

ТЕОРЕТИЧНІ МОДЕЛІ АПРОКСИМАЦІЇ ПОПРАВКИ НА ХВИЛЮВАННЯ ПРИ РОЗРАХУНКУ ГЛИБИНИ ПІД КІЛЕМ

Петровський А. В., к.т.н., доцент кафедри судноводіння Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: andreyanybody@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3337-9577;

Бень А. П., к.т.н., професор кафедри судноводіння, проректор з науково-педагогічної роботи Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: a_ben@i.ua, ORCID: 0000-0002-9029-3489.

Погодні умови мають значний вплив на судно під час переходу, а здатність утримувати правильну позицію та точно визначати безпечні глибини є одним з найважливіших факторів безпечної навігації. У статті проведено аналіз реальних досліджень з розрахунку поправки на хвилювання при визначенні Under Keel Clearance судна. Проведено параметричну ідентифікацію даних та отримано аналітичні залежності поправки на хвилювання від довжини судна та висоти хвиль у найбільш поширених для експлуатації суден діапазонах хвиль при розрахунку Under Keel Clearance. Використані методи аналізу, інтерполяції та екстраполяції дозволили отримати квадратичні залежності, обмежені амплітудою хвиль для всього обраного діапазону хвиль при відповідній довжині судна. Розроблено програмне забезпечення WaveCheckRoute мовою програмування Python з наданням рекомендацій щодо збільшення поправки на хвилювання на кожному часовому кроці обраних карт погоди і маршруту з метою впровадження у навчальний процес для курсантів одночасно із тренажером NaviSailor 4000.

Ключові слова: глибина під кілем; поправка на хвилювання; безпечна ізобата; безпечна глибина; параметри навігаційної безпеки ЕКНІС; попередня прокладка; вплив вертикального переміщення судна на кліренс.

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.222-236

Вступ. Морські перевезення складають найпотужнішу частину транспортних перевезень у світі. Від них залежить багато економік світу: достатньо пригадати затримку судна «Evergiven» у Суецькому каналі. Всього тиждень затримки, а збитки – на млрд доларів у різних країнах. Своєчасність прибуття судна дуже важливе для сучасних логістичних ланок постачання. У свою чергу на своєчасність впливають погодні умови, аварії. За останні декілька років нещасні випадки навігаційного характеру, такі як посадка на мілину, траплялися у 40% усіх випадків: «"Grounding" is the incident with the most contributing factors associated with operational planning» [1] (р. 16). При дослідженні таких випадків можна визначити декілька різновидів помилок штурманів:

– невірні налагодження електронної картографічної навігаційної інформаційної системи (ECDIS);

– людський фактор;

– помилки при маневруванні;

– неможливість керування судном.

Невміння коректно налагодити параметри безпеки ECDIS, як на стадії попередньої прокладки, так і на виконавчій, офіцерським складом навігаційного містка, дорого коштують судноплавним компаніям.

Постановка проблеми. При плануванні переходу є декілька параметрів, які необхідно розраховувати по кожному плечу маршруту: безпечну ізобату (Safety Contour), безпечну глибину (Safety depth) – як основні та ізобату мілководдя (Shallow Contour), глибоководну ізобату (Deep Contour) – як додаткові. До параметру Safety Contour складовою компонентою входить глибина під кілем (Under Keel Clearance – UKC) [2, 3]:

$$\text{SAFETY CONTOUR} = \max(\text{SHIP'S STATIC DRAFT}) + \text{UKC} - \text{Height of Tide}, \quad (1)$$

де *Height of Tide* – висота припливу, м.

$$UKC = SQUAT + \Delta T_{swell} + \Delta T_{dock\ allowance} + \Delta T_{list} + \Delta T_{pitch} + CATZOC + Min\ Company\ Requirements, \quad (2)$$

де *Squat* – просідання судна, м;

ΔT_{swell} – збільшення осадки при хвилюванні (поправка на хвилювання), м;

CATZOC – похибка категорії зони довіри карти, м;

$\Delta T_{dock\ allowance}$ – зміна осадки судна завдяки зміні щільності портових/обмежених вод у порівнянні із відкритим морем, м;

ΔT_{pitch} – збільшення осадки за рахунок диференту, м;

ΔT_{list} – збільшення осадки судна при крені, м;

Min Company Requirements – вимоги щодо мінімального кліренсу з політики судноплавної компанії.

На UKC судна мають вплив багато факторів і один з них – хвилі (параметр ΔT_{swell} при розрахунках запасу під кілем): вітри наганяють вітрові хвилі, іншого походження хвилі – мара (*swell*), більш потужніші та з більшою акваторією розповсюдження. Поправка на хвилювання є суттєвим фактором зміни UKC, іноді це може скласти додаткові метри глибини. Збільшення ΔT_{swell} може негативно вплинути на розклад руху судна внаслідок можливої зміни маршруту на деяких плечах прокладки при дослідженні глибин акваторій. Вміння прогнозувати та своєчасно регулювати необхідний UKC, у тому числі за рахунок зміни ΔT_{swell} , збільшує безпеку судноплавства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наразі проведено досить багато досліджень щодо з'ясування залежності впливу хвиль на судно. По перш за все, це дослідження щодо зв'язку параметрів хвиль між собою та класифікація хвиль. У роботі [4] показана: «Relationship between speed, length, and period of waves in deep water, based upon the theoretical relationship between period and length» [4] (Fig. 3702c) і надано таблицю часу: «Minimum Time (T) in hours that wind must blow to form waves of H significant height (in feet) and P period (in seconds)» [4] (Table 3702b). По останній таблиці можна оцінити час, за який хвилі набудуть відповідної висоти – «значна висота хвиль» (Significant height of waves). Автор [5] оцінив вплив хвиль на судно, розподіл хвильового навантаження та розрахування вертикального занурення судна під час кільового хвилювання і описав різні моделі з отримання періоду, довжини хвиль у різних акваторіях – все це для оцінки ризиків. Надаються поширені приклади з математичного моделювання впливу хвильового навантаження на судно і різні моделі з отримання періоду, довжини хвиль у різних акваторіях у [6] роботі. Автори [7] наводять поширені приклади з математичного моделювання впливу хвильового навантаження на судно. Однак, найбільш важливими з погляду перевезень є дослідження стосовно практичного використання отриманих знань з поведінки хвиль.

Звісно, що для безпечного судноплавства, визначення безпечних глибин вдовж маршруту руху – є однією з головних умов, і, калькуляції UKC присвячено досить багато робіт, наприклад [2, 8, 9], і з року в рік, з'являються нові, більш конкретизуючі та пояснючі, у тому числі із використанням параметра хвильового запасу. У [9] надаються рекомендації щодо налагодження параметрів ECDIS, наприклад: в обмежених водах, якірній стоянці, прибережному судноплавстві, відкритому океані. Однак, при перевірці маршруту не надається можливості в ECDIS перевіряти кліренс за погодними умовами, але повідомляється, що це обов'язково потрібно робити.

Приклад посадки на мілину балкера *Pasha Bulker* на *Nobby's Beach*, Ньюкасл, Новий Південний Уельс, 8 червня 2007 року [10] досить показово доказує необхідність врахування хвильового запасу у тому числі. Також можливі ситуації посадки на мілину поблизу портів, на що впливає також і недостатнє врахування хвиль у портах з обмеженою глибиною. Порти

з неглибокими акваторіями, наприклад, у Північному морі, часто стикаються з проблемою, коли хвилі знижують ефективну осадку судна. Історії інцидентів: у гавані Роттердама, коли було зафіксовано декілька випадків (штормові хвилі спричинили контакт суден із дном під час заходу); порти Австралії, де відомі випадки посадок на мілину під час штормів, пов'язані з неврахуванням в UKC хвильового запасу. Розроблені системи оптимізації руху судна (SPOS) системи, їх аналоги, які оптимізують маршрут, розклад руху судна, мають великий функціонал, але теж не надають конкретні рекомендації щодо налагодження параметрів навігаційної безпеки при зміні погодних умов. Деякі програмні продукти можуть надавати обмеження акваторій за обраними критеріями погодних умов, наприклад, Bon Voyage System, але конкретних значень і рекомендацій для розрахування UKC теж не надають.

Аналіз наукових досліджень приводить до думки, що станом на зараз немає достатньо спрощених моделей з отримання параметра ΔT_{swell} для UKC. У роботі [8] надається методика розрахунку UKC, але дані щодо поправки на хвилювання враховуються без надання інформації їх отримання – лише як значна висота хвиль (Significant height of waves). Більш коректним є використання математичних залежностей та врахування, що висота ΔT_{swell} може досягати значення у моделі лише до значення власної амплітуди. При достатньому збільшенні висоти хвиль, вони стають більш крутими та потужними. Їх вплив на судно перестає бути виключно енергетичним і починає визначатися геометричними обмеженнями:

- судно не може «зануритися» у хвилю більше, ніж на висоту амплітуди, оскільки це фізичне обмеження;
- після певної висоти хвилі, вертикальні коливання судна обмежуються його розмірами та стійкістю.

У роботі [12] розглядаються вертикальні коливання судна у хвилюванні, але використовуються теж Significant height of waves, що перебільшує значення можливого збільшення UKC шляхом поправки на хвилювання як мінімум у 2 рази. Публікації [2, 9] надають пояснення з багатьох параметрів для отримання UKC, але не повне розуміння, як розраховувати таку поправку. Розглядаються моделі її збільшення у складі UKC [13], але теж не надається конкретної рекомендації щодо величини, яку потрібно додавати до UKC. При цьому результати досить гарно підходять для подальшого використання вже після отриманої інформації щодо напрямку хвиль для з'ясування небезпечних параметрів хвиль. Наводиться діаграма ризику неконтрольованого ковзання при попутному або косо-попутному хвилюванні (Risk of surf-riding in following or quartering seas) [14], яка показує небезпечні зони при існуванні можливості відображати розповсюдження хвиль на карті, але мова не йде про поширення досягнень та використання якогось програмного забезпечення для навчальних або професійних цілей. Загальне професійне користування будь-якими науковими розробками цієї тематики є складним. Те ж стосується і тренажерів для навчання судноводіїв. Описуються вимоги до тренажерів – симуляторів [15], у тому числі з використанням погоди: «...create a real-time operating environment, including navigation control and communications instruments and equipment appropriate to the navigation and watchkeeping tasks to be carried out and the manoeuvring skills to be assessed; and realistically simulate «own ship» characteristics in open-water conditions, as well as the effects of weather, tidal stream and currents» [15] (р. 8). Звісно, тренажер NaviTrainer 5000 на базі Херсонської державної морської академії (ХДМА) надає таку можливість, але перевірки побудованого маршруту на небезпечні погодні умови не робить, хоча і моделює її параметри.

Аналіз [16], щодо правил несення штурманської вахти, виявив таблицю розрахованих значень ΔT_{swell} на базі емпіричних даних, але вона дуже обмежена, і, попри те, що вона рекомендована до використання в Україні (простота та швидкість використання у навчальних та професійних цілях), потрібно досить часто перераховувати інтерполяційним методом проміжні значення щодо довжини судна та кроку хвиль у 0,5 м (табл. 1):

Таблиця 1 – Значення поправки на хвилювання при відповідних: довжині судна та висоті хвиль [16]

Довжина судна, м	Висота хвиль, м			
	1	2	3	4
75	0.2	0.7	1.2	2.0
100	0.2	0.6	1.1	1.7
150	0.1	0.4	0.8	1.3
200	0.1	0.3	0.7	1.1
250	–	0.3	0.6	1.0
300	–	0.2	0.5	0.8

Додатково, для збільшення точності врахування ΔT_{swell} обов'язково потрібно аналізувати курсові кути хвиль на ділянках маршруту (діаграми Богданова, Ремеза). На жаль, у таблиці обмежена кількість значень висоти хвиль до 4 м, що було обумовлено можливостями отримання емпіричних даних. Тому задля спрощення використання у професійній діяльності таких таблиць бажано було б мати готові розраховані дані ΔT_{swell} з кроком довжини судна 10 м та кроком висоти хвиль 0,5 м. Менші кроки для довжини судна дадуть підвищення точності, але це не суттєво при відповідних довжинах судна. Наприклад, при розрахуванні ΔT_{swell} для довжини 200 м та 150 м – різниця 50 м, а різниця ΔT_{swell} на хвилях висотою 4 м складає всього 0,2 м, тобто кожен 10 м довжини судна – це 4 см; якщо розглядати зменшення кроку висоти хвиль, то для 0,5 м висоті хвиль максимальне значення ΔT_{swell} очікується до значення амплітуди хвилі, тобто до 25 см, але тут ще потрібно враховувати неточність вимірювання та не постійність висот хвиль [4–6, 14], саме з чого і обирають висоту Significant height of waves. На даний час вже є розроблені і використані у професійній діяльності наукові розробки [14]. Розроблено та протестовано прилад Wave radar analyzer, який дозволяє визначати параметри хвиль наочно та моделювати за регресійними моделями хвилі, побудовано схему класифікації даних хвиль у регресійній моделі. Звісно, така точність (завдяки використанню приладу саме на місці подій) вимагається при виконавчій прокладці, але все ж таки не надає рекомендацій щодо врахування параметра ΔT_{swell} у УКС, лише розраховує значну висоту хвильової складової мари і вимагає наявності встановленого приладу на борту судна.

У результаті сучасні дослідження хвиль та врахування їх впливу на судно достатньо досліджені, але рекомендацій, поширення у професійній/навчальній діяльності спрощених розрахунків у найбільш поширених діапазонах довжин суден та висоти хвиль з відповідними кроками, немає.

Метою статті є побудова аналітичних залежностей поправки на хвилювання від довжини судна та висоти хвиль у найбільш поширених для експлуатації суден діапазонах, отримання табульованих значень і програмного продукту для користування у навчальних цілях курсантами одночасно із тренажером NaviSailor 4000.

Об'єктом дослідження є визначення параметра поправки на хвилювання для розрахунку УКС.

Методи дослідження: методи інтерполяції, екстраполяції, аналізу отриманих даних. Задачі дослідження: розробка математичних моделей для табулювання значень поправки на хвилювання при різних висотах хвиль та довжин судна і розробка програмного продукту WaveCheckRoute, який повинен відображати з кроком отриманих погодних карт від програмного продукту ZyGrib (FreeWare) [17] позицію судна вдовж маршруту, напрямки вітру та висоти хвиль, розрахований для цієї позиції параметр ΔT_{swell} , як рекомендований для додавання до УКС, відповідні небезпечні зони для додаткового обмеження навігаційного простору, наприклад, при перевищенні ліміту висоти хвиль. У рамках дослідження не підіймалися питання впливу: курсових кутів та частоти хвиль – на величину поправки на хвилювання; ступеню завантаженості судна – на амплітуду коливань судна.

Основна частина. Для розрахунку подальших значень параметра ΔT_{swell} (залежно від довжини судна та висоти хвиль) для продовження табл. 1 по висоті хвиль, а також отримання проміжних значень, можна використати емпіричні формули або апроксимацію на основі наданих даних табл. 1 і намагатися отримати значення з відносною похибкою менше 10%.

Для підвищення точності моделей потрібно отримати додаткові точки, наприклад, проміжні за допомогою методу двохвимірної інтерполяції. Спочатку інтерполюють по рядках (3):

$$\Delta T_{swell_{x,j}} = \Delta T_{swell_{i,j}} + \frac{x - l_i}{l_{i+1} - l_i} (\Delta T_{swell_{i+1,j}} - \Delta T_{swell_{i,j}}) \quad (3)$$

і вже потім – по стовпцях (4):

$$\Delta T_{swell_{x,y}} = \Delta T_{swell_{x,j}} + \frac{y - H_j}{H_{i+1} - H_i} (\Delta T_{swell_{x,j+1}} - \Delta T_{swell_{x,j}}), \quad (4)$$

де l_i – значення довжини судна i -го кроку, м;

H_j – значення висоти j хвилі;

$\Delta T_{swell_{ij}}$ – відоме значення ΔT_{swell} у клітинці (i, j) ;

x – точка для інтерполяції по рядках;

y – точка для інтерполяції по стовпцях.

Далі, для побудови екстраполяційних даних ΔT_{swell} потрібно з'ясувати можливий тип функції залежності від висоти хвилі. Для кожного розміру судна вона буде власна внаслідок різного результату впливу хвиль на судна різної довжини. Енергія морської хвилі пов'язана з її характеристиками, такими як висота, довжина, період і щільність води. Морські хвилі переносять енергію завдяки руху води. Якщо хвилі відносно невеликі, то їх вплив на судно можна описати квадратичною залежністю. Це пов'язано з тим, що енергія хвилі прямо пропорційна квадрату її висоти (5):

$$E \sim H^2; \quad E = \frac{1}{8} \rho g H^2, \quad (5)$$

де E – енергія хвилі на одиницю площі, Дж/м²;

ρ – густина води, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

H – висота хвилі (різниця між гребенем і западиною, у метрах).

Судно «вписується» у хвилю, і його рух (кільова хитавиця, вертикальні коливання) залежить від енергії хвилі. Саме тому квадратична залежність добре описує вплив хвиль на судно.

За отриманими проміжними результатами будують графіки залежностей з використанням пакета прогнозу від MS Excel 2016 з максимально можливим значенням R^2 .

Наступним кроком є побудова таблиці всіх проміжних результатів, розрахованих по отриманих залежностях з метою виявлення відносної похибки по всіх кроках моделювання (довжин суден і висоти хвиль) для порівняння. Умовою врахування гарного результату моделювання по кожній позиції є значення відносної похибки не більше 10%.

Якщо отримані залежності повністю задовольняють умові похибки до 10%, то цільові значення ΔT_{swell} по всіх довжинах розраховують і надалі для більших висот хвиль за умовою, що отримане значення не більше амплітуди хвилі. При цьому, якщо розраховане значення ΔT_{swell} при відповідній висоті хвилі досягає амплітуди хвилі, то всі подальші розрахунки, при тій самій довжині судна, повинні здійснюватися за правилом, що ΔT_{swell} дорівнює амплітуди хвилі (6):

$$\Delta T_{swell_{i,j}} = \begin{cases} f_i(H_j), & f_i(H_j) < H_j/2 \\ \frac{H_j}{2}, & f_i(H_j) \geq H_j/2 \end{cases} \quad (6)$$

де $f_i(H_j)$ – отримана аналітична функція f_i для судна довжиною i , при висоті хвиль H_j ;

H_j – хвилі висотою Significant height of waves j кроку.

Якщо значення має більшу за 10% похибку, потрібно з'ясувати значущість похибки для абсолютних значень: висоти хвилі, розрахованого ΔT_{swell} і довжини судна.

Використовуючи метод найменших квадратів на базі еталонних значень табл. 1, будують емпіричні залежності для подальшого розрахування ΔT_{swell} залежно від висоти хвиль для кожної довжини судна (табл. 3) з кроком 10 м з використанням MS Excel 2016. Діапазон хвиль обирають як найбільш поширений для комерційних суден з урахуванням умов штормів.

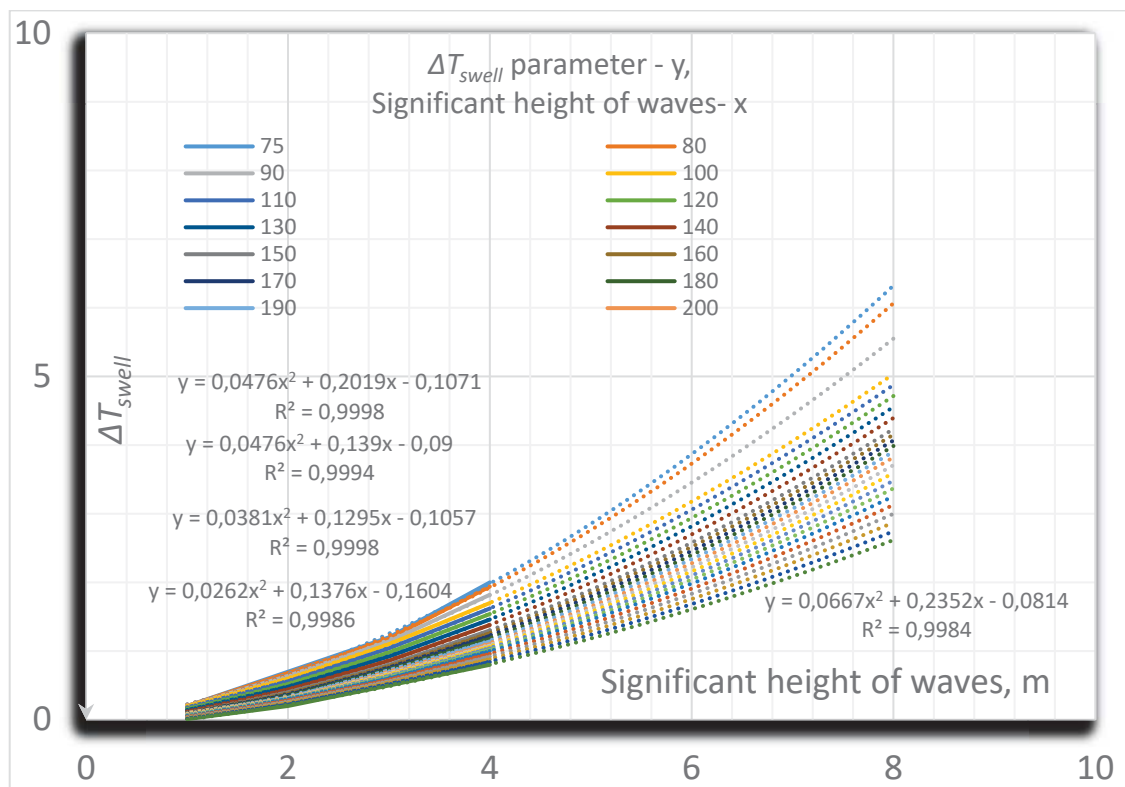
Основні результати та їх обговорення. Після розрахунку методом двохвимірної інтерполяції (3), (4) по даним табл. 1 з кроком довжини судна 10 м та кроком висоти хвиль 0,5 м отримано ΔT_{swell} (табл. 2):

Таблиця 2 – Загальна таблиця поправки на хвилювання з інтерполяційними значеннями

Довжина судна, м	Significant height of waves, м						
1	2	3	4	5	6	7	8
	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
75	0.2	0.45	0.7	0.95	1.2	1.6	2
80	0.2	0.44	0.68	0.93	1.18	1.56	1.94
90	0.2	0.42	0.64	0.89	1.14	1.48	1.82
100	0.2	0.4	0.6	0.85	1.1	1.4	1.7
110	0.18	0.37	0.56	0.8	1.04	1.33	1.62
120	0.16	0.34	0.52	0.75	0.98	1.26	1.54
130	0.14	0.31	0.48	0.7	0.92	1.19	1.46
140	0.12	0.28	0.44	0.65	0.86	1.12	1.38
150	0.1	0.25	0.4	0.6	0.8	1.05	1.3
160	0.1	0.24	0.38	0.58	0.78	1.02	1.26
170	0.1	0.23	0.36	0.56	0.76	0.99	1.22
180	0.1	0.22	0.34	0.54	0.74	0.96	1.18
190	0.1	0.21	0.32	0.52	0.72	0.93	1.14
200	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1
210	0.09	0.2	0.3	0.49	0.68	0.88	1.08
220	0.08	0.19	0.3	0.48	0.66	0.86	1.06
230	0.07	0.19	0.3	0.47	0.64	0.84	1.04
240	0.06	0.18	0.3	0.46	0.62	0.82	1.02
250	0.05	0.18	0.3	0.45	0.6	0.8	1
260	0.04	0.16	0.28	0.43	0.58	0.77	0.96
270	0.03	0.15	0.26	0.41	0.56	0.74	0.92
280	0.02	0.13	0.24	0.39	0.54	0.71	0.88
290	0.01	0.12	0.22	0.37	0.52	0.68	0.84
300	0.005	0.1	0.2	0.35	0.5	0.65	0.8

- жовті клітинки – відомі значення ΔT_{swell} ;
- помаранчеві клітинки – відомі значення параметрів;
- виділенням шрифтом – кроки довжини судна та висоти хвиль;
- всі інші значення – інтерпольовані двохвимірною інтерполяцією значення ΔT_{swell} .

Побудовані графіки аналітичних залежностей з досить великою точністю $R^2 \approx 1$ описують дані табл. 1 для значень ΔT_{swell} (рис. 1) для кожного кроку довжини судна, які занесені також у табл. 3.

Рисунок 1 – Графік залежності ΔT_{swell} від висоти хвиль для різних довжин судна

Використання пакета прогнозу від MS Excel надало можливість отримати конкретні аналітичні залежності для кожної довжини судна (табл. 3).

Таблиця 3 – Залежності ΔT_{swell} від висоти Significant height of waves по кроках 10 м довжини суден

Довжина судна, м	Аналітична залежність f_i	Достовірність апроксимації	Довжина судна, м	Аналітична залежність, f_i	Достовірність апроксимації
1	2	3	4	5	6
75	$0.0714H^2 + 0.2286H - 0.075$	$R^2 = 0.9978$	190	$0.0476H^2 + 0.1162H - 0.0729$	$R^2 = 0.9982$
80	$0.0667H^2 + 0.2352H - 0.0814$	$R^2 = 0.9984$	200	$0.0476H^2 + 0.1048H - 0.0643$	$R^2 = 0.9972$
90	$0.0571H^2 + 0.2486H - 0.0943$	$R^2 = 0.9994$	210	$0.0452H^2 + 0.111H - 0.0746$	$R^2 = 0.9982$
100	$0.0476H^2 + 0.2619H - 0.1071$	$R^2 = 0.9999$	220	$0.0429H^2 + 0.1171H - 0.085$	$R^2 = 0.9991$
110	$0.0476H^2 + 0.2419H - 0.1071$	$R^2 = 0.9999$	230	$0.0405H^2 + 0.1233H - 0.0954$	$R^2 = 0.9996$
120	$0.0476H^2 + 0.2219H - 0.1071$	$R^2 = 0.9998$	240	$0.0381H^2 + 0.1295H - 0.1057$	$R^2 = 0.9998$
130	$0.0476H^2 + 0.2019H - 0.1071$	$R^2 = 0.9998$	250	$0.0357H^2 + 0.1357H - 0.1161$	$R^2 = 0.9996$
140	$0.0476H^2 + 0.1819H - 0.1071$	$R^2 = 0.9998$	260	$0.0338H^2 + 0.1361H - 0.1249$	$R^2 = 0.9998$
150	$0.0476H^2 + 0.1619H - 0.1071$	$R^2 = 0.9998$	270	$0.0319H^2 + 0.1365H - 0.1338$	$R^2 = 0.9998$
160	$0.0476H^2 + 0.1505H - 0.0986$	$R^2 = 0.9997$	280	$0.03H^2 + 0.1369H - 0.1426$	$R^2 = 0.9996$
170	$0.0476H^2 + 0.139H - 0.09$	$R^2 = 0.9994$	290	$0.0281H^2 + 0.1372H - 0.1515$	$R^2 = 0.9992$
180	$0.0476H^2 + 0.1276H - 0.0814$	$R^2 = 0.9989$	300	$0.0262H^2 + 0.1376H - 0.1604$	$R^2 = 0.9986$

За отриманими аналітичними залежностями зроблені розрахунки всіх значень ΔT_{swell} у межах еталонних значень висот хвиль від 1 м до 4 м з кроками: 0,5 м – по хвилях та 10 м – по довжині судна (табл. 4). Метою побудови такої таблиці є визначення відносних похибок розрахованих значень ΔT_{swell} (табл. 4) по аналітичних залежностях (табл. 3) стосовно до наданих еталонних даних (табл.1) та інтерполяційних (табл. 2). Виділеним шрифтом – для порівняння із еталонними значеннями табл. 1.

Таблиця 4 – Розраховані значення ΔT_{swell} у межах еталонних значень висот хвиль та довжин судна

Довжина судна, м	Significant height of waves, м						
1	2	3	4	5	6	7	8
	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
75	0.23	0.43	0.67	0.94	1.25	1.6	1.98
80	0.22	0.42	0.66	0.92	1.22	1.56	1.93
90	0.21	0.41	0.63	0.88	1.17	1.48	1.81
100	0.2	0.39	0.61	0.85	1.11	1.39	1.7
110	0.18	0.36	0.57	0.8	1.05	1.32	1.62
120	0.16	0.33	0.53	0.75	0.99	1.25	1.54
130	0.14	0.3	0.49	0.7	0.93	1.18	1.46
140	0.12	0.27	0.45	0.65	0.87	1.11	1.38
150	0.1	0.24	0.41	0.6	0.81	1.04	1.3
160	0.1	0.23	0.39	0.58	0.78	1.01	1.27
170	0.1	0.23	0.38	0.56	0.76	0.98	1.23
180	0.09	0.22	0.36	0.54	0.73	0.95	1.19
190	0.09	0.21	0.35	0.52	0.7	0.92	1.15
200	0.09	0.2	0.336	0.5	0.68	0.89	1.12
210	0.082	0.19	0.328	0.49	0.67	0.87	1.09
220	0.08	0.19	0.32	0.48	0.65	0.85	1.07
230	0.07	0.18	0.31	0.47	0.64	0.83	1.05
240	0.06	0.17	0.31	0.46	0.63	0.81	1.02
250	0.055	0.17	0.3	0.45	0.61	0.8	1
260	0.045	0.16	0.28	0.43	0.59	0.77	0.96
270	0.03	0.14	0.27	0.41	0.56	0.73	0.92
280	0.02	0.13	0.25	0.39	0.54	0.7	0.89
290	0.01	0.12	0.24	0.37	0.51	0.67	0.85
300	0.0034	0.1	0.22	0.35	0.49	0.64	0.81

Розраховані значення відносних похибок для даних табл. 2 та табл. 4 занесені у табл. 5.

Таблиця 5 – Відносні похибки, %

Довжина судна, м	Significant height of waves, м						
1	2	3	4	5	6	7	8
	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
75	0	4.4	4.3	1.1	4.2	0	1
80	10	4.5	2.9	1.1	3.4	0	0.5
90	5	2.4	1.6	1.1	2.6	0	0.5
100	0	2.5	1.7	0	0.9	0.7	0
110	0	2.7	1.8	0	1	0.8	0
120	0	2.9	1.9	0	1	0.8	0
130	0	3.2	2.1	0	1.1	0.8	0
140	0	3.6	2.3	0	1.2	0.9	0
150	0	4	2.5	0	1.3	1	0
160	0	4.2	2.6	0	0	1	0.8
170	0	0	5.6	0	0	1	0.8
180	10	0	5.9	0	1.4	1	0.8
190	10	0	9.4	0	2.8	1.1	0.9
200	10	0	12	0	2.9	1.1	1.8
210	8.9	5	9.3	0	1.5	1.1	0.9
220	0	0	6.7	0	1.5	1.2	0.9
230	0	5.3	3.3	0	0	1.2	1
240	0	5.6	3.3	0	1.6	1.2	0
250	10	5.6	0	0	1.7	0	0
260	12.5	0	0	0	1.7	0	0
270	0	6.7	3.8	0	0	1.4	0
280	0	0	4.2	0	0	1.4	1.1
290	0	0	9.1	0	1.9	1.5	1.2
300	32	0	10	0	2	1.5	1.3

Результати покращуються при збільшенні висоти хвиль, крім висоти у 1 м. Значення похибки 32% здається завеликим, але, розглядаючи абсолютне значення показника у 0,5 см (0,005 м) на довжині судна у 300 м, це взагалі можна рахувати статистичною похибкою або не значущим. Ті ж пояснення і для значення 12,5% при довжині судна у 260 м. Взагалі 1 м хвилі не є небезпечними для комерційних суден внаслідок їх розміру, тому цієї висоті не приділяється увага у дослідженні.

Таблиця 6 – Розраховані значення ΔT_{swell} по кроках

Довжина судна, м	Significant height of waves, м															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	
75	0.23	0.43	0.67	0.94	1.25	1.6	1.98	2.25	2.5	2.75	3	3.25	3.5	3.75	4	
80	0.22	0.42	0.66	0.92	1.22	1.56	1.93	2.25	2.5	2.75	3	3.25	3.5	3.75	4	
90	0.21	0.41	0.63	0.88	1.17	1.48	1.81	2.18	2.5	2.75	3	3.25	3.5	3.75	4	
100	0.2	0.39	0.61	0.85	1.11	1.39	1.7	2.04	2.39	2.75	3	3.25	3.5	3.75	4	
110	0.18	0.36	0.57	0.8	1.05	1.32	1.62	1.95	2.29	2.66	3	3.25	3.5	3.75	4	
120	0.16	0.33	0.53	0.75	0.99	1.25	1.54	1.86	2.19	2.55	2.94	3.25	3.5	3.75	4	
130	0.14	0.3	0.49	0.7	0.93	1.18	1.46	1.77	2.09	2.44	2.82	3.22	3.5	3.75	4	
140	0.12	0.27	0.45	0.65	0.87	1.11	1.38	1.68	1.99	2.33	2.7	3.09	3.5	3.75	4	
150	0.1	0.24	0.41	0.6	0.81	1.04	1.3	1.59	1.89	2.22	2.58	2.96	3.36	3.75	4	
160	0.1	0.23	0.39	0.58	0.78	1.01	1.27	1.54	1.84	2.17	2.52	2.89	3.29	3.71	4	
170	0.1	0.23	0.38	0.56	0.76	0.98	1.23	1.5	1.8	2.11	2.46	2.82	3.22	3.63	4	
180	0.09	0.22	0.36	0.54	0.73	0.95	1.19	1.46	1.75	2.06	2.4	2.76	3.14	3.55	3.99	
190	0.09	0.21	0.35	0.52	0.7	0.92	1.15	1.41	1.7	2.01	2.34	2.69	3.07	3.48	3.9	
200	0.09	0.2	0.33	0.5	0.68	0.89	1.12	1.37	1.65	1.95	2.28	2.63	3	3.4	3.82	
210	0.082	0.19	0.328	0.49	0.67	0.87	1.09	1.34	1.61	1.9	2.22	2.56	2.92	3.3	3.71	
220	0.08	0.19	0.32	0.48	0.65	0.85	1.07	1.31	1.57	1.86	2.16	2.49	2.84	3.21	3.6	
230	0.07	0.18	0.31	0.47	0.64	0.83	1.05	1.28	1.53	1.81	2.1	2.42	2.75	3.11	3.48	
240	0.06	0.17	0.31	0.46	0.63	0.81	1.02	1.25	1.49	1.76	2.04	2.35	2.67	3.01	3.37	
250	0.055	0.17	0.3	0.45	0.61	0.8	1	1.22	1.45	1.71	1.98	2.27	2.58	2.91	3.25	
260	0.045	0.16	0.28	0.43	0.59	0.77	0.96	1.17	1.4	1.65	1.91	2.19	2.48	2.8	3.13	
270	0.03	0.14	0.27	0.41	0.56	0.73	0.92	1.13	1.35	1.58	1.83	2.1	2.38	2.68	3	
280	0.02	0.13	0.25	0.39	0.54	0.7	0.89	1.08	1.29	1.52	1.76	2.01	2.29	2.57	2.87	
290	0.01	0.12	0.24	0.37	0.51	0.67	0.85	1.03	1.24	1.45	1.68	1.93	2.19	2.46	2.74	
300	0.003	0.1	0.22	0.35	0.49	0.64	0.81	0.99	1.18	1.39	1.61	1.84	2.09	2.35	2.62	

1	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13	13.5	14
210	4.13	4.5	4.75	5	5.25	5.5	5.75	6	6.25	6.5	6.75	7
220	4.01	4.44	4.75	5	5.25	5.5	5.75	6	6.25	6.5	6.75	7
230	3.88	4.29	4.73	5	5.25	5.5	5.75	6	6.25	6.5	6.75	7
240	3.75	4.15	4.56	5	5.25	5.5	5.75	6	6.25	6.5	6.75	7
250	3.62	4	4.39	4.81	5.24	5.5	5.75	6	6.25	6.5	6.75	7
260	3.47	3.84	4.22	4.62	5.03	5.46	5.75	6	6.25	6.5	6.75	7
270	3.33	3.68	4.04	4.42	4.82	5.23	5.65	6	6.25	6.5	6.75	7
1	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
280	3.19	3.52	3.87	4.23	4.6	4.99	5.4	5.82	6.25	6.5	6.75	7
290	3.04	3.36	3.69	4.03	4.39	4.76	5.14	5.54	5.95	6.38	6.75	7
300	2.9	3.2	3.51	3.84	4.17	4.52	4.89	5.26	5.65	6.06	6.47	6.9

Виділенням шрифтом показані розраховані значення на місці еталонних значень з табл. 1 (винятком є значення при висоті хвиль 1 м і довжині судна 250 м, 300 м, які встановлені на рівні 5,5 см та 0,3 см, що у порівнянні із довжиною судна все одно мають статус статистичної похибки при розрахуванні ΔT_{swell}).

Програмна реалізація. На базі отриманих моделей розроблено програмне забезпечення у операційній системі Windows 11 з використанням програмної оболонки Spider v6.0 у середовищі Python v3.12.8. Аналіз структури файлів grb карт здійснювався за

описом стандартів та специфікацій [18, 19]. Всі розрахунки дистанцій за алгоритмом здійснюються по Great Circle, а маршрут з ECDIS відображається у локсодромії.

Порядок опрацювання маршруту курсантом:

1. Завантажується карта погоди Grib для відповідного прямокутника координат, при цьому може використовуватися Freeware програмне забезпечення, наприклад, zyGrib (біла частина карти – там де немає значень хвиль, в основному – Land).

2. Здійснюються налаштування щодо подальших розрахунків та відображення (наведені значення – значення за замовчуванням, подальші кроки – використання саме вказаних обмежень, рис. 2):

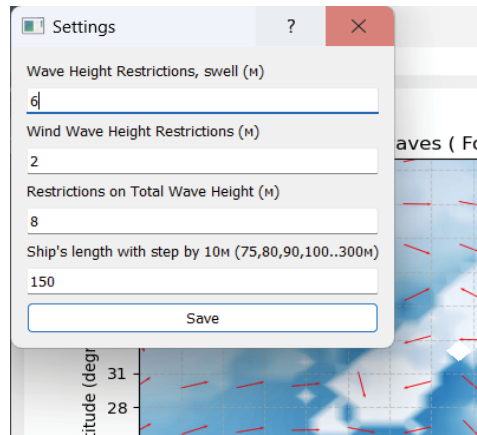


Рисунок 2 – Меню налаштувань обмежень та довжини судна

3. Здійснюється імпорт маршруту з ECDIS у форматі .RT3 і завантажується поверх карти погоди (рис. 3).

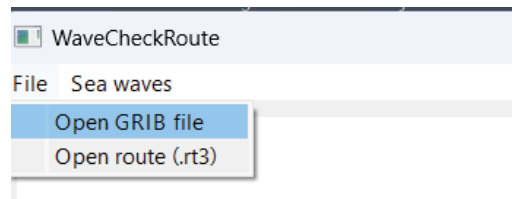


Рисунок 3 – Діалогове меню вибору файлів погоди у форматі .grb.bz2 і маршруту .RT3

4. Обирається розклад руху за маршрутом, якщо там декілька варіантів, програма їх відображає і вимагає вибору одного з них. Координати у рядку статусу наведені у десятковій та навігаційній формах. На карті координати надані у десятковій формі, яка використовується за відомими правилами при програмуванні: «-» – західна довгота та південна широта, «+» – східна довгота і північна широта (рис. 4).

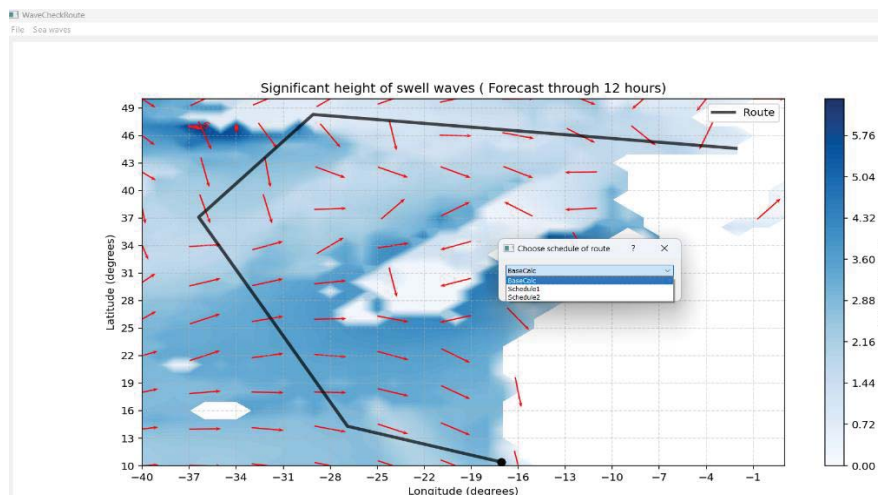


Рисунок 4 – Діалогове меню вибору розкладу руху

5. Розраховуються позиції судна за цим розкладом відповідно до кроку погодної карти.

6. Розраховується за даними хвиль (тип хвиль: swell, wind, їх напрямок руху) у той самий час і у тієї позиції значення висоти хвиль та можливе значення збільшення UKC (рис. 5).

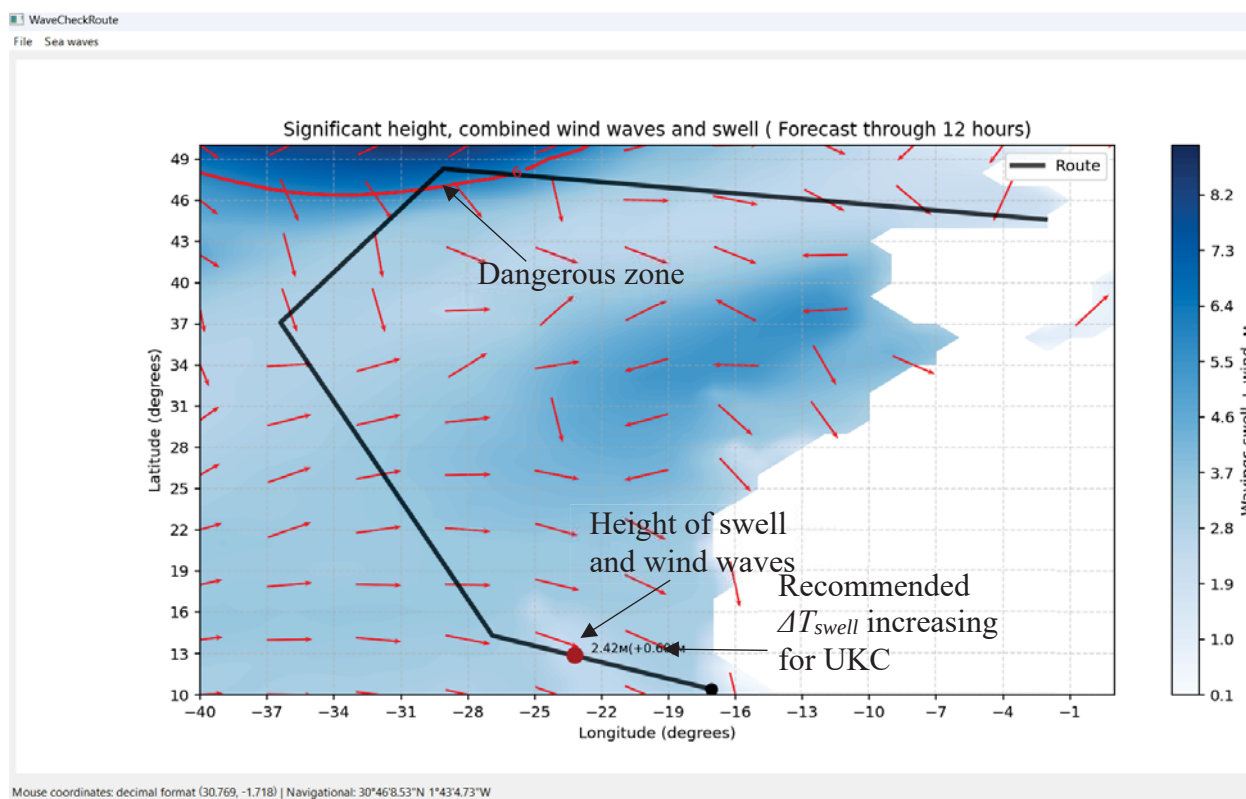


Рисунок 5 – Надання рекомендованого значення ΔT_{swell} у відповідній позиції судна за часовим кроком карти прогнозу

Додатково показуються червоним контуром небезпечні зони з перевищенням значення параметра висоти хвиль обраної карти поточного часового кроку (довжина судна, небезпечна межа висоти хвиль налагоджується у налаштуваннях програми).

Висновки. У результаті дослідження були отримані аналітичні залежності для довжин суден у діапазоні [75; 300] м з кроком 10 м та висотами хвиль у діапазоні [1; 14] м з кроком 0,5 м. Виявлені випадки зниження точності моделювання на малих висотах хвиль до 1 м та для суден завдовжки 250 м, але практичної значущості на таких хвилях похибки не мають, оскільки різниця абсолютних значень складає менше 1 см, що для довжин суден у 250, 300 м взагалі можна рахувати статистичною похибкою. Таблиця розрахованих значень ΔT_{swell} дозволяє використовувати значення одразу, без попередніх розрахунків інтерполяційним методом. Наприклад, таблиці різних морських альманахів, розраховують завчасно для подальшої економії часу штурманів при попередній прокладці. Розроблене програмне забезпечення є привабливим для використання у навчальних цілях:

- економія часу на визначення ΔT_{swell} у кожному місцезнаходженні судна відповідно до його маршруту та часовому кроці погодної карти;
- можливість самостійно визначати курсантом більш точно параметр UKC на кожній ділянці маршруту, відповідно до рекомендацій програми та присутніх глибинах;
- наочність напрямку і висоти хвиль надає можливість прийняти відповідні рішення курсантом;
- надає ізолініями небезпечні контури зон, де є перевищення параметра хвиль, відповідно до карт: вітрових хвиль, мари, загальної висоти хвиль.

– додатково навчає курсантів користуватися різним програмним забезпеченням для підвищення безпеки навігаційної прокладки.

Оскільки на базі ХДМА ведуться дослідження з використанням тренажерів Wärtsilä (Transas) NaviTrainer 5000 (для моделювання) і NaviSailor 4000 (для курсантів) при моделюванні різних ситуацій в умовах обмеженої безпечної навігаційної частини акваторії для адаптації курсантів [20, 21], тому набуття додаткових навичок побудови попередньої прокладки разом з використанням погодних умов додатково підвищить кваліфікацію майбутніх спеціалістів і збільшить їх конкурентоздатність на ринку праці морського флоту.

Звісно, при реальному використанні потрібно на основі досвіду враховувати і напрямок, і глибину (для оцінки величини перенесення енергії хвилями), і період хвиль, їх довжину, остійність судна, наприклад, побудувати діаграму Богданова для оцінки небезпечних хвиль або дослідити діаграму Ремеза щодо качки, досліджувати вплив ступеня завантаженості судна на амплітуду коливань. Розроблені аналітичні залежності та програмне забезпечення передбачається для використання насамперед у тренажерних центрах та вищих навчальних закладах відповідної спеціалізації для набуття курсантами навичок перевірки і уточнення маршруту відповідно до поточних погодних умов. Для використання розробленого програмного забезпечення у професійних цілях потрібно обов'язково враховувати перелічені вище параметри оцінки взаємодії хвиль з судном.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження можуть призвести до необхідності побудови системи підтримки прийняття рішень, де враховується не тільки висота ΔT_{swell} , а й напрямок хвиль і можливі наслідки для конкретного типу судна з урахуванням його зносу, ступеню втомленості металу та інше, можлива оцінка УКС за результатами досліджень [12].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Safety Analysis of EMCIP Data. Analysis of Navigation Accidents. EMCIP Navigation Accidents-Summary report, Publisher: EMCIP, September 2022, p. 25. URL: <https://www.emsa.europa.eu/emcip/download/7310/4830/23.html> (дата звернення 11.01.2025).
2. Petrovskiy A. V., Isaychev A. G., Zlobin, Y. O. On the issue of adjustment and calculation of navigation depth parameters during route creating. Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences. 2023, Volume 47, pp. 324–335. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300119>.
3. Вагущенко Л. Л. Суднові навігаційно-інформаційні системи. Одеса, НУ «ОМА», 2016. 238 с.
4. Bowditch N. American practical navigator an epitome of navigation; Publisher: National geospatial-intelligence agency Springfield, Virginia, USA, 2019; Volume 1, p. 753 URL: https://thenauticalalmanac.com/2019_Bowditch-American Practical Navigator/Volume-1/2019%20Bowditch_Vol_1_LoRes.pdf (дата звернення 11.01.2025).
5. Cartwright B. K., Melchers R. E., Renilson M. Modelling Sea-Surface Wave Motion and Ship Response Using Smoothed Particle Hydrodynamics and Finite Element Analysis. *J. Mar. Sci. Eng.* 2024, 12, 1919. <https://doi.org/10.3390/jmse12111919>.
6. Seakeeping ship behaviour in rough weather: By A.R.J.M. Lloyd. Ellis Horwood, Chichester, 1989. p. 486.
7. Recommended practice: Environmental conditions and environmental loads. DNV-RP-C205. August 2017 ed., Publisher: DNV GL AS, Det Norske Veritas group, p. 259. URL: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689468335664874/DNVGL-RP-C205_2017-Environment.pdf (дата звернення 11.01.2025).
8. Burenkov O., Pipchenko O., Aleksishin A. PRACTICAL FEATURES OF ECDIS SAFETY DEPTH CALCULATION. *Shipping & Navigation*, 2020, pp. 16–26. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.30.2020.16–26>.

9. ECDIS Procedures Guide, 2018 ed.; Publisher: Witherby Publishing Group Ltd, Scotland, UK, 2018, p. 176.
10. Independent investigation into the grounding of the Panamanian registered bulk carrier Pasha Bulker on Nobbys Beach, Newcastle, New South Wales, on 8 June 2007. The Australian Transport Safety Bureau. URL: https://www.atsb.gov.au/sites/default/files/media/1362985/mair243_001.pdf (дата звернення 11.01.2025).
11. Gourlay T. P. Ship under-keel clearance in waves. Proc. Coasts and Ports, Melbourne, July 2007, pp. 1–6, URL: https://cmst.curtin.edu.au/wp-content/uploads/sites/4/2016/05/gourlay-2007-ship_underkeel_clearance_in_waves.pdf (дата звернення 11.01.2025).
12. Gallucci F., Vernengo G. Impact of direct seakeeping computation on ship Underwater Keel Clearance prediction. 12th International workshop on ship and marine hydrodynamics (IWSH-2023), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1288, Aalto University, Espoo, Finland, 28/08/2023, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1288/1/012031>.
13. MSC.1/Circ.1228. Revised guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions; Publisher: IMO, London, 11 January 2007, pp. 100–107. URL: https://www.piclub.or.jp/wp-content/uploads/2019/04/Loss-Prevention-Bulletin-Vol.45-Light_6.pdf (дата звернення 11.01.2025).
14. Lee S. W., Sasa K., Masagaki T., Chen C. Effects of swell waves caused by atmospheric depression on ships sailing in the North Pacific ocean. Ocean Engineering, Volume 312, Part 2, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119121>.
15. MSC circ. 1503 ECDIS – Guidance for Good Practice. IMO, Publisher: Albert Embankment, LONDON, 2017, p. 23. URL: [https://iho.int/uploads/user/About%20IHO/International_Organisations/ECDIS-ENC/ English /MSC.1-Circ.1503-Rev.1%20-%20Ecdis%20-%20Guidance%20For%20Good%20Practice.pdf](https://iho.int/uploads/user/About%20IHO/International_Organisations/ECDIS-ENC/English/MS-C.1-Circ.1503-Rev.1%20-%20Ecdis%20-%20Guidance%20For%20Good%20Practice.pdf) (дата звернення 11.01.2025).
16. Recommendations for the Organization of the Navigation Service on Marine Vessels of Ukraine (RNSMV-98), South Research Institute of Marine Fleet, Odesa, 1990, c. 59.
17. zyGrib – GRIB File Viewer. Weather data visualization. URL: <https://www.zygrib.org>.
18. IHO TRANSFER STANDARD for DIGITAL HYDROGRAPHIC DATA, 3.1 ed. (2000-2014), Special Publication No. 57, Publisher: International Hydrographic Bureau, MONACO, 2014 p. 3-B-8. URL: <https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-57/31Main.pdf> (дата звернення 11.01.2025).
19. Manual on Codes, International Codes, Annex II to the WMO Technical Regulations Part B – Binary Codes, Part C – Common Features to Binary and Alphanumeric Codes. 2023 ed.; Publisher: WMO, Geneva, 2023, Volume I. 2, No. 306, p. 1407. URL: [https://library.wmo.int/records/item/35625-manual-on-codes-volume-i-2-international-codes? Language_id=13&back=&offset=](https://library.wmo.int/records/item/35625-manual-on-codes-volume-i-2-international-codes?Language_id=13&back=&offset=) (дата звернення 11.01.2025).
20. Voloshynov S., Petrovskyi A., Popova H., Cherniavskyi V., Pindosova T. Use of VR Technologies in the System of Quality Assessment of Seafarer's Professional Competence Formation. Workshops. ICTERI 2021: Communications in Computer and Information Science., Publisher: Springer, Cham, Volume 1635., 2021, pp. 258–280, https://doi.org/10.1007/978-3-031-14841-5_17.
21. Zinchenko S. M., Nosov P. S., Mateychuk V. M., Mamenko P. P., Grosheva O. O. Automatic collision avoidance with multiple targets, including maneuvering ones. Radio Electronics, Computer Science, Control, 2019, No.4, pp. 211–222. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-4-20>.

REFERENCES

1. Safety Analysis of EMCIP Data (2022). Analysis of Navigation Accidents. EMCIP Navigation Accidents-Summary report, Publisher: EMCIP, p. 25. URL: <https://www.emsa.europa.eu/emcip/download/7310/4830/23.html> (дата звернення 11.01.2025).
2. Petrovskiy, A. V., Isaychev, A. G., Zlobin, Y. O. (2023). On the issue of adjustment and calculation of navigation depth parameters during route creating. Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences. Volume 47, pp. 324–335. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300119>.
3. Vahushchenko, L. L. (2016). Sudnovi naviatsiino-informatsiini systemy. Odesa, NU «OMA». 238 p.
4. Bowditch, N. (2019). American practical navigator an epitome of navigation; Publisher: National geospatial-intelligence agency Springfield, Virginia, USA, Volume 1, p. 753 URL: https://thenauticalalmanac.com/2019_Bowditch-American Practical Navigator/Volume-_1/2019%20Bowditch_Vol_1_LoRes.pdf (дата звернення 11.01.2025).
5. Cartwright, B. K., Melchers, R. E., Renilson, M. (2024). Modelling Sea-Surface Wave Motion and Ship Response Using Smoothed Particle Hydrodynamics and Finite Element Analysis. *J. Mar. Sci. Eng.* 2024, 12, 1919. <https://doi.org/10.3390/jmse12111919>.
6. Seakeeping ship behaviour in rough weather: By A.R.J.M. Lloyd. Ellis Horwood, Chichester, 1989. p. 486.
7. Recommended practice: Environmental conditions and environmental loads. DNV-RP-C205. August 2017 ed., Publisher: DNV GL AS, Det Norske Veritas group, p. 259. URL: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689468335664874/DNVGL-RP-C205_2017-Environment.pdf (дата звернення 11.01.2025).
8. Burenkov, O., Pipchenko, O., Aleksishin, A. (2020). PRACTICAL FEATURES OF ECDIS SAFETY DEPTH CALCULATION. Shipping & Navigation, pp. 16–26. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.30.2020.16–26>.
9. ECDIS Procedures Guide, 2018 ed.; Publisher: Witherby Publishing Group Ltd, Scotland, UK, p. 176.
10. Independent investigation into the grounding of the Panamanian registered bulk carrier Pasha Bulker on Nobbys Beach, Newcastle, New South Wales, on 8 June 2007. The Australian Transport Safety Bureau. URL: https://www.atsb.gov.au/sites/default/files/media/1362985/mair243_001.pdf (дата звернення 11.01.2025).
11. Gourlay, T. P. (2007). Ship under-keel clearance in waves. Proc. Coasts and Ports, Melbourne, pp. 1–6, URL: https://cmst.curtin.edu.au/wp-content/uploads/sites/4/2016/05/gourlay-2007-ship_underkeel_clearance_in_waves.pdf (дата звернення 11.01.2025).
12. Gallucci, F., Vernengo, G. (2023). Impact of direct seakeeping computation on ship Underwater Keel Clearance prediction. 12th International workshop on ship and marine hydrodynamics (IWSH-2023), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1288, Aalto University, Espoo, Finland, 28/08/2023, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1288/1/012031>.
13. MSC.1/Circ.1228. Revised guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions; Publisher: IMO, London, 11 January 2007, pp. 100–107. URL: https://www.piclub.or.jp/wp-content/uploads/2019/04/Loss-Prevention-Bulletin-Vol.45-Light_6.pdf (дата звернення 11.01.2025).
14. Lee, S. W., Sasa, K., Masagaki, T., Chen, C. (2024). Effects of swell waves caused by atmospheric depression on ships sailing in the North Pacific ocean. Ocean Engineering, Volume 312, Part 2, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119121>.
15. MSC circ. (2017). 1503 ECDIS – Guidance for Good Practice. IMO, Publisher: Albert Embankment, LONDON, p. 23. URL: https://iho.int/uploads/user/About%20IHO/International_

Organisations/ECDIS-ENC/English/MSC.1-Circ.1503-Rev.1%20-%20Ecdis%20-%20Guidance%20 %20Good%20Practice.pdf (дата звернення 11.01.2025).

16. Recommendations for the Organization of the Navigation Service on Marine Vessels of Ukraine (RNSMV-98), South Research Institute of Marine Fleet, Odesa, 1990, с. 59.

17. zyGrib – GRIB File Viewer. Weather data visualization. URL: <https://www.zygrib.org>.

18. IHO TRANSFER STANDARD for DIGITAL HYDROGRAPHIC DATA, 3.1 ed. (2000-2014), Special Publication No. 57, Publisher: International Hydrographic Bureau, MONACO, 2014, p. 3-B-8. URL: <https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-57/31Main.pdf> (дата звернення 11.01.2025).

19. Manual on Codes, International Codes, Annex II to the WMO Technical Regulations Part B – Binary Codes, Part C – Common Features to Binary and Alphanumeric Codes. 2023 ed.; Publisher: WMO, Geneva, 2023, Volume I. 2, No. 306, p. 1407. URL: https://library.wmo.int/records/item/35625-manual-on-codes-volume-i-2-international-codes?language_id=13&back=&offset= (дата звернення 11.01.2025).

20. Voloshynov, S., Petrovskiy, A., Popova, H., Cherniavskiy, V., Pindosova, T. (2021). Use of VR Technologies in the System of Quality Assessment of Seafarer's Professional Competence Formation. Workshops. ICTERI 2021: Communications in Computer and Information Science., Publisher: Springer, Cham, Volume 1635., pp. 258–280, https://doi.org/10.1007/978-3-031-14841-5_17.

21. Zinchenko, S. M., Nosov, P. S., Mateychuk, V. M., Mamenko, P. P., Grosheva, O. O. (2019). Automatic collision avoidance with multiple targets, including maneuvering ones. Radio Electronics, Computer Science, Control, No.4, pp. 211–222. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-4-20>.

Petrovskiy A., Ben A. THEORETICAL MODELS OF APPROXIMATION OF WAVE CORRECTIONS IN UNDER KEEL CLEARANCE CALCULATIONS

Year after year, maritime transportation continues to grow, with an increasing count of ships and their displacement requiring enhanced navigational skills and precision. Weather factors such as wind and waves significantly influence a vessel's ability to maintain position and accurately determine safe depths, making them critical for safe navigation.

This article aims to derive analytical dependencies for the Swell parameter based on vessel length and wave height within the most common operational ranges for ships. It also provides tabulated Swell values and a software product designed for cadet training alongside the NaviSailor 4000 simulator. The article analyzed existing accounting methods for wave-induced increases in vessel clearance. It was found that no proposed method provides practical recommendations for calculating the Swell parameter for any ship length or wave height. Although tables containing the desired parameter exist, additional interpolation calculations are required to determine the Swell value. To address this, preliminary calculations were performed using interpolation of known values for this parameter. Then, ensuring maximum alignment with reference data, mathematical models were developed for each 10-meter increment in vessel length and each 0.5-meter increment in wave height. Through extrapolation, with constraints on wave amplitude values, specific Swell parameter values were determined by tabulating functions. The resulting table of Swell values allows for direct application without the need for prior interpolation calculations. Based on these models, the WaveCheckRoute software was developed. This tool enables users to work with weather maps in .grib format for any forecast step, overlay routes in .rt3 format, select vessel schedules, and analyze dangerous wave heights along a route at estimated arrival times. The analysis is conducted based on weather forecast intervals and vessel speed, enhancing passage planning and safety in maritime navigation.

Key words: UKC; swell; Safety Contour; Safety Depth; ECDIS Safety Parameters; Passage planning; effect of wave induce motion on UKC.

© Петровський А. В., Бень А. П.

Статтю прийнято до редакції 09.03.2025