTS ON THE VESSEL MANEUVERING PERFORMANCE

Summary. Ship handling in confined waters, particularly in narrow waterways has been receiving a great deal of attention in recent years. With the ever-increasing size of ships, as exemplified in tankers and bulk carriers, potential hazards of collision and grounding attract attention, and control errors may result in personal injury and costly damage to both the ship and the surrounding environment. An accident can have far-reaching effects. In regards to maneuvering performance, shallow waters may be defined as those in which the ratio of water depth to ship draft is three or less. At greater ratios, shallow-water effects on maneuvering performance become rapidly less significant as the water deepens. When a ship is proceeding, surrounding water is displaced towards the sides and the bottom of the ship, exerting the flow of water relative to the moving ship. The pressure distribution that develops around the ship moving through water distorts the water line by raising the level of the high pressure regions ahead of the bow and aft of the stern, while, because of the relative velocity increase, lowering it along the length of the hull, particularly amidships. Consequently, the overall effect of the pressure distribution is to create a local depression of the mean level that coincides with the ship and travels along with it. Furthermore, this drop in the water level is concentrated amidships, where immersed hull volume is greatest, and the ship will also move bodily downwards to maintain its full buoyancy, including a change of trim. This effect is imperceptible and irrelevant in deep water, but it becomes significant when the ship moves into shallow water, where the restriction of flow between the hull and the seabed weakens the three-dimensional flow towards the level and the two-dimensional flow parallel to the hull grows stronger. Therefore, the mean water level around the hull is depressed further accompanied by the change of trim, which results in a significant reduction of under keel clearance. This phenomenon is known as "squat". The squat is conspicuous in shallow water. When a ship moves into shallow water, ship speed is reduced due to increased wave making resistance and the deterioration of propulsive efficiency. When a ship is turning in shallow water, the turning diameter increases considerably due to the bluntness of hull response at the initial stage of the turn and the increase of the turning moment of resistance.

Keywords: ship, shallow water, speed, wave, hull, moment of resistance, water level, deep water, trim.

Постановка проблеми. Відсутність у судоводія інформації про значення швидкості судна на мілководді може негативно позначитися як на безпеці судноводіння, так і при розрахунку величини просідання.

Мілководдя "ускладнює" гвинтову характеристику судна. Оснащення сучасних суден системою дистанційного автоматичного управління двигунами вимагає від судоводія глибшого аналізу експлуатаційно-технічних можливостей як головного двигуна, так і пропульсивного комплексу в цілому. У практичних інструкціях це питання висвітлено недостатньо повно.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. І. Афанасьєвим було вперше встановлено поняття про економічну швидкість. В. Фрудом були виконані натурні буксирні корвета "Грейнаунд". Ці дослідження дозволили Фруду отримати емпіричну формулу для розрахунку опору тертя пластин, а також підтвердили можливість використання запропонованого ним способу перерахунку опору руху судна, заснованого на законі гравітаційної подібності, ідея якого належить Реху (1844). Методика перерахунку, розроблена Фрудом, і його формула для розрахунку опору і тертя без істотних змін застосовувалася до

30-х років, а деякими дослідниками використовуються і в даний час. Метод модельних випробувань широко застосовувався для вивчення хідкості суден. В 1898 р. Мічеллем була отримана теоретична формула для обчислення хвильового опору судна на глибокій воді, заснована на припущенні про "тонкість" судна і малу висоту хвиль, що виникають при його русі, це і поклало початок так званої лінійної теорії хвильового опору. У 1903 р. Н.Б. Жуковський іншим методом вирішив задачу про хвильовий опір і оптимальну форму обводів судна при русі на мілкій воді. Чисельні розрахунки і експериментальна перевірка теорії хвильового опору, виконані в 20-30-х роках Г.Е. Павленко, підтвердили правильність використаних передумов і сприяли подальшому розвитку.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Ще більш складним управлінням судном стає при плаванні на мілководді з обмеженою акваторією (протоки, канали), де на поведінку судна впливають як з береги, так і інші судна. Незнання або нехтування особливостями поведінки судна на мілководді нерідко призводить до аварій.

Мета статті. Головною метою цієї роботи є аналіз літературних джерел щодо плавання на мілководді; визначення залежності плавання близькості судна до підводних морських навігаційних небезпек, різкою зміною глибин, а також обмеженнями в швидкості, осадці і можливості маневрування судна; вивчення даних про залежність втрати швидкості судна як від глибини під кілем судна, так і від основних розмірів судна; також показати, що плавання на мілководді є одним з найбільш складних видів плавання.

Виклад основного матеріалу. До основних відмітних особливостей поведінки судна на мілководді можна віднести:

- погіршення керованості;
- збільшення гальмівного шляху;
- додаткове просідання зі зміною посадки;
- гідродинамічна взаємодія суден;
- падіння швидкості.

Мілководдя – водний простір або фарватер, глибина якого впливає на опір води руху судна і змінює тим самим умови плавання судна в порівнянні з плаванням його на глибині.

Мілководдя характеризується наступними глибинами. Зазвичай для проведення ходових або здавальних випробувань, щоб виключити вплив мілководдя, вибирають полігон з глибиною, яка визначається виразом:

$$H \geq 4T + \frac{3V^2}{g} \quad (1)$$

де T – осадка судна, м;

V – швидкість судна, м/с;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

При вирішенні практичних завдань управлінням судном мілководдям можна вважати, коли відношення глибини до осадки судна:

$$\frac{H}{T} < 3 \quad (2)$$

Опір води руху судна складається з трьох складових:

- опору тертя;
- форми;
- хвильового опору.

Опір тертя залежить від площі змоченої поверхні корпусу і його шорсткості. Опір форми залежить від обводів корпусу.

Хвильовий опір пов'язано за своєю природою з утворенням суднових хвиль, що виникають під час взаємодії корпусу з водою навколо нього. Суднові хвилі складаються з двох систем хвиль: у форштевня розвивається носова, у ахтерштевня – кормова система хвиль. Кожна з них складається з розбіжних і поперечних хвиль [1, с. 136].

Хвилі, що розходяться, мають короткий фронт і розташовуються уступом. Кормові хвилі менше носових і на глибокій воді ледь помітні. Поперечні хвилі розташовуються фронтом поперек судна і не виходять за межі хвиль які розходяться. Їх висота зменшується від носа до корми.

Носова хвиля починається гребнем, розташованим відразу за форштевнем. Перша кормова хвиля завжди починається западиною, яка захоплює кормовий край. Тому в носовій частині судна тиск буде більше, ніж в кормовій. За рахунок різниці цих тисків і утворюється хвильовий опір. З виходом судна на мілководдя і зменшенням запасу води під кілем змінюється система утворення суднових хвиль, що позначається на ходових якостях суден, осадці і керованості. При цьому швидко починає зростати хвильовий опір. Пояснюється це тим, що коли відношення глибини до довжини хвилі мале, швидкість поширення хвилі з невеликою амплітудою має межу – критичну швидкість. Суднові хвилі якраз і відносяться до цієї категорії хвиль. Швидкість їх поширення не може перевищувати критичну.

Вплив мілководдя на швидкість судна.

Внаслідок впливу різних чинників швидкість судна на мілководді менше ніж на глибокій воді.

Для розрахунку швидкості на мілководді може бути застосована формула, отримана А.П. Смирновим:

$$V_m = k_v k_s k_{B/T} V_\infty \quad (3)$$

де V_m – швидкість судна на мілководді, м/с;

V_∞ – швидкість судна на глибокій воді, м/с;

k_v – коефіцієнт пропорційності (табл. 1);

k_s – коефіцієнт пропорційності за повноту водотоннажності підводної частини корпусу судна (табл. 2);

$k_{B/T}$ – коефіцієнт пропорційності відношення ширини судна до осадки В/Т (табл. 3).

З аналізу таблиць можна бачити, що падіння швидкості на мілководді може перевищувати 20% в порівнянні з глибокою водою. Дані таблиць отримані в основному численними натурними експериментами. Практичне застосування таблиць дозволить судноводцям більш обґрунтовано вибирати оптимальний курс судна з урахуванням глибин, більш точно вести числення судна, що, в кінцевому рахунку, підвищить безпеку плавання.

Емпірична формула дозволяє визначити величину зміни швидкості на мілководді з похибкою $\pm 2-3\%$. Натурні експерименти показали, що режим роботи двигуна на мілководді при підтримці постійної частоти обертання є надзвичайно важким і нормальна експлуатація двигуна не може бути забезпечена без зниження потужності двигуна зі зменшенням глибин.

Таблиця 1

Значення коефіцієнта k_v

H/T	Швидкість V_∞ на глибокій воді, уз											
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
3.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.97
3.00	1.00	0.99	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96	0.96	0.95	0.94
2.50	0.99	0.98	0.98	0.96	0.95	0.95	0.94	0.94	0.93	0.93	0.92	0.92
2.00	0.98	0.97	0.97	0.95	0.94	0.93	0.92	0.90	0.90	0.89	0.88	0.88
1.50	0.96	0.94	0.92	0.91	0.89	0.88	0.87	0.86	0.86	0.85	0.84	0.84
1.30	0.95	0.93	0.91	0.89	0.88	0.86	0.85	0.84	0.83	0.83	0.82	0.82
1.25	0.94	0.92	0.91	0.89	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83	0.82	0.82	0.81
1.10	0.94	0.91	0.89	0.88	0.86	0.85	0.83	0.83	0.82	0.82		

Джерело: [1]

Таблиця 2

Значення коефіцієнта k_δ

δ	0.7-0.75	0.75-0.80	0.80-0.85
k_δ	1	0.973	0.947

Джерело: [1]

Таблиця 3

Значення коефіцієнта k_{BT}

B/T	2.0	2.5	3.0	3.5
k_{BT}	1.026	1.00	0.973	0.947

Джерело: [1]

Вплив мілководдя починає помітно позначатися при переході на швидкості, які $0,6 V_{кр}$:

$$V_{кр} = \sqrt{gH} \quad (4)$$

де H – глибина місця,

коли висота і довжина поперечних хвиль, що створюються при русі судна, починають різко зростати. У міру збільшення швидкості збільшується і кут, що складається гребнями хвиль з ДП судна. При швидкості $V_{кр}$ поперечні і хвилі, що розходяться, поєднуються в одну загальну поперечну хвилю, що досягає найбільших розмірів і має вигляд поперечного валу, який рухається разом з судном $0,9 V_{кр}$ трохи попереду форштевня. У кормовій частині судна трохи попереду ахтерштевня також створюються поперечні хвилі, які розповсюджуються далеко по обидва боки від судна. Разом з ростом хвилеутворення зростає і опір води руху судна, перевантажується двигун, зростає витрата палива, підвищується знос двигуна. Тому збільшувати швидкість судна до значень, більших $0,8 V_{кр}$ недоцільно. Швидкість суден в каналі призначається в межах 4-12 вуз.

Практикою встановлено, що на мілководді в порівнянні з глибокою водою різко погіршується експлуатаційна стійкість судна на курсі, підвищується рискливість; помітно погіршується і поворотність судів.

На мілководді різко зменшуються кути дрейфу, кутова швидкість повороту і, відповідно, збільшується радіус сталої циркуляції при однакових кутах перекладки керма.

Відбувається це з таких причин. Як вже говорилося, судно, що рухається, має перепад тисків уздовж корпусу. В результаті цього рівень води в середній частині знижений, а в районі форштевня і ахтерштевня – підвищений. Перепад рів-

нів води в кормовій частині призводить до того, що вода, перетікаючи від підвищеного рівня до зниженого, утворює попутний потік, швидкість якого залежить від величини перепаду рівнів води [1, с. 234].

При русі судна на мілководді перепад тисків (і, як наслідок, – рівнів води) збільшується в міру наближення швидкості судна до її критичного значення $V_{кр}$.

Момент, що обертає, створюваний пером керма, залежить від швидкості потоку, що набігає. Збільшення швидкості попутного потоку при виході судна на мілководдя знижує швидкість потоку, що набігає на перо керма і, як наслідок, знижує ефективність рульового пристрою.

Дослідження А.Д. Гофмана показали, що погіршення поворотності на мілководді носить закономірний характер. Для визначення радіуса сталої циркуляції на мілководді R_m ним отримана наступна залежність:

$$R_m = \frac{R_\infty}{1 + 0.1T/H - 0.71(T/H)^2} \quad (5)$$

де R_∞ – радіус сталої циркуляції на глибокій воді, м.

При русі суден відбувається зміна їх положення на плаву по відношенню до вільної поверхні і dna водойми. Істотна зміна посадки (просадки судна) спостерігається в умовах мілководдя, в каналах, річках та інших обмежених умовах.

Найбільш загальне рішення має так званий класичний метод. Цей метод ґрунтується на безпосередньому застосуванні закону Бернуллі і закону нерозривності рідини. Модифікуючи рівняння Бернуллі і приймаючи, що величину тиску P можна виразити висотою водяного стовпа над умовним рівнем H , рівняння Бернуллі набуде вигляду:

$$H + \frac{U^2}{2g} = \text{const} \quad (6)$$

де H – глибина, м;

U – швидкість потоку води, що омиває судно, звана швидкістю зустрічного потоку, м/с;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

При порівняно малих докритичних швидкостях руху знижується роль власного хвилеутворення судна. Перерозподіл зануреного об'єму судна на ходу можна наближено пояснити зміною вільної поверхні води через наявність обмеженості фарватеру.

Розглянемо випадок руху судна в каналі. Рух його відповідно до рівняння Бернуллі призводить до збільшення швидкості руху води уздовж корпусу судна, а це призводить до зниження дзеркальної поверхні води (глибини H).

Для цього випадку можна написати:

$$H_0 + \frac{V^2}{2g} = H_{\%} + \frac{(V+U)^2}{2g} \quad (7)$$

де H_0 – глибина в каналі, який не збурений проходом судна, м;

$H_{\%}$ – глибина в каналі в момент проходу судна, яка виміряна посередині довжини судна, м;

V – швидкість судна, м/с.

Після перетворення, позначивши, $H_0 - H_{\%} = \Delta H$ отримуємо величину зниження дзеркальної поверхні води (просідання судна):

$$\Delta H = \frac{U(2V+U)}{2g} \quad (8)$$

Збільшення осадки кормою для морських суден на мілкій воді можна отримати за формулою В.П. Смирнова:

$$\Delta T_k = \alpha_T k_L \theta_{\phi} V^2 \quad (9)$$

Формула отримана після обробки результатів натурних випробувань морських суден методом математичної статистики способом найменших квадратів. Точність величини просідання 1.0–1.5% від осадки кормою. У цій формулі α_T – коефіцієнт пропорційності, що враховує зміну відносного осідання; k_L – коефіцієнт пропорційності, що враховує довжину судна; θ_{ϕ} – коефіцієнт пропорційності, що враховує початковий диферент на корму.

Графічний метод NPL (National Physical Laboratory), опублікований в 1973 р. в Великобританії, розроблено на основі модельних випробувань, теоретичних обчислень, і експерименту для великотоннажних суден.

Випробування моделей і великих суден дозволили виявити багато спільних елементів.

1. Форма судна ($0.80 \leq \delta \leq 0.90$) має малий вплив на просідання і диферент судна.

2. Робота гвинта незначно впливає на паралельні просідання, а більше на диферент.

3. Навантаження гвинта не має великого впливу на просідання.

4. Судно під час руху отримує диферент на ніс.

5. Паралельне просідання і диферент зменшуються пропорційно H/T , а для $H/T = \text{const}$ просідання збільшується з ростом швидкості судна.

6. Початковий диферент на корму в деяких випадках може не бути врівноваженим диферентом на ніс, що виникає під час руху судна.

Початковий диферент на корму небажаний, навіть якщо в кінцевому підсумку судно під час

руху отримає диферент на ніс, так як деякі елементи корми, такі, як кермо, гвинт, небезпечно наближаються до ґрунту. Просідання змінюється при русі судна на циркуляції вліво або вправо (залежить від напрямку обертання гвинта), різні величини просідання будуть під час прискорення і уповільнення руху [2, с. 236].

Величина кліренсу K (глибина під кілем) повинна бути не менше суми навігаційних запасів:

$$K \geq \sum z_i \quad (10)$$

або

$$K = (H_H \mp \Delta H_H) - (d + \Delta d + a) \geq z_0 + z_1 + z_2 + z_3 \quad (11)$$

де H_H – навігаційна глибина, м;

ΔH_H – поправка глибини на відхилення рівня води (позитивна, коли рівень вище ординара), м;

d – осадка (найбільша) судна у воді стандартної щільності (кг/м³), м;

Δd – поправка осадки судна на солоність води, м;

a – поправка на обмерзання судна, м (враховується в кожному конкретному випадку);

z_0 – запас на крен судна, м;

z_1 – мінімальний навігаційний запас, м;

z_2 – хвильовий запас, м;

z_3 – швидкісний запас, м.

Висновки і пропозиції. Аналіз показує, що спостерігається строга залежність втрати швидкості судна як від глибини під кілем судна, так і від основних розмірів судна.

Падіння швидкості на мілководді може перевищувати 20% в порівнянні з глибокою водою.

Режим роботи двигуна на мілководді при підтримці постійної частоти обертання є надзвичайно важким і нормальна експлуатація двигуна не може бути забезпечена без зниження потужності двигуна зі зменшенням глибин.

На мілководді свідчення індукційного лага будуть підвищуватися через збільшення швидкості потоку, що обтікає корпус судна.

Разом з ростом хвилеутворення зростає і опір води руху судна, перевантажується двигун, зростає витрата палива, підвищується знос двигуна.

На мілководді в порівнянні з глибокою водою різко погіршується експлуатаційна стійкість судна на курсі, підвищується рискливість; помітно погіршується і поворотність суден, різко зменшуються кути дрейфу, кутлова швидкість повороту і відповідно збільшується радіус сталої циркуляції при однакових кутах переключки керма.

Погіршення поворотності на мілководді носить закономірний характер.

При русі суден відбувається зміна їх положення на плаву по відношенню до вільної поверхні і дна водойми. Істотна зміна посадки (просадки судна) спостерігається в умовах мілководдя.

Випробування моделей і великих суден дозволили виявити багато спільних елементів.

1. Робота гвинта незначно впливає на паралельне просідання, а більше на диферент.

2. Навантаження гвинта не має великого впливу на просідання.

3. Судно під час руху отримує диферент на ніс.

4. Паралельне просідання і диферент зменшуються пропорційно, просідання збільшується з ростом швидкості судна.

5. Початковий диферент на корму в деяких випадках може не бути врівноваженим диферентом на ніс, що виникає під час руху судна. Початковий диферент на корму небажаний, навіть

якщо в кінцевому підсумку судно під час руху отримає диферент на ніс, так як деякі елементи корми, такі, як кермо, гвинт, небезпечно наближаються до ґрунту. Просідання змінюється при русі судна на циркуляції вліво або вправо (залежить від напрямку обертання гвинта), різні величини просідання будуть під час прискорення і уповільнення руху.

Список літератури:

1. Снопков В.И. Управление судном. Учебник для ВУЗов. Санкт-Петербург, 2004. 536 с.
2. Демин С.И., Жуков Е.И. и др. Управление судном. Москва : Транспорт, 1991. 359 с.
3. Шарлай Г.Н. Управление морским судном. Владивосток : Мор. Гос. ун-т, 2009. 503 с.

References:

1. Snopkov, V.I. (2004). Upravleniye sudnom [Ship handling]. Uchebnik dlya VUZov. Sankt-Peterburg, 536 s.
2. Demin, S.I., Zhukov, E.I. ets. (1991). Upravleniye sudnom [Ship handling]. Moskva: Transport, 335 s.
3. Sharlai, G.N. (2009). Upravleniye sudnom [Ship handling]. Vladivostok: Mor. Gos.un-t, 503 s.