

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ПЛАВАННЯ СУДНА НА ХВИЛЮВАННІ

Корніюк В. Я.

викладач кафедри кораблеводіння та штурманського озброєння
Інституту Військово-Морських Сил
Національного університету «Одеська морська академія»
ORCID ID: 0000-0003-4373-5237

Кубіцький Р. О.

старший викладач кафедри кораблеводіння та штурманського озброєння
Інституту Військово-Морських Сил
Національного університету «Одеська морська академія»
ORCID ID: 0009-0007-9077-6185

Буга А. О.

старший викладач кафедри кораблеводіння та штурманського озброєння
Інституту Військово-Морських Сил
Національного університету «Одеська морська академія»
ORCID ID: 0009-0006-8322-7252

Москаленко К. С.

викладач кафедри кораблеводіння та штурманського озброєння
Інституту Військово-Морських Сил
Національного університету «Одеська морська академія»
ORCID ID: 0009-0008-6908-1300

У статті розглянуто питання негативного впливу хвилювання на безпеку плавання судна. Проаналізовано небезпечний вплив сильного хвилювання, хвилювання у поєднанні з вітром, а також додаткових небезпечних явищ, що виникають у результаті сильного хвилювання, на корпус, суднові пристрої та механізми, остійність, ходові та маневрені характеристики судна, життєдіяльність екіпажу. Хвилювання моря викликає бортову, кильову та вертикальну хитавицю судна. У результаті виникає небезпека перекидання, пошкодження корпусу, суднових пристроїв та механізмів, погіршуються ходові характеристики судна, умови життя та роботи екіпажу. Для цілей судноводіння хвилювання характеризують висотами хвиль певної забезпеченості. Під забезпеченістю розуміють імовірність зустрічі з хвилями зазначеної чи більшої висоти. Висота хвиль у кожному районі залежить від багатьох чинників, зокрема від сили вітру, його тривалості, розгону хвиль і глибини моря. В океанах хвилі можуть досягати висоти 15 і більше метрів та довжини понад 300 м. У мілководних морях хвилі швидше досягають максимальних розмірів і швидше загасають після припинення дії вітру. Навіть за дуже сильних вітрів розміри хвиль на мілководді менше, ніж у глибоководних районах, зате вони відрізняються значною крутістю. Максимальна висота хвиль на мілководді не буває більше 0,8 глибини моря у цьому місці. Особливості хвилювання у різних районах Світового океану відзначають у лоціях. Ці особливості судноводії повинні враховувати. Хороша морська практика вимагає, щоб судно перед виходом із порту незалежно від тривалості переходу, стану погоди було повністю підготовлено до плавання у штормових умовах. У статті розглянуто способи штормового плавання суден, їхні позитивні та негативні боки і вибір залежно від типу та характеристик судна. Показано, що забезпечення безпеки плавання в умовах сильного хвилювання і вітру, особливо у штормових умовах, багато в чому залежить від розуміння судноводієм закономірностей їхнього впливу на судно. Наведено рекомендації з підготовки до плавання та забезпечення безпеки плавання у несприятливих погодних умовах.

Ключові слова: хвилювання, хитавиця, довгі хвилі, короткі хвилі, остійність, попутне хвилювання, зустрічне хвилювання, слемінг, брочінг, шторм.

Korniyuk V. Ya., Kubitskyi R. O., Buga A. O., Moskalenko K. S. SAFE NAVIGATION IN ADVERSE SEAS

The article discusses the problems of the negative impact of rough sea on safe navigation of the ship. The dangerous impact of strong waves, waves in combination with wind, as well as additional dangerous phenomena arising as a result

of strong waves, on the hull, ship devices and mechanisms, stability, running and maneuvering characteristics of the ship, and the life of the crew were analyzed. Heavy seas cause pitching, rolling, heaving, yawing, surging and swaying of the ship. As a result, danger of capsizing of the ship, damage to ship's hull, devices and mechanisms, deterioration of running and maneuvering characteristics, crew's living and working conditions may arise. For the aims of navigation sea wave's characteristic like the significant wave height ($H_{1/3}$) is used. It is defined as the average height of the highest one third (1/3) of all waves recorded over a particular time period. There is a fair correlation between significant wave height and visually estimated wave height. Significant wave height is used as a general measure of sea roughness. The wavelength, height, amplitude, period, and frequency of surface waves can vary greatly depending on factors such as wind speed, water depth, and current. Half of the waves in the open sea are less than 2 m high, and only 10-15% exceed 6 m. But the ocean can also produce large waves up to 15 m in height and 300 m in length. Waves on shallow waters reach their maximum height and length faster, but their dimensions are less than on deep waters. The features of waves in different regions of the World Ocean are indicated in Pilots. They must be taken into account by navigators. Good seamanship requires that all ships before voyage regardless of estimated time of voyage and weather conditions should be prepared for navigating in rough sea conditions. Methods of heavy sea navigating of ships, their positive and negative sides and their choice depending on the type and characteristics of the ship were described. It is shown that ensuring the safety of navigation in conditions of adverse weather and sea, especially in stormy conditions, largely depends on the navigator's understanding of the laws of their influence on the ship. Recommendations for preparing for swimming and ensuring the safety of swimming in stormy conditions are given.

Key words: wave, pitching, rolling, heaving, long waves, short waves, stability, following seas, quartering seas, slamming, broaching, storm.

Актуальність проблеми. Під впливом певних природних сил в океанах і морях постійно відбуваються хвильові коливання водних мас. Невеликі за своїми параметрами, як правило, не несуть небезпечних наслідків. Більш потужні можуть значно впливати на умови плавання суден та навіть призводити до катастрофічних наслідків типу перегортання судна або руйнування корпусу, пристроїв та механізмів, пошкодження вантажів, травмування та загибелі людей.

Хвилювання моря викликає бортову, кильову та вертикальну хитавицю судна. У результаті виникають небезпека перекидання суден, зміщення вантажів, пошкодження корпусу, палубного вантажу, суднових пристроїв та механізмів, зменшується швидкість ходу та погіршуються умови життя та роботи екіпажу [1–3].

На характер хитавиці судна істотно впливають переважно такі чинники [1; 2]:

- параметри хвиль (регулярність, форма, висота, довжина, частота, напрямок та ін.);
- параметри судна (головні розмірення, вагове навантаження, форма корпусу, власні частоти хитавиці, швидкість, напрямок руху та ін.);
- змінність параметрів судна та хвиль, наприклад унаслідок їх взаємодії, під час маневрування судна або розвитку аварійної ситуації (зміни курсу та швидкості судна, рух рідин у танках та зміщення вантажів, зміни

форми ватерлінії при похилих бортах та під час входу у воду палуби та ін.).

Кут q між напрямками руху судна та хвиль називається курсовим кутом (рис. 1).

У корабельній системі координат частота, період і довжина хвиль називаються уявними і залежать від курсового кута і швидкості судна [2; 3]:

$$\omega_k = \omega + kv \cdot \cos q; \quad \tau_k = \tau \cdot \frac{c}{c + v \cdot \cos q} \quad (1)$$

На регулярному хвилюванні за рівності періоду власних коливань судна періоду уявної хвилі виникає резонанс. На нерегулярному хвилюванні також можлива резонансна хитавиця – за близькості періоду своїх коливань періоду уявної хвильової гармоніки відповідного максимуму хвильового спектру.

Зміною курсу і швидкості судна можна змінити період уявних хвиль і тим самим уникнути або вийти з режиму резонансної хитавиці [1–3].

Плавання лагом до хвилювання. У разі управління судном під час шторму зазвичай намагаються утримувати курс назустріч хвилюванню та уникати положення судна лагом до хвиль. Однак така ситуація може виникнути під час виконання маневру, виходу з ладу двигуна або якщо його потужність недостатня для утримання судна назустріч хвилі.

Характер поперечної хитавиці судна залежить, насамперед, від відношення час-

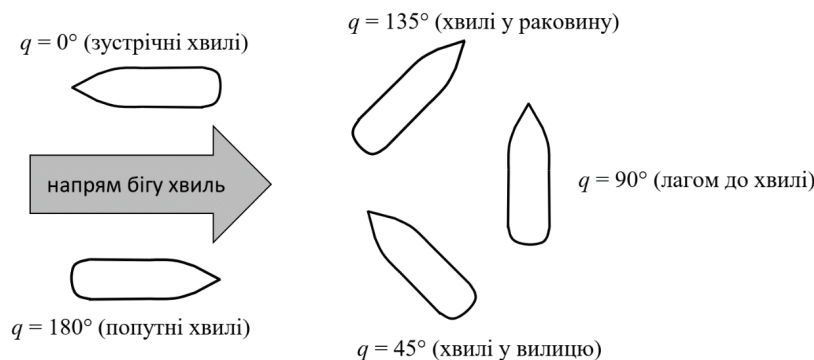


Рис. 1. Курсовий кут хвиль

тоти хвилювання до власних частот бортової та вертикальної хитавиці. Своєю чергою, власні частоти бортової хитавиці тісно пов'язані з параметрами, що визначають стійкість судна.

За вимушеного крену судна з кутом φ виникає момент M_φ , зумовлений протидією сили ваги та архімедової сили з деяким плечем l :

$$M_\varphi = mgl = mgh \cdot \sin \varphi, \quad (2)$$

де $h = r - a$ – поперечна початкова метацентрична висота;

r – поперечний метацентричний радіус;

a – відстань між центром тяжкості та центром величини за положення судна на рівний кіль.

Для остійного судна момент M_φ прагне випрямити судно (момент, що відновлює). За втрати остійності момент прагне перекинути судно.

Метацентричний радіус r прямо пропорційний моменту інерції площі ватерлінії I_x :

$$r = \frac{I_x}{V}, \quad (3)$$

де V – об'ємна водотоннажність судна.

З урахуванням (3) формулу (2) можна подати у вигляді:

$$M_\varphi = \rho g I_x \cdot \sin \varphi - mga \cdot \sin \varphi = M_\phi + M_B \quad (4)$$

Момент M_ϕ називається моментом остійності форми, M_B – моментом остійності ваги.

Пліт має великий момент остійності форми, тоді як момент остійності ваги близький до нуля (центр тяжіння майже збігається із центром величини). Велику остійність форми має також катамаран – через велике значення I_x . Велику остійність ваги має яхта

з вузьким корпусом (за спущеного вітрила) – завдяки баластному кілю.

Формули (2) – (4) характеризують початкову остійність (до кутів крену $10 \dots 15^\circ$). Про остійність на великих кутах крену більш точно уявлення дають діаграми статичної та динамічної остійності. На цій самій основі виконується нормування остійності. Тим не менше діаграми остійності не можуть повністю охарактеризувати остійність судна в умовах шторму, а норми остійності не дають повної гарантії від перекидання суден. Це з тим, що є штормові ситуації, про які діаграми остійності не дають повного уявлення. Ці ситуації пов'язані зі складними динамічними (перехідними) процесами хитавиці на нерегулярному хвилюванні, коли існують пориви вітру, взаємний вплив різних видів хитавиці, зміна положення центрів тяжкості та величини, курсу та швидкості судна, удари хвиль, заливання палуби, зміщення вантажів.

Хитавиця на довгих хвилях. Власний період хитавиці менше, ніж період хвилювання, і судно порівняно плавно огинає профіль хвиль (рис. 2). При цьому за хорошої остійності форми (наприклад, пліт) діаметральна площа судна прагне залишатися перпендикулярною хвильовій поверхні. За великої остійності ваги і малої остійності форми (морська віха, класична яхта з баластним кілем і спущеним вітрилом) спостерігається переважно вертикальна хитавиця (без істотного крену).

Для більшості ж морських суден характерна спільна бортова і вертикальна хитавиця, причому характер нахилень і вертикальних переміщень за період хвилі залежить від спів-

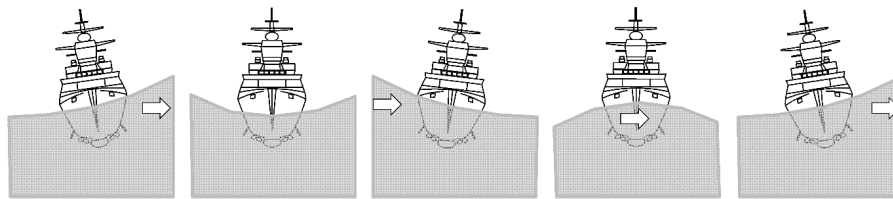


Рис. 2. Поперечна хитавиця судна на довгих хвилях

відношень: моментів остійності ваги і форми; власних частот бортової та вертикальної хитавиці; гідростатичних, інерційних та демпфуючих сил.

Хитавиця на коротких хвилях. Якщо власний період хитавиці судна більше, ніж період хвилі, то за один період проходження хвилі воно не встигає розвинути найбільший кут крену. Борт судна зустрічається з гребенем хвилі «на протиході», що за вимушеної хитавиці призводить до підвищення прискорень та обмеження розмахів хитавиці (рис. 3).

Резонансна хитавиця настає за зближення власного періоду хвилювання судна з періодом хвиль. Амплітуда кутів крену значно збільшується (рис. 4). При цьому найбільший крен спостерігається на підшві і на вершині хвилі.

Практика показує [1; 3], що резонансна хитавиця цілком імовірна, якщо період власних бортових коливань судна менше 12 с. За

свого періоду понад 16 с резонанс малоімовірний.

Для більшості суден існує оптимальне становище центру тяжкості, у якому бортова хитавиця мінімальна.

У суден, завантажених важким вантажем, що займає нижню частину трюму, центр тяжіння знижений. Остійність судна надмірна. У результаті виникають підвищені прискорення за бортової хитавиці, що призводять до морської хвороби людей, підвищеного динамічного навантаження на вантаж, обладнання та конструкції судна, що може призвести до зміщення або зриву з кріплень вантажу, порушення роботи обладнання та пошкоджень конструкцій. За високого центру тяжкості судно стає недостатньо остійним. При цьому збільшується власний період хитавиці (наближаючись до періоду хвиль), різко зростає амплітуда

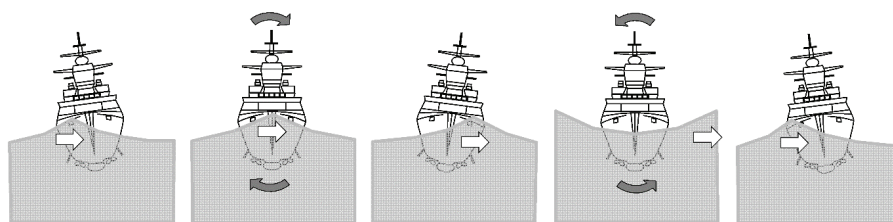


Рис. 3. Поперечна хитавиця судна на відносно коротких хвилях

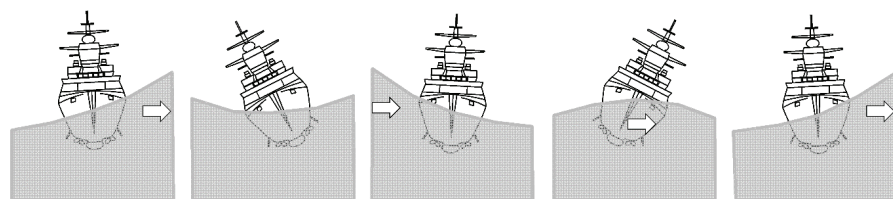


Рис. 4. Резонансна поперечна хитавиця судна

вимушеної бортової хитавиці, аж до втрати остійності та перекидання судна.

За оптимального положення центру ваги судно має плавну хитавицю з відносно невеликими прискореннями та амплітудами кутів крену.

Слід зазначити, що під час ходу на косих курсах бортова хитавиця може виявитися навіть сильнішою, ніж у положенні лагом до хвилі, якщо період хвилі, що здається, збігається з періодом судна на тихій воді.

Спільна дія на судно вітру та хвилювання призводить до збільшення амплітуди хитавиці. При цьому існують особливо небезпечні, резонансні поєднання хвилювання та вітру, коли період хвиль дорівнює періоду поривів вітру (рис. 5).

Плавання на зустрічному хвилюванні. Період кільової (як і вертикальної) хитавиці значно (часто в кілька разів) менше періоду бортової хитавиці. Якщо врахувати, що на зустрічному хвилюванні періоди хвиль, що здаються, зменшуються, то можна заключити, що за курсу судна проти хвиль його кільова і вертикальна хитавиці можуть перебувати в резонансі з хвилюванням. Однак унаслідок того, що поздовжня хитавиця має суттєве демпфування, її резонанс не проявляється так явно, як за поперечної хитавиці.

На хвилях, довжина яких істотно більша за довжину судна, поздовжня хитавиця судна відбувається, як показано на рис. 6а: судно огинає профіль хвиль, його палуба залишається приблизно паралельною хвильовій поверхні. Така хитавиця відбувається з амплітудами,

що визначаються кутами схилу та висотами хвиль. Вона має відносно плавний, помірний характер і зустрічається зазвичай у невеликих суден на пологих хвилях.

Довжина середніх та великих суден приблизно відповідає довжині основних хвиль у відкритому морі. У цьому разі якщо період хвиль, що здається, близький до власного періоду кільової хитавиці, амплітуди хитавиці досягають найбільших значень (рис. 6б). На хвилях із меншим періодом (або зі збільшенням швидкості судна), рухаючись назустріч хвиль, судно під час сходу з вершини хвилі не встигає досягти найбільшого диферента на ніс і врізається у схил наступної хвилі. Такий режим кільової хитавиці, як і резонансний, вважається несприятливим, оскільки призводить до підвищення прискорень і ударів хвиль у носовий край (рис. 6в).

Зі зменшенням довжини (і періоду) хвиль амплітуда кільової хитавиці зменшується. Зменшуються також і гідростатичні та гідродинамічні навантаження на судно. Зі збільшенням швидкості судна також зменшуються період хвиль і амплітуда кільової хитавиці, що здається, проте вертикальна хитавиця, прискорення і гідродинамічні сили при цьому ростуть.

Поздовжня остійність типового (витягнутого в довжину) судна на порядок більше поперечної. Однак навіть за малих кутів диферента судна вертикальні переміщення його країв під час кільової хитавиці стають більшими. У результаті на хвилюванні можливі такі ефекти, як zalивання або оголення країв.

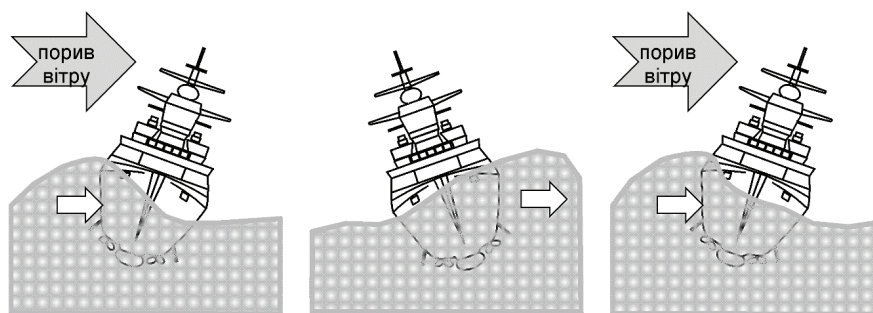


Рис. 5. Несприятливе поєднання вітрового кренящого навантаження та бортової хитавиці

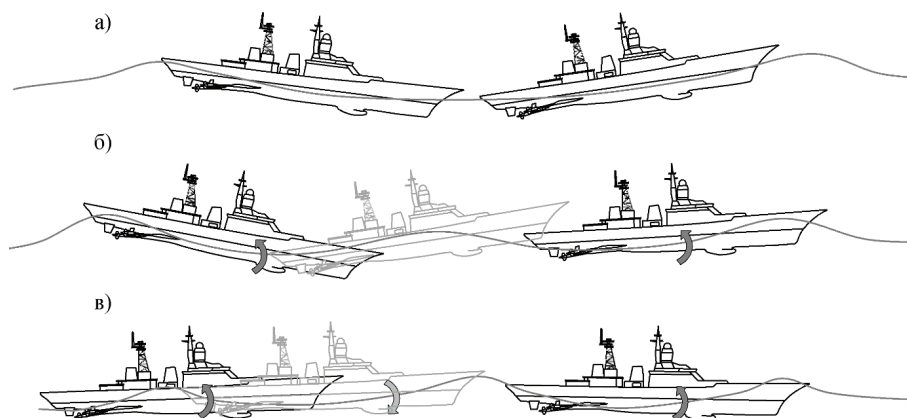


Рис. 6. Кільова хитавиця: а – на довгих хвилях; б – на хвилях середньої довжини (у зоні резонансу); в – на більш коротких хвилях

На поздовжню хитавицю судна істотно впливає поздовжній момент інерції ватерлінії I_x , що визначається формою корпусу. Судна з малим I_x (із гострими краями) зазнають менших прискорень і переміщень під час кільової хитавиці. Найменший I_x мають судна з малою площею ватерлінії, що забезпечує їм високу мореплавність на хвилюванні.

Під час хитавиці I_x є змінною величиною, особливо за похилих бортів. За розвалу бортів у середній частині зазвичай збільшується амплітуда вертикальної хитавиці, а суттєвий розвал бортів у краях сприяє зростанню кільової хитавиці внаслідок збільшення гідродинамічних навантажень під час входу країв у хвилю (бортовий слемінг). Завал бортів на рівні ватерлінії сприяє зменшенню гідродинамічних навантажень і, як наслідок, зменшенню поздовжньої качки.

Кільова хитавиця судна залежить також від поздовжнього моменту інерції мас. Унаслідок витягнутості корпусу судна по довжині його поздовжній радіус інерції та момент інерції мас мають великі величини. У результаті під час кільової хитавиці у краях виникають великі вертикальні прискорення та динамічні навантаження на конструкції носа і корми.

Особливо це характерно для більшості вантажних суден (із машинним відділенням у кормі) у баластному стані, коли для удиферентування судна приймається баласт у носові цистерни, тобто маси концентруються до країв.

Під час поздовжньої хитавиці судна за умов шторму однією з основних проблем

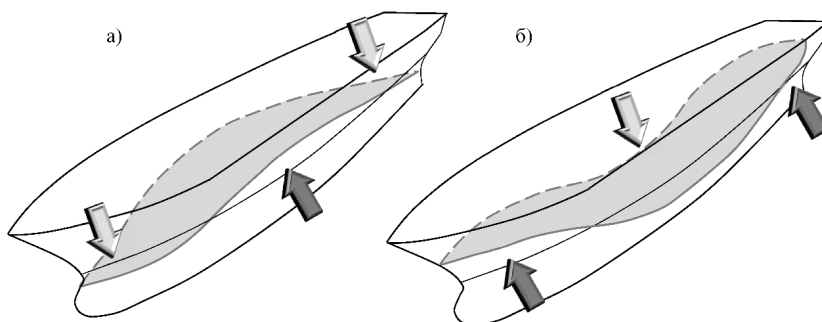
є проблема забезпечення загальної міцності його корпусу. Навіть на тихій воді у середніх і великих суден виникають суттєві поздовжні напруги, зумовлені різним розподілом по довжині сил підтримки та ваги судна. Ці напруги пропорційні згинальному моменту результуючих сил M_{sw} і досягають найбільшої величини в районі міделя. На хвилюванні моменту на тихій воді M_{sw} додається хвильовий згинальний момент M_w . Окрім того, в умовах шторму часто присутні моменти від ударів хвиль (слемінгу) M_{sl} та заливання палуби M_{gw} :

$$M_{\Sigma} = M_{sw} + M_w + M_{sl} + M_{gw} \quad (5)$$

За довжини хвиль, що дорівнюють довжині судна, хвильова ватерлінія найбільше відрізняється від ватерлінії на тихій воді. У результаті найбільшої величини досягають додаткові гідростатичні сили, що викликають хвильовий згинальний момент і загальний вигин корпусу судна (рис. 7).

На величину хвильового моменту середньої частини корпусу впливають також сили інерції від вертикальної хитавиці судна. Причому цей вплив залежить від розподілу мас і сил підтримки по довжині судна, а отже, від моменту, що згинає на тихій воді: у суден із перегином корпусу на тихій воді воно мале, а у суден із прогином на тихій воді воно може бути значним.

У результаті накладання напруги в корпусі судна від згинальних моментів (5) можливе порушення загальної міцності корпусу судна, аж до перелому.



**Рис. 7. Вигин корпусу на хвилі у вертикальній площині:
а – судно на вершині хвилі; б – судно на підшві хвилі**

Зі збільшенням швидкості судна кильова хитавиця зменшується. Однак збільшенню швидкості на зустрічному хвилюванні перешкоджають: за наявності суттєвого розвалу шпангоутів у носі – бортовий слемінг; за наявності широкого носового бульба та збільшення повноти носового краю – днищевий слемінг. Судно ж із малим I_x (без розвалу носових шпангоутів і з загостреним носовим краєм) здатне зменшити кильову хитавицю шляхом збільшення швидкості [1–3].

Поздовжня хитавиця судна на зустрічному хвилюванні може призвести до порушення бортової хитавиці і навіть перекидання судна. Таке явище називають параметричним, або субгармонічним, резонансом. Субгармонічна бортова хитавиця відбувається так. Під час входу носового краю у зустрічну хвилю з’являється вертикальна гідродинамічна реакція (бортовий слемінг). Якщо при цьому судно має невеликий крен або кут до хвилювання, зумовлений нишпоренням, удар хвилі в нос-

вий розвал борту несиметричний і викликає момент, що кренить, і бортову хитавицю. Під час входу носом у наступну хвилю в результаті бортової хитавиці судно матиме крен на протилежний борт. Відбудеться новий удар у розвал носа з іншого борту. Якщо частота навантаження від змінного впливу хвиль у різні борти носового краю збігається зі своєю частотою бортової хитавиці, спостерігається параметричний резонанс. Зростанню бортової хитавиці сприяє також періодичне зменшення поперечної метацентричної висоти і моменту, що відновлює, під час виходу судна на вершину хвилі (рис. 8).

Слемінгом називається явище ударів хвиль у корпус судна. Залежно від характеру ударів виділяються різні види слемінгу (рис. 9).

Днищевий слемінг виникає у процесі поздовжньої хитавиці за оголення носового краю і подальшого всплеску по воді. Зазвичай це явище спостерігається під час баластових переходів суден, коли осадка носом відносно

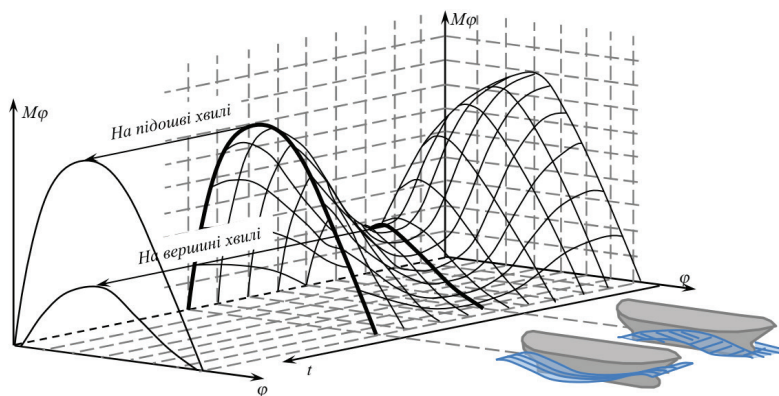


Рис. 8. Зміна діаграми статичної остійності судна на хвилюванні

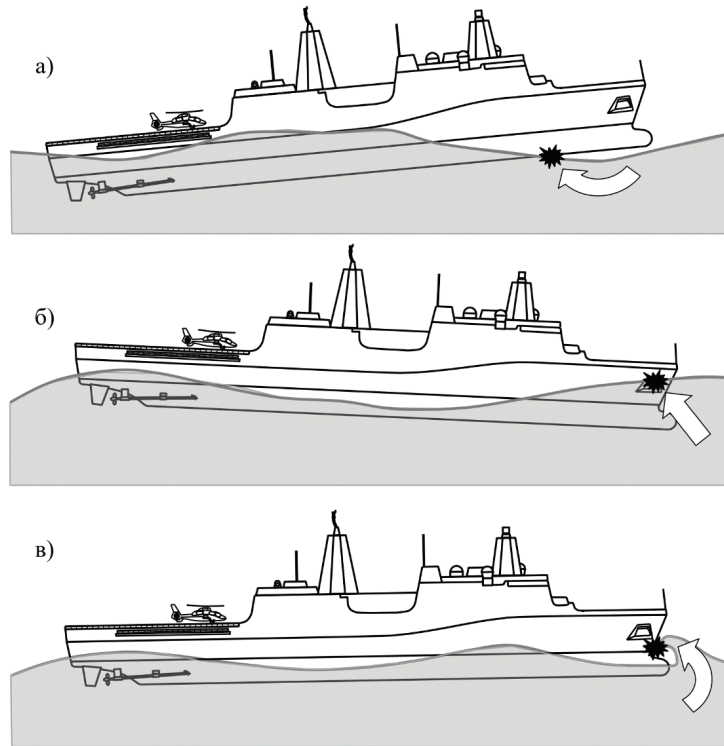


Рис. 9. Види слемінга: а – днищевий слемінг; б – бортовий слемінг; в – удар хвилі, що руйнується

невелика. Днищевий слемінг частіше спостерігається у суден із повними обводами і плоскою ділянкою днища носового краю. Особливості днищевого слемінгу як фізичного явища визначаються переважно спільним виконанням двох умов: 1) оголенням днища; 2) входом днища у воду з вертикальною швидкістю щодо води, більшою за деяке «порогове» значення. Величина «порогової» швидкості має великий розкид, зумовлений випадковим характером хвилювання і хитавиці судна, особливостями форми носового краю, розмірами судна, параметрами хитавиці та ін. Орієнтовно вона становить 2–4 м/с. Тривалість удару становить частки секунди (зазвичай менше 0,2 с). Тиск нерівномірний за площею удару. Після удару корпус судна відчуває вібрацію, що згасає.

Навантаження можуть призвести до серйозних пошкоджень конструкцій днища, а в умовах шторму й до подальших руйнувань. Відомі випадки перелому корпусів суден, що опинилися у штормовому морі за несприятливих умов завантаження, унаслідок важких ударів об хвилі.

Імовірність небезпечних ударів за слемінгу тим більше, чим більші висота хвиль та швидкість судна. Спостерігаються вони на зустрічному хвилюванні у широкому діапазоні курсових кутів. Тому відхилення по курсу від суто зустрічного руху є ефективним засобом уникнути небезпеки слемінгу. Уникнути небезпечних ударів хвиль легше зниженням швидкості або збільшенням осадки судна носом.

Бортовий слемінг (або віпінг) є ударом об хвилю похилими ділянками борту в носовому краю. Він характерний для швидкохідних суден із малою повнотою та суттєвим розвалом борту в носовому краю. Тривалість дії динамічних навантажень, що нарастають, істотно більша, ніж під час удару днищем, і становить близько 1 с. Найбільший тиск за бортового слемінгу може досягати 500 кПа і більше.

Віпінг може призвести до вм'ятини та пошкодження набору у верхній частині обшивки носа. Іноді він супроводжується заливанням та пошкодженням палубних конструкцій. Увесь корпус судна за бортового слемінгу відчуває суттєву додаткову динамічну

напругу від загального вигину. Вони діють одночасно з напругою, викликаною лінійними хвильовими навантаженнями, навантаженнями на тихій воді і підсумовуються з ними. Це призводить до збільшення загальної напруженості корпусу. Значний динамічний момент, що прогинає, і може бути причиною серйозних пошкоджень корпусу, пов'язаних із утратою стійкості палубних конструкцій у середній частині судна. Окрім того, у районі чверті довжини корпусу в носовій частині в бортах судна виникають додаткові динамічні дотичні напруги, які можуть призводити до небезпечних тріщин у кутах люків та в районі закінчення надбудови бака.

Для суден, що перевозять палубний вантаж, зазвичай намагаються збільшити площу палуби за рахунок великого розвалу шпангоутів та нахилу форштевня. За рахунок цього поліпшується схожість судна на хвилю і дещо зменшується накат води на палубу. Зате суттєво зростає бортовий слемінг, кильова хитавиця стає більш різкою, зростають прискорення та інерційні навантаження від палубного вантажу.

На великих пасажирських суднах із метою розширення зони модульної організації житлових приміщень іноді верхню частину корпусу в носі доповнюють. При цьому у нижній надводній частині збільшується розвал борту. Це може призвести до зростання прискорень та навантажень від бортового слемінгу під час кильової хитавиці.

Окрім загасаючих пружних коливань корпусу судна, викликаних днищовим або бортовим слемінгом, у деяких суден може суттєво виявлятися вимушена вібрація корпусу, що не загасає у результаті дії щодо коротких хвиль. Це явище, зване спрингінгом, характерне для суден, що мають малу згинальну жорсткість, наприклад річкових та змішаного плавання (із великим відносним подовженням L/H). Спрингінг особливо проявляється, коли частота зустрічі з хвилями потрапляє у резонанс із власною частотою згинальних коливань корпусу. Хвильові навантаження, що викликають спрингінг, збільшуються, якщо в носовій частині вище ватерлінії є суттєвий нахил бортів.

Хвильова вібрація погіршує умови проживання на борту судна і може призвести до

швидкого розвитку тріщин втоми в корпусі судна.

Заливання палуби. Під час хитавиці судна на зустрічному штормовому хвилюванні заливання палуби може відбуватися за недостатньої висоти надводного борту носової частини. Воно може призводити до пошкодження бака, палубного обладнання, комінгсів і конструкцій люкових закриттів, палубного вантажу та ін. Великі маси води, які заливають верхню палубу, окрім руйнування надпалубних споруд і самої палуби, можуть створювати великий перегинальний момент, який у сумі з хвильовим моментом того ж знаку може досягати небезпечного рівня.

Удари хвиль по палубі можуть призвести до розтину люків, руйнування вентиляційних труб та попадання усередину корпусу великої кількості води. Тим самим заливність посилюється і може спричинити затоплення судна. Негативний вплив на остійність судна мають зрив із кріплень і підмочка палубного вантажу, зледеніння, а для малих суден – затримка великих мас води на палубі, особливо коли фальшборт або палубний вантаж ускладнюють стік води за борт.

Плавання на попутному хвилюванні. За курсу за напрямом бігу хвиль можливе небезпечне зниження остійності та керованості судна (особливо невеликого тоннажу) [2; 3]. Збільшується ризиковість, судно гірше слухається керма. Виконавши розрахунки за формулою (1) і звівши результати в таблицю (табл. 1), можна дійти невтішного висновку, що попутні хвилі обганяють більшість водотонажних суден, мають сумірну з ними довжину.

Таблиця 1
Розрахунки плавання на попутному хвилюванні

λ , м	25	50	100	200
c , м/с	6,25	8,8	12,5	18
c , вуз	12	16	24	34
τ_w , с	4	5,7	8	11,3

За обтікання пера руля попутним потоком гребеня хвилі, навіть за невеликого куту атаки, виникає пара сил (від тиску на кермо і реакції корпусу, прикладеної у районі міделя), що прагне розгорнути судно лагом до хвиль. У результаті під час

руху судна на попутному хвилюванні його стійкість на курсі втрачається, керованість різко знижується.

За становища судна на вершині хвилі зменшується його момент інерції площі ватерлінії (рис. 10), отже, і остійність форми.

Курсовий кут хвиль, у якому зменшується остійність, перебуває у межах $180-135^\circ$, а небезпечною є хвиля з довжиною $60-120\%$ довжини судна. У цьому разі можливе перекидання судна.

За довжини хвилі менше довжини судна можлива значна кільова хитавиця з оголенням гребних гвинтів, особливо якщо швидкість судна менша за швидкість руху хвилі.

Якщо судно не знаходиться у статичному положенні щодо хвиль, то можлива його втрата остійності внаслідок порушення бортової хитавиці та основного або параметричного резонансу.

Брочінг. Супутня хвиля може бути небезпечна не лише через безпосереднє зниження остійності на гребені хвилі, а й унаслідок погіршення керованості. Із недостатньою плавучістю носа великий навал хвилі на транець може підняти корму, при цьому ніс заривається у воду. Відбувається захоплення судна хвилею, утрата керованості та мимовільний розворот судна лагом до хвилі. Таке явище називається брочінгом.

Брочінг має дві основні фази: 1) захоплення судна хвилею; 2) розворот судна, яке втратило стійкість на курсі, лагом до хвилювання. До брочінгу часто схильні малі судна, що мають довжину менше 50 м та широкий транець.

Найбільш небезпечним є захоплення на передньому схилі супутніх хвиль, що мають

довжину більше $0,6-0,8$ довжини судна. При цьому зазвичай швидкість хвилі більша за швидкість судна, і судно не слухається керма, оскільки за рівності швидкостей руху судна і хвилі припиняється обтікання пера руля потоком води, а попутний потік викликає на кермі момент, що прагне розгорнути судно. У такому стані судно, перебуваючи на межі стійкості руху, отримує випадкове обурення та різко розгортається лагом до хвилі. Це може призвести до перекидання.

Якщо на довгих хвилях (більше $0,6-0,8$ довжини судна) швидкість судна більша за швидкість хвиль, воно захоплюється заднім схилом хвилі. Це захоплення виявляється у тому, що судно неспроможне подолати хвилю навіть за підвищених оборотів двигуна. При цьому судно стійко тримається на курсі.

Вихід судна із захопленого стану можливий або після розвороту його лагом до хвиль (цей варіант небезпечний, оскільки може призвести до перекидання судна), або зниженням швидкості (іноді для виходу із цього стану доводиться давати задній хід).

Розворот судна, що має малу швидкість, лагом до хвилювання можливий і без захоплення його хвилею. Сили підтримки на підшві хвилі викликають сильне нищпорення проти годинникової стрілки, а на вершині хвилі – слабке нищпорення за годинниковою стрілкою. Таким чином, за проходження кількох хвиль судно поступово розвертається до положення лагом до хвиль.

Експериментально встановлено [2; 3], що найнебезпечніший брочінг – на хвилях довжиною $1,0-1,3$ від довжини судна. Умовам виникнення цього явища сприяють дифе-

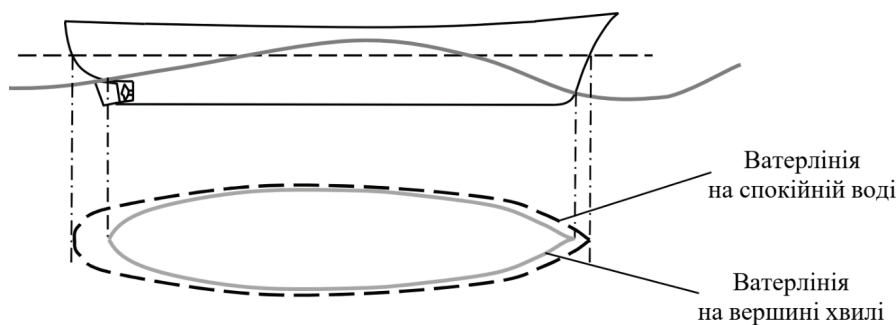


Рис. 10. Ватерлінія судна на хвилі

рент судна на ніс і невелика осадка (порожнє судно).

Для цілей судноводіння хвилювання характеризують висотами хвиль певної забезпеченості [1–5]. Під забезпеченістю розуміють імовірність зустрічі з хвилями зазначеної чи більшої висоти. В Україні прийнято оцінку 3% забезпеченості висоти хвиль, яку позначають $h_{3\%}$. У багатьох країнах прийнята характеристика висоти хвиль за середнім значенням з однієї третини найбільш високих хвиль, що спостерігаються. Таку висоту позначають $h_{1/3}$, і вона відповідає висоті хвиль забезпеченістю близько 14%. Висота $h_{1/3}$ відповідає окомірній оцінці висоти хвиль досвідченим спостерігачем із містка судна. Залежність оцінок становить $h_{3\%} = 1,4h_{1/3}$, тобто оцінена, наприклад, окомірною висота хвилі в 4 м відповідатиме висоті хвиль тривідсоткової забезпеченості в 5,6 м.

Висота хвиль у кожному районі залежить від багатьох чинників, зокрема, насамперед, від сили вітру, його тривалості, розгону хвиль і глибини моря. В океанах хвилі можуть досягати висоти 15 і більше метрів і довжини понад 300 м. У басейнах закритих морів, де розгін хвилі менше 700 миль, висота хвиль, навіть під час дуже сильних вітрів, зазвичай обмежена 7–8 м.

У мілководних морях хвилі швидше досягають максимальних розмірів і швидше заважають після припинення дії вітру. Навіть за дуже сильних вітрів розміри хвиль на мілководді менше, ніж у глибоководних районах, зате вони відрізняються значною крутістю. Максимальна висота хвиль на мілководді не буває більше 0,8 глибини моря у цьому місці. Швидкість поширення і довжина хвиль на мілководді зменшуються, а період хвиль залишається незмінним. Глибина моря починає суттєво впливати на хвилі, викликаючи їх деформацію тоді, коли вона менше 6–7 значень висоти хвилі. Якщо під час гальмування об ґрунт розмір довжини хвилі зменшується до 10–11 значень висоти хвилі, вона досягає граничної крутості та руйнується.

Особливості хвилювання у різних районах Світового океану відзначають у лоціях. Ці особливості судноводії повинні враховувати і під час планування шляху, за можливості

уникати проходження мілководних районів під час штормової погоди, де хвилі можуть бути вищими, крутішими і руйнівнішими.

Хороша морська практика вимагає, щоб судно перед виходом із порту незалежно від тривалості переходу, стану погоди і вантажу, що перевозиться, було повністю підготовлено до плавання у штормових умовах [1; 4; 5]. У разі отримання штормового попередження або виявлення ознак наближення шторму на судні перевіряють готовність до плавання у шторм, про що роблять запис у судовому журналі.

Плавання у штормову погоду ускладнюється тим, що судно не завжди може прямувати за раніше вибраним маршрутом, а змушене утримуватися на курсах, за яких вплив негативного штормового впливу позначається меншою мірою. Якщо судно слідує поблизу місць, які дають змогу сховатися від сильного шторму, і є сумніви у подоланні штормової зони, капітан має право визначити, продовжувати рейс або перечекаати шторм під захистом берегів. У тих випадках, коли продовження рейсу в штормових умовах може бути небезпечним для судна і людей, що знаходяться на ньому, капітан повинен заздалегідь вибрати спосіб штормування, що дає змогу полегшити умови для судна у штормовому морі. Для оцінки можливостей штормування та вибору оптимальних курсів і швидкостей служать штормові діаграми або автоматична система контролю мореплавності судна.

Найбільш поширеним способом штормування є штормування проти хвилі. За такого способу судно порівняно добре управляється, стійкіше на курсі, остійність не знижується, розмахи бортової хитавиці зменшуються. Форма носової частини корпусу, як правило, дає змогу судну легше сходити на хвилю, що набігає. Переходячи до штормування проти хвилі, рекомендується знизити швидкість ходу до мінімальної, коли ще зберігається керованість. Основне завдання – полегшити умови для судна під час важкого шторму, уникнути пошкоджень та підвищити безпеку, перечекаати шторм за таких умов. Якщо швидкість ходу не буде знижена, удари хвиль об корпус та заливання палуби можуть досягти максимальної сили та спричинити небезпечні руйнування.

У разі коли, утримуючи курс проти хвилі, судно продовжує відчувати значну заливність, удари хвиль по днищу і корпус, рекомендується змінити курс судна, поставивши його під певним оптимальним кутом до напрямку бігу хвиль.

Великотоннажним суднам, у яких зазвичай нерівномірне завантаження, згинальні моменти, що діють на корпус, можуть досягати гранично допустимих значень, рекомендується штормувати на курсових кутах до напрямку бігу хвиль понад 30–40°.

Штормувати хвилею, тобто на кормових курсових кутах до напрямку бігу хвиль, можуть судна з достатньою остійністю. Хитавиця стає плавнішою, періоди хитавиці й амплітуди крену збільшуються, судно відчуває менше ударів хвиль, сила ударів слабкіше. Швидкість судна може наближатися до експлуатаційної, менше за воду потрапляє на палубу. Однак під час знаходження судна на вершині хвилі або поблизу неї зменшується метацентрична висота, знижується опір судна впливу вітру та хвиль. Зменшується стійкість судна на курсі, воно гірше слухається керма, зростає нишпорення. Спроби утримати судно точно на курсі зазвичай бувають марними і тільки призводять до посиленої роботи рульової машини. У цьому разі ручне керування кермом краще, ніж автоматичне.

Небезпечно штормувати на попутному хвилюванні, коли поперечна метацентрична висота близька до мінімально допустимого значення. У разі перебування судна на вершині хвилі в нього з'являються великі кути крену. Воно тривалий час, поки вершина хвилі обганяє судно, йде з креном на один борт, потім повільно перевалюється на інший борт, досягаючи знову великої величини кута крену. Така хитавиця ще більше посилюється, якщо є великі вільні поверхні рідких вантажів. Значні за величиною і тривалі за часом нахилення можуть призвести до зміщення вантажу, появи асиметричної хитавиці та загрози перекидання судна. Особливо небезпечно виходити курс по хвилі судам, які вже почали зміщення вантажу і з'явився статичний крен. У разі появи значних кутів крену та затримок із таким кутом крену на вершині хвилі потрібно зменшувати швидкість ходу, не втрачаючи

при цьому керованості. Тоді хвиля швидше проходить щодо судна, не даючи йому змоги повністю нахилитися, перебуваючи поблизу вершини хвилі.

Штормування лагом до хвилі зазвичай вимушений спосіб. У положенні перпендикулярно напрямку дії вітру та бігу хвиль удари хвиль та вплив вітру приймає найбільша площа корпусу та надбудов судна. Дрейф стає максимальним. Розмахи хитавиці збільшуються і можуть досягти небезпечних розмірів. Період хвиль τ може збігтися із власним періодом коливань судна T_{\ominus} , наводячи судно у стан резонансу:

$$0,7 \leq \frac{\tau}{T_{\ominus}} \leq 1,3.$$

За знаходження у зарезонансній зоні, коли $\frac{\tau}{T_{\ominus}} > 1,3$ і, отже, періоди власних коливань судна значно менші за періоди хвиль, розмахи хитавиці не такі небезпечні, як у разі резонансу, проте досить великі. Хитавиця біля судна стрімка, хвилі можуть потрапляти на палубу і призводити до значних руйнацій, на палубі постійно перебувають великі маси води.

Найбільш сприятливо перебування судна у дорезонансній зоні, коли $\frac{\tau}{T_{\ominus}} < 0,7$, тобто період власних коливань більше періоду хвиль і судно має достатню поперечну остійність.

Хитавиця плавна, із порівняно невеликими розмахами, судно легко піднімається на хвилю, не приймаючи великих мас води на палубу. За таких умов можна рекомендувати штормувати лагом до хвилі. Проте необхідно брати до уваги дію не лише хвилі, а й сильного вітру. Під його впливом судно набуває постійного крену в підвітряний бік, кути крену в цей бік стають більше, що може призвести до зміщення вантажу на один борт, якщо вантаж погано закріплений або схильний до зміщення.

Морська практика підтвердила сприятливі умови під час виходу окремих типів суден штормувати у положенні лагом хвилі. До таких типів відносяться судна з підвищеним надводним бортом і невеликою поперечною метацентричною висотою (автомобілевози, контейнеровози з контейнерами на палубі,

пасажирські судна і т. ін.), у яких відношення мінімальної швидкості дрейфу V_d до швидкості вітру V_w становить не менше 0,05%. Ураховуючи, що під час сильного шторму періоди хвиль τ перебувають у межах 9–14 с, бажано мати власні періоди хитавиці T_Θ більше 15 секунд.

Вибір безпечного поєднання курсу та швидкості рекомендувалося проводити з використанням універсальної діаграми хитавиці Ю.В. Ремеза. Діаграма побудована для великих глибин моря і рекомендується до використання за умови, що глибина моря більше четвертини довжини хвилі. Міжнародна морська організація (ІМО) циркуляром MSC.1/Circ.1228 для попередження небезпечних ситуацій за несприятливих погодних умов рекомендує використання більш сучасних та універсальних діаграм [1; 3–5].

Висновки і перспективи подальших досліджень. Правильний вибір під час штормового плавання курсу щодо хвилі та швидкості ходу може суттєво вплинути на поведінку судна та значно зменшити ймовірність виникнення небезпечних аварійних ситуацій та несприятливих явищ. Під час вибору способу плавання на хвилюванні (штормування) необхідно враховувати безліч чинників, у тому числі силу, характер і напрямок вітру та хвилювання, конструктивні й архітектурні особливості судна, характер завантаження, співвідношення розмірів судна та хвиль тощо. Із можливих варіантів штормування рекомендується вибирати той, за якого судно зазнає найменших ударів хвиль і динамічних навантажень на корпус, менше заливається, не зазнає резонуючої бортової та кільової хитавиці. Під час плавання у штормових зонах поряд із використанням штормової діаграми Ремеза і діаграми Богданова необхідно враховувати всі рекомендації хорошої морської практики, яка узагальнює багаторічний досвід мореплавання.

мового плавання курсу щодо хвилі та швидкості ходу може суттєво вплинути на поведінку судна та значно зменшити ймовірність виникнення небезпечних аварійних ситуацій та несприятливих явищ. Під час вибору способу плавання на хвилюванні (штормування) необхідно враховувати безліч чинників, у тому числі силу, характер і напрямок вітру та хвилювання, конструктивні й архітектурні особливості судна, характер завантаження, співвідношення розмірів судна та хвиль тощо. Із можливих варіантів штормування рекомендується вибирати той, за якого судно зазнає найменших ударів хвиль і динамічних навантажень на корпус, менше заливається, не зазнає резонуючої бортової та кільової хитавиці. Під час плавання у штормових зонах поряд із використанням штормової діаграми Ремеза і діаграми Богданова необхідно враховувати всі рекомендації хорошої морської практики, яка узагальнює багаторічний досвід мореплавання.

Література:

1. Алексишин В.Г., Козир Л.А., Симоненко С.В. Забезпечення навігаційної безпеки плавання : навчальний посібник. Одеса : Фенікс, 2009. 518 с.
2. Сизов В.Г. Теорія корабля : навчальний посібник. 2-е вид., випр. Одеса : Фенікс, 2003. 284 с.
3. A Guide to Ship Handling. The Best Seamanship. Published by Japan Captains' Association, Tokyo, Japan.
4. Рекомендації по організації штурманської служби на морських суднах України (РШСУ–98). Одеса : ЦНДІМФ, 1998. 96 с.
5. IMO MSC.1/Circ.1228. Revised Guidance To The Master For Avoiding Dangerous Situations In Adverse Weather And Sea Conditions.

References:

1. Aleksishin, V.G. (2009) Zabezpechennia navigatsiinoi bezpeki plavannia: Navchalnii posibnik [Safety of Navigation Ensuring Tutorial] / V.G. Aleksishin, L.A. Kozir, S.V. Simonenko. Odessa: Feniks.
2. Sizov, V.G. (2003) Teoriia korablia: Navchalnii posibnik [Ship's Theory Tutorial]. Odessa: Feniks.
3. A Guide to Ship Handling. The Best Seamanship. Published by Japan Captains' Association, Tokyo, Japan.
4. Rekomendatsii po organizatsii shturmanskoi sluzhbi na morskikh sudnah Ukraini (RShSU–98) [Recommendations for Organizing Navigator Service on the Ships of Ukraine], Odessa: CNDIMF.
5. IMO MSC.1/Circ.1228. Revised Guidance To The Master For Avoiding Dangerous Situations In Adverse Weather And Sea Conditions.