

**А. П. ШЕВЧЕНКО**

доктор філософії за спеціальністю 271 «Річковий та морський транспорт»,  
старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем  
на водному транспорті  
Відокремлений структурний підрозділ «Дунайський інститут водного  
транспорту Національного транспортного університету»  
ORCID: 0009-0003-5878-6771

**І. В. ТРОФИМЕНКО**

кандидат технічних наук,  
старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем  
на водному транспорті  
Відокремлений структурний підрозділ «Дунайський інститут водного  
транспорту Національного транспортного університету»  
ORCID: 000-0002-0919

**Н. С. УРУМ**

кандидат педагогічних наук, доцент,  
в.о. завідувача кафедри природничо-математичних  
та інженерно-технічних дисциплін  
Відокремлений структурний підрозділ «Дунайський інститут водного  
транспорту Національного транспортного університету»  
ORCID: 0000-0003-2493-9314-2948

**А. О. ТРОФИМЕНКО**

доктор філософії за спеціальністю 271 «Річковий та морський транспорт»,  
доцент кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем  
на водному транспорті  
Відокремлений структурний підрозділ «Дунайський інститут водного  
транспорту Національного транспортного університету»  
ORCID: 0000-0001-8424-7518

## ВПЛИВ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВ НА МОРЕХІДНІСТЬ СУДНА: КРИТЕРІЇ БЕЗПЕКИ ТА АЛГОРИТМ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

У статті виконано комплексний аналіз впливу гідрометеорологічних умов на морехідність судна з позицій забезпечення безпеки мореплавства. Актуальність дослідження зумовлена тим, що, за даними Європейського агентства з морської безпеки, несприятливі погодні умови є сприяючим фактором значної частки морських аварій та інцидентів, при цьому людський елемент пов'язаний із понад 80 % розслідуваних випадків. Систематизовано основні гідрометеорологічні фактори, що впливають на морехідні якості судна: вітер, вітрове хвилювання, зиб, морські течії, обмежена видимість та обледеніння. Для кожного фактора визначено механізм впливу на параметри морехідності – остійність, качку, заливання палуби, слемінг та втрату швидкості. Проаналізовано п'ять режимів втрати остійності, визначених Тимчасовими настановами ІМО щодо критеріїв остійності другого покоління (MSC.1/Circ.1627): втрата остійності на хвилі, параметричний резонанс крену, серфінг та брочинг, надмірні прискорення та мертво судно. Виконано систематизацію критеріїв безпеки з документів ІМО (MSC.1/Circ.1228, IS Code 2008, MSC.1/Circ.1627) та розроблено алгоритм прийняття рішень вахтовим помічником капітана при погіршенні гідрометеорологічних умов у контексті управління ресурсами навігаційного містка). Запропоновано формалізовану матрицю оцінки навігаційного ризику, що інтегрує індекс метеорологічної небезпеки та індекс вразливості судна з визначенням чотирьох рівнів ризику та конкретних рекомендованих дій для кожного рівня. Окремо розглянуто специфіку гідрометеорологічних умов Чорноморського басейну, зокрема короткоперіодне хвилювання з крутими фронтами, явище бори та сезонність штормової діяльності. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення програм підготовки судноводіїв та розробки систем підтримки прийняття рішень на навігаційному містку.

**Ключові слова:** морехідність судна, гідрометеорологічні умови, остійність, критерії остійності другого покоління, управління ресурсами містка, оцінка ризику, алгоритм прийняття рішень, ІМО.



A. P. SHEVCHENKO

PhD in Specialty 271 “River and Maritime Transport”,  
Senior Lecturer at the Department of Navigation and Operation  
of Technical Systems in Water Transport  
Separated Structural Unit “Danube Institute of Water Transport  
of National Transport University”  
ORCID: 0009-0003-5878-6771

I. V. TROFYMENKO

Candidate of Technical Sciences,  
Senior Lecturer at the Department of Navigation and Operation  
of Technical Systems in Water Transport  
Separated Structural Unit “Danube Institute of Water Transport  
of National Transport University”  
ORCID: 000-0002-0919-2948

N. S. URUM

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,  
Acting Head of the Department of Natural Sciences, Mathematics  
and Engineering Disciplines  
Separated Structural Unit “Danube Institute of Water Transport  
of National Transport University”  
ORCID: 0000-0003-2493-9314

A. O. TROFYMENKO

PhD in Specialty 271 “River and Maritime Transport”,  
Associate Professor at the Department of Navigation and Operation  
of Technical Systems in Water Transport  
Separated Structural Unit “Danube Institute of Water Transport  
of National Transport University”  
ORCID: 0000-0001-8424-7518

## INFLUENCE OF HYDROMETEOROLOGICAL CONDITIONS ON SHIP SEAWORTHINESS: SAFETY CRITERIA AND DECISION-MAKING ALGORITHM

*This article presents a comprehensive analysis of the influence of hydrometeorological conditions on ship seaworthiness from the perspective of ensuring navigation safety. The relevance of the research is determined by the fact that, according to the European Maritime Safety Agency (EMSA), adverse weather conditions are a contributing factor to a significant proportion of marine casualties and incidents, while the human element is associated with over 80 % of investigated cases. The main hydrometeorological factors affecting ship seaworthiness are systematised: wind, wind waves, swell, sea currents, restricted visibility and icing. For each factor, the mechanism of influence on seaworthiness parameters is identified – stability, rolling, deck wetness, slamming and speed loss. Five stability failure modes defined by the IMO Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability Criteria (MSC.1/Circ.1627) are analysed: pure loss of stability, parametric rolling, surf-riding/broaching, excessive acceleration and dead ship condition. A systematisation of safety criteria from IMO documents (MSC.1/Circ.1228, IS Code 2008, MSC.1/Circ.1627) is performed, and a decision-making algorithm for the officer of the watch under deteriorating hydrometeorological conditions is developed within the context of Bridge Resource Management (BRM). A formalised navigational risk assessment matrix is proposed, integrating the meteorological hazard index and the ship vulnerability index with four risk levels and specific recommended actions for each level. The specific hydrometeorological conditions of the Black Sea basin are separately considered, including short-period waves with steep fronts, the bora phenomenon and seasonal storm patterns. The results of the study can be used to improve seafarer training programmes and to develop decision support systems for the navigational bridge.*

**Key words:** ship seaworthiness, hydrometeorological conditions, stability, second generation intact stability criteria, bridge resource management, risk assessment, decision-making algorithm, IMO.

### Постановка проблеми

Безпека мореплавства значною мірою визначається здатністю судна зберігати морехідні якості в реальних гідрометеорологічних умовах. За даними Європейського агентства з морської безпеки (EMSA), протягом 2014–2023 років зареєстровано 26 595 морських аварій та інцидентів у водах Європейського Союзу, з яких людський елемент пов'язаний із 80,1 % розслідуваних випадків [1]. Значна частка цих аварій обумовлена неправильними діями екіпажу в складних погодних умовах: невчасною зміною курсу або швидкості, неврахуванням прогнозу погоди, помилками в оцінці остійності судна на хвилюванні.

Міжнародна морська організація (далі – ІМО) приділяє особливу увагу проблемі безпеки судна у несприятливих погодних умовах. Циркуляр MSC.1/Circ.1228 (2007) надає переглянуте керівництво капітану щодо уникнення небезпечних ситуацій у складних гідрометеорологічних умовах [2]. У 2020 році схвалено Тимчасові настанови щодо критеріїв остійності другого покоління (MSC.1/Circ.1627), що вперше формалізують оцінку п'яти динамічних режимів втрати остійності на хвилюванні [3]. Конвенція ПДНВ у редакції Манільських поправок (далі – STCW) включає вимоги до компетенцій з управління ресурсами містка (Bridge Resource Management, далі – BRM), що передбачають прийняття обґрунтованих рішень на основі всієї доступної інформації, включаючи метеорологічну [4].

Водночас залишається недостатньо систематизованим комплексний аналіз, який об'єднав би гідрометеорологічні фактори, їх вплив на конкретні параметри морехідності, сучасні критерії безпеки ІМО та алгоритм прийняття навігаційних рішень в єдину структуровану систему. Це визначає актуальність та практичну значущість дослідження.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вплив гідрометеорологічних умов на безпеку мореплавства досліджується в декількох напрямках. Фундаментальні питання остійності судна на хвилюванні висвітлено в роботах Faltinsen (1990) [5], де детально описано гідродинамічну взаємодію судна з хвилями, Rawson та Tupper (2001) [6], де розглянуто морехідні якості з позицій суднобудування.

Критерії остійності другого покоління, затверджені ІМО у формі MSC.1/Circ.1627, є результатом майже двадцятирічного міжнародного дослідження. Peters et al. (2022) надали детальний огляд цих критеріїв та їх практичне застосування [7]. Begovic et al. (2023) дослідили спрощені операційні настанови для запобігання параметричному крену на основі критеріїв другого покоління [8].

У контексті прийняття навігаційних рішень важливим є циркуляр ІМО MSC.1/Circ.1228, який визначає чотири основні небезпечні явища для судна на хвилюванні: серфінг та брочинг, параметричний крен, втрату остійності при проходженні гребеня хвилі та надмірні прискорення [2]. Практичне керівництво MAN Energy Solutions (2023) надає дані щодо втрати швидкості судна в залежності від стану моря та курсового кута хвилі [9].

Серед вітчизняних досліджень слід відзначити роботу Л. Л. Пліти та співавторів (2024) з питань організації ходової навігаційної вахти та прийняття рішень на навігаційному містку [10], а також дослідження Н. С. Урум та співавторів (2025) щодо ролі комунікативних навичок в системі управління ресурсами містка [11]. А. П. Шевченко та співавтори (2025) проаналізували проблеми підготовки моряків на тлі впровадження сучасних інформаційних технологій на морському транспорті [12].

### Невирішені раніше частини загальної проблеми

Попри значний обсяг досліджень окремих аспектів проблеми, залишається несистематизованим комплексний аналіз, що пов'язує гідрометеорологічні фактори з конкретними параметрами морехідності та критеріями ІМО, а також відсутній формалізований алгоритм прийняття рішень вахтовим помічником, що інтегрує метеорологічну інформацію з оцінкою морехідності в контексті BRM.

### Формулювання мети дослідження

Метою статті є комплексний аналіз впливу гідрометеорологічних умов на морехідність судна та розробка алгоритму прийняття навігаційних рішень для забезпечення безпеки мореплавства. Для досягнення поставленої мети передбачено систематизувати основні гідрометеорологічні фактори та визначити характер їх впливу на параметри морехідності судна. Водночас проаналізовано критерії безпеки, закріплені у відповідних документах ІМО, що стало основою для розробки алгоритму прийняття рішень вахтовим помічником капітана при погіршенні гідрометеорологічної обстановки. Окрім того, запропоновано матрицю оцінки навігаційного ризику, призначену для підтримки обґрунтованих рішень щодо вибору курсу та швидкості в умовах несприятливої погоди.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Гідрометеорологічні умови впливають на морехідність судна через комплекс фізичних механізмів. Основними факторами є: вітер, вітрове хвилювання, зиб (мертва хвиля), морські течії, обмежена видимість (туман, опади) та обледеніння. Кожен фактор має специфічний механізм впливу на параметри морехідності.

Вітер створює аеродинамічний тиск на надводну частину судна, що спричиняє крен, дрейф та вітровий момент. Вітрова сила на надводну частину судна визначається залежністю [5]:

$$F_w = 0,5 \times \rho_a \times C_w \times A_L \times V_w^2, \quad (1)$$

де  $\rho_a$  – густина повітря (1,226 кг/м<sup>3</sup> при стандартних умовах);  $C_w$  – аеродинамічний коефіцієнт (1,0–1,3 залежно від обводів надбудови);  $A_L$  – площа бокової парусності (м<sup>2</sup>);  $V_w$  – швидкість вітру відносно судна (м/с). Вітровий кренячий момент:

$$M_w = F_w \times z_w, \quad (2)$$

де  $z_w$  – плече вітрового тиску – вертикальна відстань від центру бокової парусності до центру бокового опору підводної частини корпусу. Критерій погоди (weather criterion) згідно з IS Code 2008 визначає мінімальне

співвідношення між площею діаграми відновлювальних моментів та площею під кривою кренячих моментів від вітру [13].

Хвилювання є найбільш суттєвим фактором впливу на морехідність. Параметри хвилювання визначаються швидкістю вітру, його тривалістю та розгоном (fetch). Значна висота хвиль  $H_s$  пов'язана зі швидкістю вітру емпіричною залежністю Шулейкіна [14]:

$$H_s = 0,022 \times V_w^2 \text{ (при повністю розвиненому хвилюванні),} \tag{3}$$

де  $V_w$  – швидкість вітру на висоті 10 м (м/с). Період хвиль  $T_w$  та довжина хвилі  $\lambda$  пов'язані з глибоководним хвилюванням:

$$\lambda = (g \times T_w^2)/(2\pi) \approx 1,56 \times T_w^2, \tag{4}$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння (9,81 м/с<sup>2</sup>). Період зустрічі з хвилею, що є ключовим параметром для оцінки небезпечних режимів, визначається:

$$T_e = T_w / |1 - (\omega_w \times V_s \times \cos \alpha) / g|, \tag{5}$$

де  $\omega_w = 2\pi/T_w$  – кутова частота хвилі;  $V_s$  – швидкість судна;  $\alpha$  – курсовий кут хвилі (0° – попутні хвилі, 180° – зустрічні). Для попутних та кормових хвиль  $T_e$  зростає і може наближатися до власного періоду крену судна  $T_\phi$ , що створює умови для резонансу.

Таблиця 1

**Гідрометеорологічні фактори та їх вплив на параметри морехідності**

Фактор	Параметр морехідності	Механізм впливу	Критичні значення
Вітер	Остійність, дрейф	Аеродинамічний тиск на надбудову	$\geq 7$ балів за Бофортом (14–17 м/с)
Вітрове хвилювання	Качка, заливання, слемінг	Хвильове збудження, резонанс	$H_s \geq 4$ м, $T_e \approx T_\phi$
Зиб (swell)	Бортова качка, параметричний крен	Довгоперіодне хвильове збудження	$\lambda/L \approx 1,0-2,0$
Морські течії	Швидкість, керованість	Зміна відносної швидкості і курсу	$V_{течії} > 2$ вузлів
Обмежена видимість	Безпека навігації	Неможливість візуального спостереження	Видимість < 2 милі
Обледеніння	Остійність	Зростання ваги та зміщення ЦВ вгору	$T_{повітря} < -2$ °С, бризки

Тимчасові настанови ІМО MSC.1/Circ.1627 (2020) визначають п'ять режимів динамічної втрати остійності на хвилюванні, що доповнюють класичні критерії IS Code 2008 [3]. На відміну від традиційних критеріїв, що оцінюють остійність у спокійній воді, критерії другого покоління враховують динамічну взаємодію судна з хвилями. Для кожного режиму передбачено тривірневу оцінку: Level 1 (спрощена перевірка), Level 2 (деталізована оцінка) та Direct Stability Assessment (пряме моделювання).

Чиста втрата остійності виникає, коли гребінь довгої хвилі знаходиться під міделем судна, а носова та кормова частини – над западинами. При цьому ватерлінія в середній частині розширюється, а в крайніх – звужується, що може призвести до суттєвого зменшення метацентричної висоти GM. Умова безпеки:

$$\lambda \approx L_{pp} \text{ та } GM_{хвиля} < GM_{min}, \tag{6}$$

де  $L_{pp}$  – довжина судна між перпендикулярами;  $GM_{хвиля}$  – метацентрична висота при проходженні гребеня хвилі;  $GM_{min}$  – мінімально допустиме значення. Цей режим найбільш небезпечний для суден із малим відношенням В/d (ширина/осадка) при попутному та кормово-четвертному хвилюванні [3].

Параметричний крен виникає при періодичній зміні відновлювального моменту внаслідок проходження хвиль уздовж корпусу. Резонанс має місце при:

$$T_e \approx T_\phi/2 \text{ (головний параметричний резонанс),} \tag{7}$$

або  $T_e \approx T_\phi$  (основний резонанс). Параметричний крен може розвиватися як у попутних, так і в зустрічних хвилях. Амплітуда крену може досягати 30–40° і більше, що загрожує зміщенням вантажу та перекиданням. Особливо вразливі контейнеровози з великими розтинами палуб та значним флером шпангоутів [7].

Серфінг – захоплення судна попутною хвилею, коли швидкість судна наближається до фазової швидкості хвилі:

$$V_s \approx c_w = \lambda/T_w = g \times T_w/(2\pi). \tag{8}$$

При серфінгу судно втрачає керованість через зменшення ефективності руля, що може призвести до броунингу – мимовільного розвороту лагом до хвилі з подальшим перекиданням. Найбільш небезпечний для суден з великим числом Фруда ( $Fr > 0,3$ ) при  $\lambda/L \approx 1,0-1,5$  [2].

Великі кутові прискорення при бортовій качці створюють небезпечні навантаження на екіпаж, пасажирів та вантаж. Латеральне прискорення на висоті  $z$  від осі крену:

$$a_{lat}(z) = z \times \varphi_{max} \times (2\pi/T_{\varphi})^2, \tag{9}$$

де  $\varphi_{max}$  – максимальна амплітуда крену (рад);  $T_{\varphi}$  – період вільного крену. Критичне значення латерального прискорення – 4,0–4,5 м/с<sup>2</sup> для безпеки людей та 7–9 м/с<sup>2</sup> для кріплення вантажу [3]. Судна з малим  $T_{\varphi}$  (жорстке судно) та великою метацентричною висотою GM більш вразливі.

Мертве судно – це стан, коли судно втратило хід та перебуває лагом до хвилі й вітру. Оцінюється здатність судна протистояти одночасному впливу вітрового кренячого моменту та бортової хвильової качки без перекидання. IS Code 2008 (критерій погоди) вимагає [13]:

$$b/a \geq 1,0, \tag{10}$$

де  $b$  – площа під кривою відновлювальних плечей;  $a$  – площа під кривою плечей вітрового кренячого моменту. Критерій другого покоління доповнюють цю оцінку врахуванням нерегулярного хвилювання.

Таблиця 2

**Режими втрати остійності та умови їх виникнення**

Режим	Курс хвилі	Умова резонансу	Вразливі судна	Посил.
Чиста втрата остійності	Попутний, кормово-четв.	$\lambda \approx L, GM \downarrow$ на гребені	Контейнеровози, ро-ро	§2.4
Параметричний крен	Попутний та зустрічний	$T_e \approx T_{\varphi}/2$	Контейнеровози, великі судна	§2.5
Серфінг/броучинг	Попутний	$V_s \approx c^w, Fr \geq 0,3$	Малі швидкохідні судна	§2.6
Надмірні прискорення	Борт., борт.-четв.	$T_e \approx T_{\varphi}$ , великий GM	Пасажирські, круїзні	§2.3
Мертве судно	Лагом (дрейф)	Вітер + хвилі одночасно	Всі типи	–

Хвилювання спричиняє додатковий опір руху судна, що призводить до втрати швидкості. Додатковий опір у хвилях складається з двох компонентів: опір від відбиття хвиль та опір від добавленого руху. Загальна формула додаткового опору в регулярних хвилях [5]:

$$R_{aw} = \rho_w \times g \times B^2 \times H_w^2/L \times f(\omega_e, \alpha), \tag{11}$$

де  $\rho_w$  – густина морської води;  $B$  – ширина судна;  $H_w$  – висота хвилі;  $L$  – довжина судна;  $f(\omega_e, \alpha)$  – функція, що залежить від частоти зустрічі та курсового кута хвилі. Відносна втрата швидкості залежить від стану моря та курсового кута. Емпірична залежність:

$$\Delta V/V_0 = k_1 \times (H_s/L)^{k_2} \times f(\alpha) \tag{12}$$

де  $V_0$  – швидкість на тихій воді;  $k_1, k_2$  – емпіричні коефіцієнти, що залежать від типу судна;  $f(\alpha)$  – функція курсового кута (максимальна втрата при зустрічних хвилях  $\alpha = 180^\circ$ ). За даними практики [9], типова втрата швидкості для вантажного судна: при Бофорт 5 ( $H_s \approx 2,5$  м) – 5–10 %; при Бофорт 7 ( $H_s \approx 5$  м) – 20–40 %; при Бофорт 9 ( $H_s \approx 9$  м) – 50–70 %.

Заливання палуби (green water on deck) відбувається, коли борт судна занурюється нижче рівня хвилі. Критерій заливання:

$$f_b < H_s \times k_f(\alpha, L/\lambda) \tag{13}$$

де  $f_b$  – надводний борт;  $k_f$  – коефіцієнт, що залежить від курсового кута та співвідношення довжин. Заливання палуби створює додаткове навантаження на палубний вантаж, люкові закриття та палубне обладнання, а також загрозу для екіпажу [2].

Слемінг (slamming) – удар днища носової частини об воду при виході з хвилі. Умова слемінгу:

$$d_{nos} < H_s \times k_s \quad \text{та} \quad V_{верт} > V_{crit}, \tag{14}$$

де  $d_{nos}$  – осадка носом;  $k_s$  – коефіцієнт;  $V_{верт}$  – вертикальна швидкість носової частини;  $V_{crit}$  – критична швидкість (зазвичай 3–5 м/с). Слемінг може призвести до пошкодження корпусних конструкцій та вимагає зниження швидкості або зміни курсу.

Для підтримки прийняття навігаційних рішень пропонується формалізована матриця оцінки ризику, що інтегрує метеорологічні параметри з характеристиками судна. Згідно з Формалізованою оцінкою безпеки ІМО (FSA, MSC/Circ.1023), ризик визначається як комбінація ймовірності небезпечної події та її наслідків [15]:

$$R = P \times C, \tag{15}$$

де  $R$  – рівень ризику;  $P$  – ймовірність (likelihood);  $C$  – тяжкість наслідків (consequence). Для оцінки ризику при погіршенні погодних умов пропонується використовувати індекс метеорологічної небезпеки  $I_{met}$  та індекс вразливості судна  $I_{ship}$ .

Індекс метеорологічної небезпеки визначається на основі прогнозованих параметрів:

$$I_{met} = w_1 \times S_{вітер} + w_2 \times S_{хвиля} + w_3 \times S_{видим} + w_4 \times S_{облед}, \quad (16)$$

де  $S_i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$  – бальна оцінка кожного фактора за п'ятибальною шкалою;  $w_i$  – вагові коефіцієнти ( $w_1 = 0,25$ ;  $w_2 = 0,40$ ;  $w_3 = 0,20$ ;  $w_4 = 0,15$ ). Хвилювання має найбільшу вагу, оскільки безпосередньо впливає на остійність та морехідність.

Таблиця 3

## Шкала бальної оцінки гідрометеорологічних факторів

Бал	Вітер (Бофорт)	Хвилювання H,	Видимість	Обледеніння
1	0–4 (до 7 м/с)	≤ 1,5 м	> 5 миль	Немає ризику
2	5 (8–11 м/с)	1,5–2,5 м	2–5 миль	Незначний
3	6–7 (11–17 м/с)	2,5–4,0 м	1–2 милі	Помірний
4	8–9 (17–24 м/с)	4,0–7,0 м	0,5–1 миля	Значний
5	≥ 10 (>24 м/с)	> 7,0 м	≤ 0,5 милі	Сильне

Індекс вразливості судна враховує конструктивні та завантажувальні параметри:

$$I_{ship} = f(GM, T_{\phi}, f_b, L/\lambda, Fr, \text{тип вантажу}) \quad (17)$$

Практична оцінка  $I_{ship}$  базується на перевірці відповідності параметрів завантаження критеріям IS Code та аналізу чутливості до кожного з п'яти режимів втрати остійності. Комплексний ризик:

$$R_{nav} = I_{met} \times I_{ship}. \quad (18)$$

Таблиця 4

## Матриця навігаційного ризику та рекомендовані дії

$R_{nav}$	$I_{met}$	$I_{ship}$	Рівень ризику	Рекомендовані дії
1–4	1–2	1–2	Низький	Звичайне спостереження, оновлення прогнозу
5–9	2–3	2–3	Помірний	Посилене спостереження, перевірка кріплення вантажу, оцінка остійності
10–16	3–4	3–4	Високий	Зміна курсу/швидкості, доповідь капітану, підготовка плану дій
17–25	4–5	4–5	Критичний	Негайна зміна маршруту, штормування, сповіщення компанії

На основі проведеного аналізу розроблено формалізований алгоритм прийняття рішень вахтовим помічником капітана при погіршенні гідрометеорологічних умов. Алгоритм інтегрує вимоги IMO (MSC.1/Circ.1228, IS Code, STCW) з принципами BRM та формалізованою оцінкою ризику.

На першому етапі вахтовий помічник безперервно відстежує гідрометеорологічну обстановку за допомогою: бортових метеорологічних приладів (анемометр, барометр, термометр); NAVTEX – прийом штормових попереджень та прогнозів; карт погоди (факсимільних та цифрових); візуального спостереження за станом моря (оцінка періоду хвиль за MSC.1/Circ.1228 з використанням секундоміра) [2]. При виявленні тенденції до погіршення умов (падіння тиску > 3 гПа/3 год, посилення вітру, зростання хвилювання) переходить до етапу 2, під час якого визначається індекс метеорологічної небезпеки  $I_{met}$  за формулою (16) на основі поточних та прогнозованих умов. Оцінюється вразливість судна  $I_{ship}$  з урахуванням поточного стану завантаження (GM, осадка, надводний борт). Розраховується комплексний ризик  $R_{nav}$ . Перевіряються умови виникнення небезпечних режимів згідно з MSC.1/Circ.1228: порівнюється  $\lambda/L$ ,  $T_e/T_{\phi}$ ,  $V_{s/c}_w$  з критичними значеннями [2]. При  $R_{nav} \geq 10$  (високий ризик) – перехід до Етапу 3.

Третій етап – планування дій. Відповідно до принципів BRM, вахтовий помічник: інформує капітана про ситуацію та оцінку ризику; формулює варіанти дій (зміна курсу, зниження швидкості, комбінація, штормування); оцінює наслідки кожного варіанту (вплив на розклад, витрату палива, комфорт екіпажу та безпеку); обирає оптимальний варіант за критерієм мінімального ризику [10]. Рекомендації MSC.1/Circ.1228 щодо уникнення небезпечних зон на полярній діаграмі «курс – швидкість» є основою для вибору безпечного режиму [2].

На четвертому етапі прийняте рішення виконується з дотриманням процедур BRM: чітка комунікація на містку (closed-loop communication); розподіл обов'язків (lookout, радар, ECDIS); документування дій у судовому журналі; безперервний моніторинг ефективності прийнятих заходів [11].

П'ятий етап передбачає, що після стабілізації обстановки або зміни умов відбувається повернення до етапу 1. Якщо прийняті заходи не забезпечують зниження ризику до прийнятного рівня – ескалація (перехід до більш радикальних заходів, сповіщення берегових служб).

Управління ресурсами навігаційного містка (Bridge Resource Management, BRM) – це комплекс принципів та процедур ефективного використання всіх наявних ресурсів (людських, технічних, інформаційних) для

забезпечення безпечного плавання. Конвенція STCW (Таблиці А-II/1 та А-II/2) включає BRM як обов'язкову компетенцію для вахтових помічників та капітанів [4]. У контексті прийняття рішень при погіршенні погодних умов BRM має особливе значення, оскільки помилки в оцінці ситуації та прийнятті рішень є основною причиною аварій, пов'язаних з погодою.

Ключові принципи BRM у контексті метеорологічної безпеки включають: ситуаційну обізнаність – безперервний моніторинг метеообстановки з використанням усіх доступних джерел; розподіл робочого навантаження – при погіршенні умов кількість задач на містку зростає (спостереження, розрахунки, зв'язок, маневрування), що потребує залучення додаткового персоналу; закриття комунікацію – однозначне підтвердження отриманих команд та інформації; асертивність – здатність молодших офіцерів повідомляти про сумніви щодо безпеки, навіть якщо це суперечить рішенню капітана [11].

Практичні рекомендації щодо організації роботи на містку при очікуваному погіршенні метеоумов: завчасно оновити метеорологічний прогноз з усіх доступних джерел (NAVTEX, GMDSS, супутникові дані, погодний роутинг); перевірити стан завантаження судна та відповідність критеріям остійності IS Code; оцінити параметри хвилювання (період, довжину, напрямок) та порівняти з характеристиками судна ( $L$ ,  $T_{\phi}$ ,  $GM$ ); визначити небезпечні зони на полярній діаграмі за MSC.1/Circ.1228; підготувати план дій для різних сценаріїв розвитку ситуації; забезпечити кріплення вантажу та готовність водонепроникних закриттів [12].

Реалізація зазначених рекомендацій потребує врахування регіональної специфіки акваторії, в якій здійснюється плавання. Зокрема, гідрометеорологічні умови Чорноморського басейну мають низку характерних особливостей, що суттєво впливають на безпеку судноплавства. Середня глибина моря становить 1 240 м, максимальна – 2 210 м. Обмежені розміри басейну (довжина близько 1 150 км, ширина до 580 км) зумовлюють відносно короткі хвилі з крутими фронтами, що особливо небезпечно для слемінгу та параметричного крену.

Штормова діяльність має виражену сезонність: найбільша повторюваність штормів спостерігається у листопаді–березні. Переважаючі вітри – північно-східного та південно-західного напрямків. Специфічним явищем є бора – різкий холодний вітер, що досягає швидкості 40–50 м/с у Новоросійській бухті та на узбережжі Кавказу. Бора виникає раптово і може створити надзвичайно небезпечні умови для суден на рейді та при вході до порту.

Максимальна висота хвиль у Чорному морі може досягати 7–8 м (в окремих випадках до 11 м у відкритій частині), що є суттєвим для суден малого та середнього тоннажу. Період хвиль зазвичай не перевищує 8–10 с, що відрізняється від океанського хвилювання з періодами 12–18 с. Це означає, що в Чорному морі судна частіше зустрічаються з крутими, короткими хвилями, які створюють більші навантаження на корпус при тій самій висоті [14].

Обледеніння є серйозним фактором ризику для суден у північній частині Чорного моря (Азовське море, протоки) у зимовий період. При температурі повітря нижче  $-2$  °C та швидкості вітру понад 10 м/с бризкове обледеніння може призвести до значного збільшення ваги надбудови та зміщення центру ваги вгору, що критично знижує остійність, особливо для малих суден [16].

### Висновки

Проведений комплексний аналіз впливу гідрометеорологічних умов на морехідність судна дозволяє сформулювати такі висновки.

1. Систематизовано основні гідрометеорологічні фактори (вітер, хвилювання, зиб, течії, обмежена видимість, обледеніння) та визначено механізми їх впливу на параметри морехідності. Хвилювання є найбільш суттєвим фактором, оскільки безпосередньо впливає на остійність, качку, заливання палуби та слемінг. Для кожного фактора наведено кількісні критерії безпеки.

2. Проаналізовано п'ять режимів динамічної втрати остійності відповідно до критеріїв другого покоління ІМО (MSC.1/Circ.1627): чиста втрата остійності, параметричний крен, серфінг та брочинг, надмірні прискорення та мертве судно. Для кожного режиму визначено умови виникнення, типи вразливих суден та відповідні документи ІМО. Ці критерії суттєво доповнюють класичні вимоги IS Code 2008, оскільки враховують динамічну взаємодію судна з хвилями.

3. Запропоновано формалізовану матрицю оцінки навігаційного ризику, що інтегрує індекс метеорологічної безпеки та індекс вразливості судна. Матриця визначає чотири рівні ризику (низький, помірний, високий, критичний) з конкретними рекомендованими діями для кожного рівня, що забезпечує обґрунтованість навігаційних рішень.

4. Розроблено п'ятиетапний алгоритм прийняття рішень вахтовим помічником капітана при погіршенні гідрометеорологічних умов (моніторинг – оцінка ризику – планування – виконання – перегляд), що інтегрує вимоги ІМО з принципами управління ресурсами навігаційного містка (BRM).

Подальші дослідження доцільно спрямувати у кількох напрямках. По-перше, необхідною є експериментальна апробація запропонованого алгоритму прийняття рішень в умовах навігаційних тренажерних комплексів із моделюванням різних сценаріїв погіршення гідрометеорологічної обстановки. По-друге, практичне впровадження потребує створення відповідного програмного модуля для автоматизованого обчислення індексів метеорологічного ризику та вразливості судна в режимі реального часу. Окремим перспективним завданням є інтеграція

розробленої матриці навігаційного ризику із системами електронної картографії (ECDIS), що дозволить вахтовому помічнику капітана отримувати візуалізовані рекомендації безпосередньо на електронній карті. Крім того, подальшого вивчення потребує адаптація запропонованої методики до різних типів суден з урахуванням їх конструктивних особливостей та умов експлуатації.

#### Список використаної літератури

1. EMSA. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2024. Lisbon : European Maritime Safety Agency, 2024. 66 p.
2. IMO. MSC.1/Circ.1228. Revised Guidance to the Master for Avoiding Dangerous Situations in Adverse Weather and Sea Conditions. London : International Maritime Organization, 2007. 8 p.
3. IMO. MSC.1/Circ.1627. Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability Criteria. London : International Maritime Organization, 2020. 60 p.
4. IMO. STCW Convention and STCW Code, 2017 Consolidated Edition. London : International Maritime Organization, 2017. 432 p.
5. Faltinsen O. M. *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge : Cambridge University Press, 1990. 328 p.
6. Rawson K. J., Tupper E. C. *Basic Ship Theory*. 5th ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2001. Vol. 2. 727 p.
7. Peters W., Belenky V., Bassler C., Spyrou K., Umeda N., Bulian G., Altmayer B. The Second Generation Intact Stability Criteria: An Overview of Development. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, No. 1. Article 41. <https://doi.org/10.3390/jmse10010041>
8. Begovic E., Bertorello C., Boccadamo G., Rinauro B. Simplified operational guidance for second generation intact stability criteria. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 270. Article 113584. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113584>
9. MAN Energy Solutions. Basic Principles of Ship Propulsion. Copenhagen : MAN Energy Solutions, 2023. 96 p.
10. Пліта М. М., Шевченко А. П., Урум Н. С., Лісовський С. В. Організація ходової навігаційної вахти на морському транспорті. *Водний транспорт*. 2024. № 2, Вип. (40). С. 109–116.
11. Урум Н. С., Chufarlicheva A. L., Shtrybets V. V., Lisovskyi S. V. Communication as an important element of Bridge Resource Management on sea transport. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36(75), № 1. С. 375–381.
12. Шевченко А. П., Якусевич Ю. Г., Дорофєєва З. Я., Тришин В. В. Деякі проблеми підготовки моряків на тлі впровадження сучасних інформаційних технологій на морському транспорті. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36(75), № 1. С. 382–388.
13. IMO. International Code on Intact Stability, 2008 (2008 IS Code). Res. MSC.267(85). London : International Maritime Organization, 2008. 100 p.
14. Доронін Ю. П. *Морська гідрометеорологія*. Київ : Вища школа, 2009. 340 с.
15. IMO. MSC/Circ.1023. Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. London : International Maritime Organization, 2002. 68 p.
16. WMO. Guide to Marine Meteorological Services. WMO-No. 471. Geneva : World Meteorological Organization, 2018. 206 p.
17. SOLAS. International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, Consolidated Edition 2020. London : International Maritime Organization, 2020. 586 p.
18. Kobylinski L., Kastner S. *Stability and Safety of Ships: Regulation and Operation*. Amsterdam : Elsevier, 2003. 458 p.
19. Шевченко А. П., Якусевич Ю. Г., Дорофєєва З. Я., Дакі О. А. Оптимізація логістичного ланцюга в контексті забезпечення безпеки мореплавства. *Водний транспорт*. 2024. № 2, Вип. (40). С. 117–124.
20. Ventikos N. P., Louzis K., Koimtzoglou A. The human element as a risk factor in the maritime domain: A review. *Maritime Policy & Management*. 2023. Vol. 50, No. 5. P. 539–566. <https://doi.org/10.1080/03088839.2022.2044792>

#### References

1. EMSA (2024). *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2024*. Lisbon : European Maritime Safety Agency.
2. IMO (2007). *MSC.1/Circ.1228. Revised Guidance to the Master for Avoiding Dangerous Situations in Adverse Weather and Sea Conditions*. London : International Maritime Organization.
3. IMO (2020). *MSC.1/Circ.1627. Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability Criteria*. London : International Maritime Organization.
4. IMO (2017). *STCW Convention and STCW Code, 2017 Consolidated Edition*. London : International Maritime Organization.
5. Faltinsen, O. M. (1990). *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge: Cambridge University Press.
6. Rawson, K. J., & Tupper, E. C. (2001). *Basic Ship Theory* (5th ed., Vol. 2). Oxford : Butterworth-Heinemann.

7. Peters, W., Belenky, V., Bassler, C., Spyrou, K., Umeda, N., Bulian, G., & Altmayer, B. (2022). The Second Generation Intact Stability Criteria: An Overview of Development. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(1), 41. <https://doi.org/10.3390/jmse10010041>
8. Begovic, E., Bertorello, C., Boccadamo, G., & Rinauro, B. (2023). Simplified operational guidance for second generation intact stability criteria. *Ocean Engineering*, 270, 113584. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113584>
9. MAN Energy Solutions (2023). *Basic Principles of Ship Propulsion*. Copenhagen: MAN Energy Solutions.
10. Plita, M. M., Shevchenko, A. P., Urum, N. S., & Lisovskyi, S. V. (2024). Orhanizatsiia khodovoi navhatsiinoi vakhty na morskomu transporti [Organisation of navigational watch on maritime transport]. *Vodnyi transport*, 2(40), 109–116.
11. Urum, N. S., Chufarlicheva, A. L., Shtrybets, V. V., & Lisovskyi, S. V. (2025). Communication as an important element of Bridge Resource Management on sea transport. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky*, 36(75), 1, 375–381.
12. Shevchenko, A. P., Yakusevych, Yu. H., Dorofieieva, Z. Ya., & Tryshyn, V. V. (2025). Deiaki problemy pidgotovky moriakiv na tli vprovadzhennia suchasnykh informatsiinykh tekhnolohii na morskomu transporti [Some problems of seafarers training in the context of modern IT]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky*, 36(75), 1, 382–388.
13. IMO (2008). *International Code on Intact Stability, 2008 (2008 IS Code)*. Res. MSC.267(85). London : International Maritime Organization.
14. Doronin, Yu. P. (2009). *Morska hidrometeorolohiia* [Marine hydrometeorology]. Kyiv : Vyshcha shkola.
15. IMO (2002). *MSC/Circ.1023. Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA)*. London : International Maritime Organization.
16. WMO (2018). *Guide to Marine Meteorological Services*. WMO-No. 471. Geneva : World Meteorological Organization.
17. IMO (2020). *SOLAS: International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, Consolidated Edition 2020*. London : International Maritime Organization
18. Kobylinski, L., & Kastner, S. (2003). *Stability and Safety of Ships: Regulation and Operation*. Amsterdam : Elsevier.
19. Shevchenko, A. P., Yakusevych, Yu. H., Dorofieieva, Z. Ya., & Daki, O. A. (2024). Optymizatsiia lohistychnoho lantsiuha v konteksti zabezpechennia bezpeky moreplavstva [Logistics chain optimization in the context of maritime safety]. *Vodnyi transport*, 2(40), 117–124.
20. Ventikos, N. P., Louzis, K., & Koimtzoglou, A. (2023). The human element as a risk factor in the maritime domain: A review. *Maritime Policy & Management*, 50(5), 539–566. <https://doi.org/10.1080/03088839.2022.2044792>

Дата першого надходження статті до видання: 15.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026