

Хуссейн Ю.М.

МЕТОД ТА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ЗДІЙСНЕННЯ НАВМИСНОЇ АВАРІЙНОЇ ПОСАДКИ СУДЕН НА МІЛИНУ У РАЙОНІ ПОРТУ

Метою роботи є розробка структури суднової системи підтримки прийняття рішень та методу підтримки прийняття рішень для управління судном, яке знаходиться у деградованому стані, у важких гідрометеорологічних умовах плавання при посадці на мілину для оцінки наслідків такої події. Поставлена мета досягається шляхом обробки початкових даних для обраних сценаріїв і відображення необхідної інформації на борту судна для осіб, які приймають рішення, для оцінки наслідків навмисної посадки судна мілину. Початковими даними методу є характеристичні параметри базових типів суден і типові сценарії посадки судна мілину. Джерелами початкової інформації є засоби моніторингу стану корпусу і дані вантажного комп'ютера. За обраними сценаріями посадки на мілину певних типів суден можна отримати параметричні формули для оцінки ушкоджень і сили контакту між судном і морським дном з урахуванням навантаження від нерухокої води, динамічного навантаження від хвиль і припливів, місцевих контактних сил від морського дна. Система підтримки прийняття рішень інтегрує окремі модулі в загальне сховище даних і загальний людино-машинний інтерфейс. Найсуттєвішими результатами є розробка структури суднової системи підтримки прийняття рішень та відповідного методу для управління судном при вимушеній посадці на мілину, що дозволяє особам, які приймають рішення, ефективно діяти на борту судна і на березі при обраних критичних сценаріях. Значущість отриманих результатів полягає у розробці методу підтримки прийняття рішень для управління судном, яке знаходиться у деградованому стані, при посадці на мілину, який відрізняється розділом процесу посадки на мілину на рух жорсткого тіла й опір проникненню у структуру дна, яке розраховується на основі заздалегідь установлених залежностей опору з урахуванням деградації міцності конструкційних елементів суднового набору через пошкодження днища і початкові пошкодження, що дозволяє виробляти рішення у режимі реального часу та оцінити наслідки такої події (структурні пошкодження, розрив, можливе затоплення або розлив нафти), включаючи подальший розвиток пошкоджень і розливу через коливання припливу та/або посилення хвиль і вітру. Таким чином, проведені дослідження показали ефективність запропонованого підходу для оцінки управління судном для обмеження морських навантажень, щоб пошкодження корпусу не поширилися до критичного рівня для всього судна, та, у крайньому випадку, для оцінки наслідків посадки судна на мілину.

Ключові слова: система підтримки прийняття рішень, навігація, судно, судновожіння, морський та річковий транспорт, безпека судноводіння, посадка на мілину, особа, що приймає рішення, набір корпусу судна, пошкодження, розлив нафти.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Ризик можливих жертв, величезні матеріальні втрати або грандіозні розливи нафтопродуктів під час аварій суден негативно відбиваються на сталому розвитку економіки морських держав, знижують безпеку на морі, несуть екологічну загрозу для морської дикої природи і рибних запасів.

Для зниження ризику морських перевезень у майбутньому необхідно розробити та вжити низку відповідних заходів. При цьому особливу увагу необхідно зосередити на заходах, спрямованих на зниження ризику розливу нафти з танкерів, що сіли на мілину, через драматичні, а іноді трагічні, наслідки таких подій для морських екосистем.

Для суттєвого зменшення, у кращому разі – запобігання, катастрофічним наслідкам, що можуть статися у разі зіткнення нафтового танкера з іншим судном або іншою статичною перешкодою фахівці пропонують застосовувати двосторонні корпуси. Однак, зниження можливої загрози катастрофічних зіткнень океанських суден, що характеризуються збільшеними розмірами і швидкостями, може досягатися і збільшенням відповідальності суден, що стикаються.

У цьому зв'язку важливо знати стан систем виявлення і моніторингу різноманітних систем сучасних суден. А тут є певні проблеми. По-перше, для виявлення і контролю різноманітних систем надається великий, часто надвеликий, обсяг контрольованої інформації. По-друге, хоча моніторинг силових установок і маневрених систем уже порівняно давно є стандартом, то контроль міцності корпусу суден ще розвинутий недостатньо. По-третє, у разі відмови критично важливих елементів судна сучасні системи моніторингу виробляють значну кількість сигналів тривоги. Але надлишок даних, що оброблюються у більшості моніторингових систем, часто видають помилкові сигнали тривоги. По-четверте, у разі одночасної відмови декількох критичних систем рекомендації з управління судном можуть бути помилковими або зовсім не можуть бути надані капітану судна або екіпажу.

Таким чином, великий обсяг контрольованої інформації, порівняно «жорсткі» алгоритми і зацикленість моніторингових систем на строго визначених елементах судна не дозволяють точно визначити фактично джерело несправності, ступінь ризику для судна і, відповідно, адекватно оцінювати ситуацію загалом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні десятиліття серйозна увага приділяється аналізу морських аварій, особливо зіткненням суден, у зв'язку з високим рівнем матеріальних збитків, жертв і забруднення довкілля [1-5]. Так, у роботі [6] проведений аналіз ризику зіткнень за допомогою даних автоматичної ідентифікаційної системи (АІС) у Сінгапурській протоці. У роботі [7] за допомогою байєсівської мережі виявлені змінні, що впливають на аварійність. Моу та ін. запропонували динамічний метод аналізу ризику зіткнень у порту Роттердама [8].

Аварії з розливом нафти також постійно знаходяться у центрі уваги. У роботі [9] запропоновані критерії економічної ефективності для заходів із запобігання розливам нафти. У роботі [10] проаналізовано інциденти з розливом нафти у водах Португалії, у роботі [11] зроблено прогноз траєкторії розливу нафти у відкритому морі, а у роботі [12] проведений аналіз ризику забруднення при аваріях з розливом нафти.

Також велике значення для морських перевезень мають аварії з пожежами [13] і затопленнями [14-18].

Причинами вторинних аварій часто є зіткнення і посадки на мілину [19], які посідають друге-третє місце серед усіх видів морських аварій [20, 21]. У статті [22] запропонована процедура аналізу зіткнення суден і посадки на мілину, а у [23] надано детальний огляд аварій на мілині з точки зору управління ризиками. Можливості аналізу методом скінченних елементів для моделювання аварій під час зіткнення і посадки на мілину розглянуті у [24]. Про те, що людська помилка є ключовим фактором, що сприяє виникненню аварій під час посадки на мілину, виявлено у [25], а про роль людини та її втому у виникненні таких інцидентів ведеться у [26]. На кодифікації аварій під час посадки на мілину зосереджена увага у роботі [27].

На теперішній час достатньо глибоко оцінені механізми зниження ризику при посадці судна на мілину. Трирівнева ієрархічна СППР для опрацювання суден, що вийшли з-під контролю, розглядається у роботі [28], СППР для пошуку і порятунку – у [29], знанняорієнтована СППР для контролю ушкоджень на суднах – у [30], використання технології віртуальної реальності для контролю ушкоджень на суднах – у [31], СППР під час аварій, пов'язаних із затопленнями, – у [14, 15, 18], у т. ч. у портових зонах [32], й управління безпекою [33].

Таким чином, питання реагування систем підтримки прийняття рішень (СППР) на ранніх стадіях при посадці судна на міліну поки залишилися поза сферою активних досліджень.

Метою дослідження є розробка структури судової СППР та методу підтримки прийняття рішень для управління судном, яке знаходиться у деградованому стані, у важких умовах моря при посадці на міліну для оцінки наслідків такої події.

Мету пропонується досягати шляхом аналізу аварійних сигналів, проведення їхньої ієрархізації, створення відповідного графічного інтерфейсу та відображення необхідної інформації на борту судна на потрібному рівні для осіб, які приймають рішення (ОПР).

Для ефективного функціонування систем підтримки прийняття рішень береговими командними центрами (БКЦ) і центрами управління рухом суден (ЦУРС) здійснюється автоматизоване передавання даних про технічний стан бортових систем судна на берег.

Введення до складу бортових систем виявлення і моніторингу модулів управління технічним станом дозволяє розширити перелік систем, що контролюються, та оцінювати можливості їх допоміжних функцій.

Правильне подання й використання на судні інформації особами, які приймають рішення, на борту і на березі на кожному рівні в обраних критичних сценаріях, є найважливішим аспектом забезпечення запобігання катастрофічним наслідкам.

Виклад основного матеріалу дослідження. Наявні ієрархічні моделі, застосовані до суден, що сіли на міліну, характеризуються такими недоліками:

- а) неможливість інтуїтивного уявлення впливових факторів на альтернативи;
- б) складнощі врахування та ігнорування впливових чинників, що свідчить про недостатню гнучкість моделі;
- в) нездатність врахування різних невизначеностей у моделі.

В умовах нормальної експлуатації судна доступ до інформації про стан бортових систем надається тільки береговому офісу або агенту. У критичній ситуації ця інформація надходить також до зовнішніх ОПР, наприклад пошуково-рятувальної команди і берегових служб спеціалізованої підтримки.

Розширення функціональності такої системи позитивно відбивається на проведенні ретельнішого моніторингу стану судна з БКЦ і ЦУРС, якіснішій інтеграції ресурсів судна і берега і, нарешті, ефективній допомозі судну з боку берегових кризових команд у разі необхідності. Запропонований інструментарій підтримки прийняття рішень на березі має забезпечити поліпшену маршрутизацію суден у критичних районах на основі отриманих даних про стан корпусу, механізмів, маневреність та метеорологічну обстановку тощо.

Технічні характеристики підсистеми передавання інформації між судном і берегом мають бути настільки досконалими, щоб забезпечувати задані швидкісні і надійнісні вимоги щодо передавання даних про стан судна і бортових систем, одночасно забезпечуючи відсіювання несуттєвої інформації для роботи СППР. Виявлення такої несуттєвої інформації – це окрема, дуже відповідальна ділянка роботи, яка не розглядається у даній статті.

Найгіршим результатом критичної події для судна є неконтрольоване руйнування, затоплення або його посадка на міліну. Затонуле судно роками може бути джерелом витікання нафти, будучи постійною загрозою забруднення навколишнього середовища, про що наочно свідчить аварія судна Prestige.

Альтернативою неконтрольованого руйнування у критичній ситуації є контрольована посадка судна на міліну в захищених водах, що дозволить, як мінімум, значно зменшити негативні наслідки події, а як максимум, безпечно злити нафту.

Однак посадка судна на міліну сама по собі є ризикованим заходом із важко прогнозованими наслідками. І враховуючи, що можливості ОПР для оцінки наслідків такого рішення, є дуже обмеженими, необхідно запропонувати СППР для зменшення ризиків такого заходу. Відповідно, необхідні прості процедури та інструменти для аналізу наслідків посадки судна на міліну.

Системи моніторингу стану корпусу і вантажного комп'ютеру (loading computer) тощо є для СППР джерелами початкової інформації, наприклад спрощених чисельних моделей міцності балок корпусу. Обрані сценарії посадки на мілину певних типів суден дозволяють отримати параметричні формули для оцінки ушкоджень і сили контакту між судном і морським дном. В остаточну оцінку додається навантаження від нерухокої води, динамічне навантаження від хвиль і припливів, а також місцеві контактні сили від морського дна.

Окрім модулів СППР інтегруються в загальне сховище даних і загальний людино-машинний інтерфейс (ЛМІ), функціональні взаємозв'язки між якими показано на рис. 1.

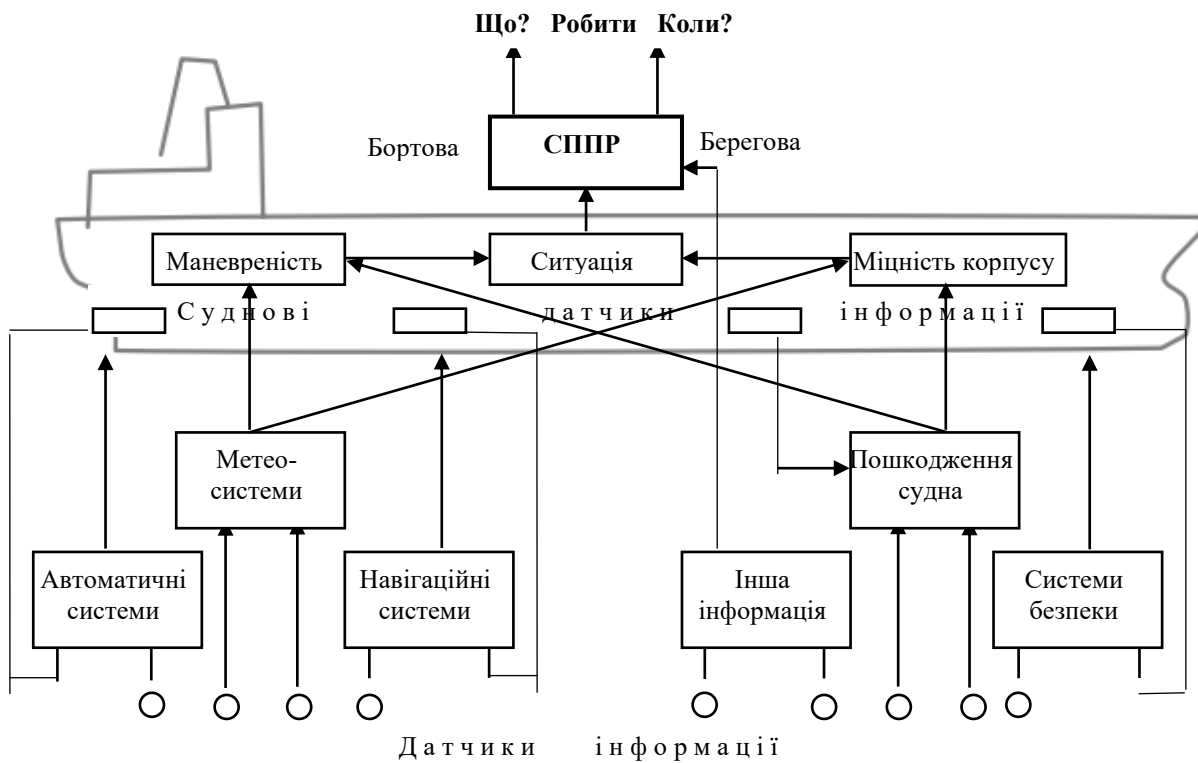


Рисунок 1 – Інформаційні потоки, що визначають функціональні взаємозв'язки СППР (Джерело – розроблено автором)

Загальна архітектура СППР наведена на рис. 2. На цьому ж рисунку наведені шляхи передачі інформації між основними користувачами СППР:

- саме судно, в якому СППР інтегрована з підсистемами навігації (НС), безпеки (СБ) та автоматизації (АС);
- група управління аварійними ситуаціями берегового оператора;
- органи пошуку і рятування (ОПР);
- ЦУРС.

Крім зазначених категорій, користувачами СППР може бути береговий центр підтримки фахівців для проведення складніших аналізів (остійності, міцності та (або) аварійних ситуацій тощо).

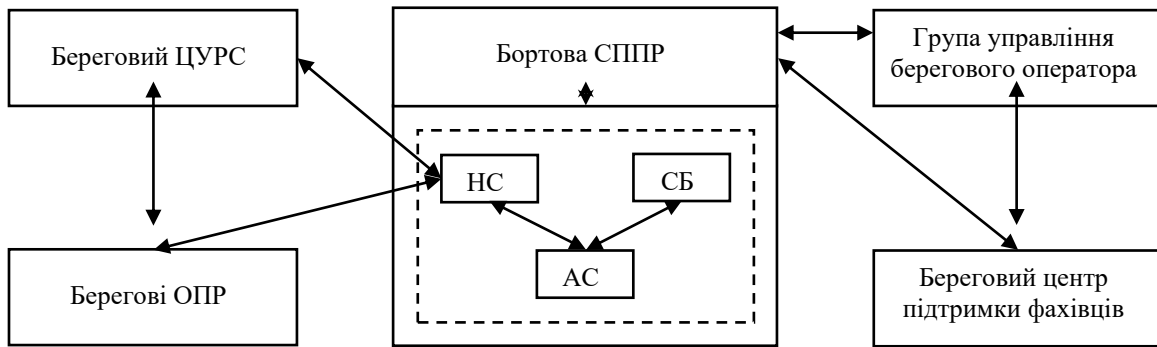


Рисунок 2 – Загальна архітектура системи підтримки прийняття рішень
(Джерело – розроблено автором)

Функціонування системи підтримки прийняття рішень для здійснення навмисної посадки на міліну пошкодженого судна відбувається так. Від різноманітних датчиків постійно надходить поточна інформація, яка обробляється вантажним комп'ютером судна у реальному масштабі часу. У разі виникнення аварійної ситуації проводиться моделювання можливої навмисної посадки судна на міліну, що є доповненням до вантажного комп'ютера судна. Цифрові моделі та статичні дані щодо судна зберігаються у фіксованому сховищі даних на борту судна і на березі.

У необхідному темпі оперативна інформація про рівень палива в цистернах, крен/диференціювання і стійкість до пошкоджень тощо надходить від відповідних датчиків, що передають інформацію до вантажного комп'ютера. Останній у фоновому режимі постійно проводить швидкі попередні аналізи ситуацій, що виникли. Паралельно поточні дані із заданою періодичністю передаються на берег для їх детального аналізу. Отримані результати й оцінки передаються на судно для оновлення інформації та оцінки результатів моделювання, виконаних вантажним комп'ютером, і вироблення рішення, адекватного ситуації, що склалася.

Функціонування СППР зручно подавати через сценарний підхід, який визначає взаємодію між найбільш важливими посадовими особами, до яких належать екіпаж, береговий офіс, пошуково-рятувальна команда і береговий центр підтримки фахівців. Даний підхід передбачає послідовність подій, реакцію на ці події, необхідну інформацію тощо для різних гіпотетичних подій на танкері або круїзному судні.

Сценарій 1.

1. У протоці Босфор у сильному тумані внаслідок тарану лівим бортом великим круїзним судном меншого судна стався збій у маневруванні. Необхідно визначити, чи збережеться стійкість круїзного судна, і прийняти рішення щодо необхідності збору та евакуації пасажирів і екіпажу та щодо безпечного доставлення судна в порт.

Первісна оцінка сценарію передбачає три альтернативні результати:

- 1) судно може дійти до безпечної гавані;
- 2) судно перебуває на плаву і чекає рятувальників для евакуації пасажирів та екіпажу;
- 3) покидання судна пасажирами та екіпажем.

Основні етапи розвитку сценарію:

- а) оцінка ситуації та вжиття негайних дій для її утримання та/або зміцнення;
- б) стабілізація судна в разі потрапляння води всередину;
- в) оцінка достатності остійності;
- г) перевірка технічного стану судна для оцінки його можливості дістатися до порту;
- д) оцінка пошкоджень і поточного стану пропульсивної та маневреної систем та їхнього впливу на маневреність судна;
- е) постійний контроль за ситуацією та оцінка швидкого прийняття альтернативних дій у разі різкої зміни обстановки;

- ж) зв'язок зі службою порятунку та організація безпечної евакуації пасажирів, що дає змогу розглядати евакуацію як прийнятну ситуацію;
- з) початок руху до порту;
- і) посилення затоплення, що призводить до загострення ситуації;
- к) планування посадки судна на міліну поблизу порту;
- л) планування відтягування судна на мілководдя буксирами і посадка його там на міліну;
- м) евакуація.

Сценарій 2.

2. Круїзне судно втрачає хід на виході з порту Одеси і на відносно невеликій швидкості сідає на піщану міліну. Приплив зворотний, але через годину він зміниться. Виникають проблеми під час запуску допоміжних двигунів. Необхідно визначити можливість безпечного транспортування судна в порт.

Основні етапи розвитку сценарію:

- а) оцінка ситуації показує відсутність у поточний момент безпосередньої небезпеки судну, неможливість збереження його стійкості під час відпливу і необхідність оцінити ситуацію на березі;
- б) труднощі із запуском допоміжних двигунів, накопичення води у відстійниках, що вимагає усунення проблеми;
- в) оцінка ситуації показує безпеку відтягування судна протягом трьох годин до початку відливу;
- г) моделювання різних сценаріїв при втраті потужності двигуна при звільненні судна у вузьких водах;
- д) перевірка технічного стану судна для виявлення можливих несподіванок;
- е) відрив судна і його транспортування в порт для перевірки систем і корпусу.

Сценарій 3.

3. Танкер перебуває в плаванні в північній частині Чорного моря поруч із портом і стикається з майже зануреним у воду плаваючим об'єктом. Виявлено пошкодження корпусу і затоплення деяких відсіків, пошкодження і заклинювання керма. Необхідно оцінити можливість належним чином керувати судном і безпечно досягнення порту.

Основні етапи розвитку сценарію:

- а) наближення сильної негоди, і неможливість досягнення безпечного порту без загрози для структурної цілісності;
- б) оцінка можливості переміщення судна у відкрите море або в безпечну гавань із нанесеним на карту місцем посадки на міліну;
- в) вибір безпечної гавані та планування можливої посадки на міліну за неможливості обмеження подальшого проникнення води.

Складність посадки судна на міліну визначається неможливістю апріорної оцінки сили посадки, яка залежить від опору проникненню перешкоди в днище судна. У свою чергу, вм'ятина залежить від крену, тангажу і крену судна під час проходження над перешкодою. Основною проблемою, що виникає під час посадки судна на міліну, вважається глибоке дроблення і розрив днищевої обшивки, ребер жорсткості і балок на значній частині довжини судна, що вимагає застосування нелінійних методів скінченних елементів (НМСЕ). Але часові обмеження, які накладаються на розв'язання цієї задачі, та розмірність рівнянь не дозволяють отримати чисельне рішення у прийнятний час.

Тому у теперішній час основні зусилля зосереджені на чисельному аналізі суден, що сідають на міліну [34, 35]. Для оцінювання безпеки танкерів була розроблена комп'ютерна програма DAMAGE [37]. Дана програма реалізує спрощені методи прогнозування розсіювання пластичної енергії в конструктивних елементах судна у вигляді руйнування, розриву, складання панелей жорсткості тощо. У роботі запропонована теорія посадки судна на конічну скелю [38]. Описані у [34] еталонні випробування дозволили перевірити розроблені спрощені методи або вдосконалений НМСЕ.

Моделювання посадки, у т.ч. навмисної, аварійних суден посадки на мілину за допомогою СПІР виконуватиметься протягом декількох секунд. Для досягнення таких показників розділено рух жорсткого тіла і опір проникненню донної конструкції. Для цього заздалегідь вводяться відомі співвідношення проникнення для типових конструкцій днища судна, викладені у [39]. На рис.3 наведена структура методу підтримки прийняття рішень для управління судном, яке знаходиться у деградованому стані, у важких умовах моря при посадці на мілину для оцінки наслідків у разі навмисного затоплення судна.

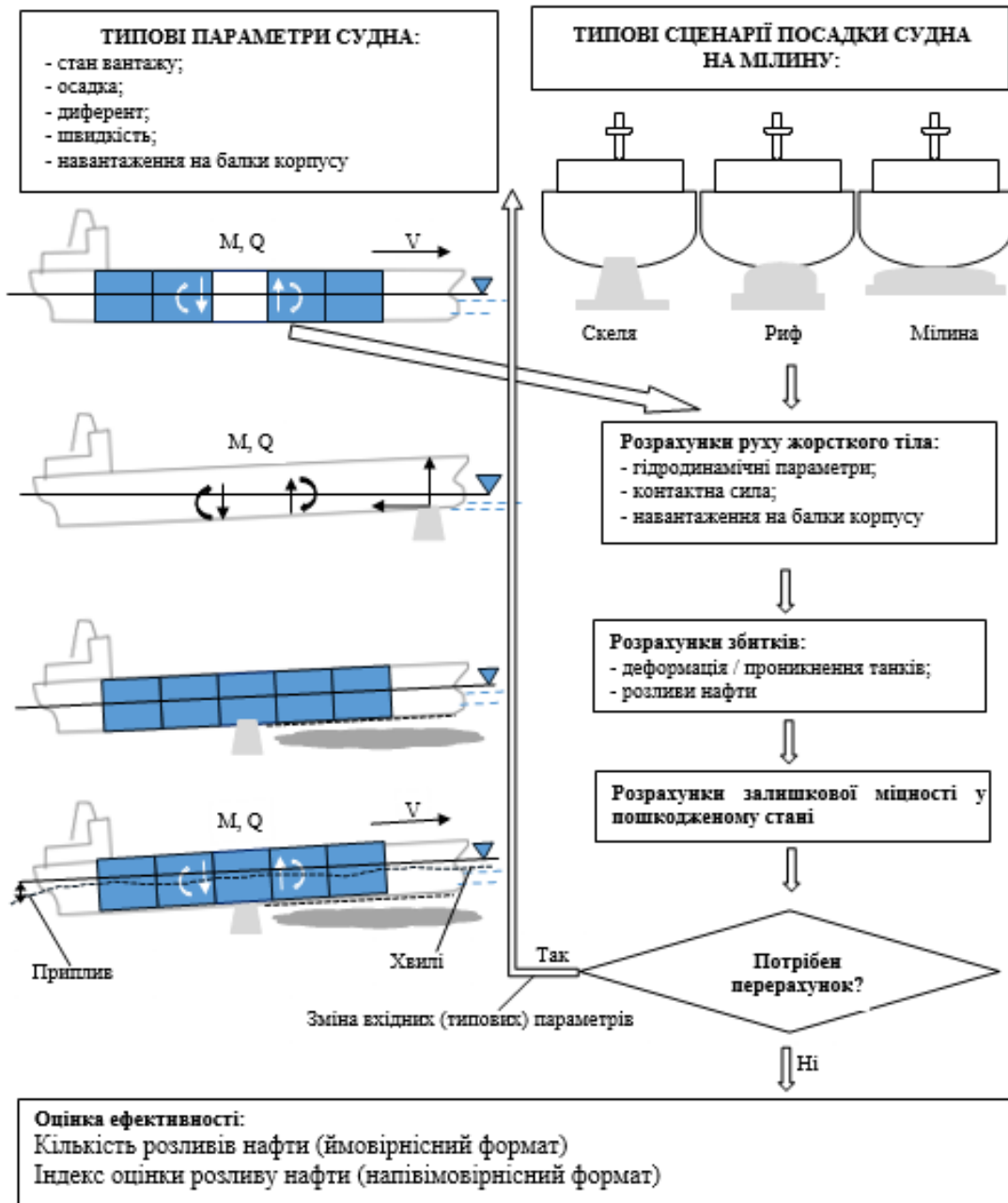


Рисунок 3 – Метод розрахунку безпеки здійснення навмисної посадки аварійних суден на мілину у районі порту за допомогою системи підтримки прийняття рішень (Джерело – розроблено автором)

Метод працює таким чином. Після введення типових параметрів судна та базових сценаріїв посадки судна на мілину на першому етапі рух судна представляється у вигляді опису його як руху жорсткого тіла й навантаження. Зазвичай рух жорсткого тіла

представляється шістьма ступенями свободи – креном, тангажом, креном у вертикальній площині та спливанням, розгойдування, нищпоренням – у горизонтальній. Слабкість між даними характеристиками дозволяє проігнорувати зв'язок між ними під час аналізу посадки судна на мілину. Вертикальний рух визначається, виходячи з гідростатичних міркувань за допомогою вантажного комп'ютера, включно з силою контакту з ґрунтом.

Аналіз вертикального руху й остійності судна здійснюється за такими вихідними даними:

- гідродинамічні характеристики судна;
- розподіл легкої ваги судна;
- стан вантажу, включно зі станом бункерування і потенційно затоплених відсіків;
- початкова осадка і диферент, розраховані на основі попередньої інформації;
- вплив навантаження на балку корпусу (напруга), отримані від системи моніторингу або альтернативно оцінені на основі вищевказаної інформації.

Перехідними динамічними силами при навмисній посадці судна на мілину зазвичай нехтують через повільність процесу.

Ефект посадки на мілину представляється концентрованою силою, що відповідає миттєвому вдавненню морського дна в днище судна під час контакту в одній точці або серії комутаційних навантажень, якщо посадка на мілину відбувається на великій площі. У визначений момент часу розрахункова сила посадки на мілину вводиться в вантажний комп'ютер. Оновлені значення середньої осадки, диференту і кута крену в наступний момент часу надають необхідну інформацію для розрахунку наступного рівня вдавнення морського дна в днище, а отже, нової сили посадки на мілину (рис. 4).

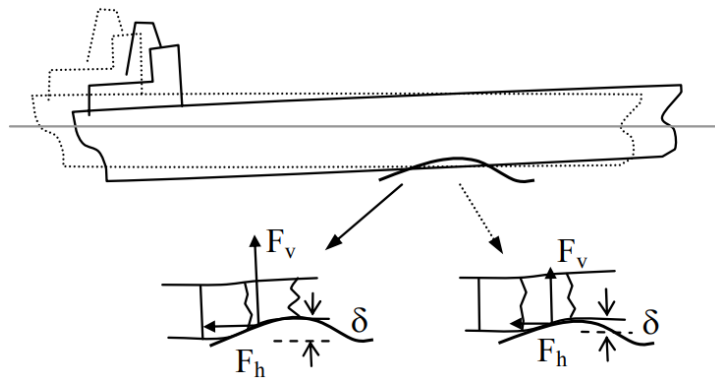


Рисунок 4 – Модель процесу посадки судна на мілину
(Джерело – розроблено автором)

Вантажний комп'ютер враховує будь-яке зниження міцності через пошкодження днища шляхом оцінки впливу навантаження на балку корпусу. Тобто оцінюється глобальний згинальний момент F_v і зсувна сила F_h , включно з впливом сили посадки на мілину з урахуванням наявного опору балок корпусу на зсув і вигин. У правилах класифікації суден наведені вимоги до опору балок корпусу в неушкодженому і пошкодженому стані, хоча зазвичай граничні характеристики дещо вищі за викладені у вимогах.

Основний вплив (приблизно 65%) на загальне розрахункове навантаження на балку корпусу судна здійснюють хвилі. Навмисне зняття з мілини характеризується відносно невеликими хвилювими навантаження порівняно з розрахунковими. За цієї причини при посадці на мілину допускається таке навантаження на нерухому воду, що значно перевищує розрахункові значення.

Графічне відображення граничного опору балки корпусу судна на вигин разом із поточним використанням у вигляді навантажень на нерухому воду і хвилювання наведено на рис.5. Пошкодження панелей днища викликає передбачуване зниження вантажопідйомності і представляється у вигляді спаду на кривій вантажопідйомності. Прогнозоване погіршення погоди призводить до прогнозованого збільшення хвилювих навантажень, а прогресуючий розвиток пошкоджень викликає зменшення міцності. Природно, що на навантаження на

нерухому воду також впливають зміни сили контакту, затоплення або витікання води з резервуарів тощо.

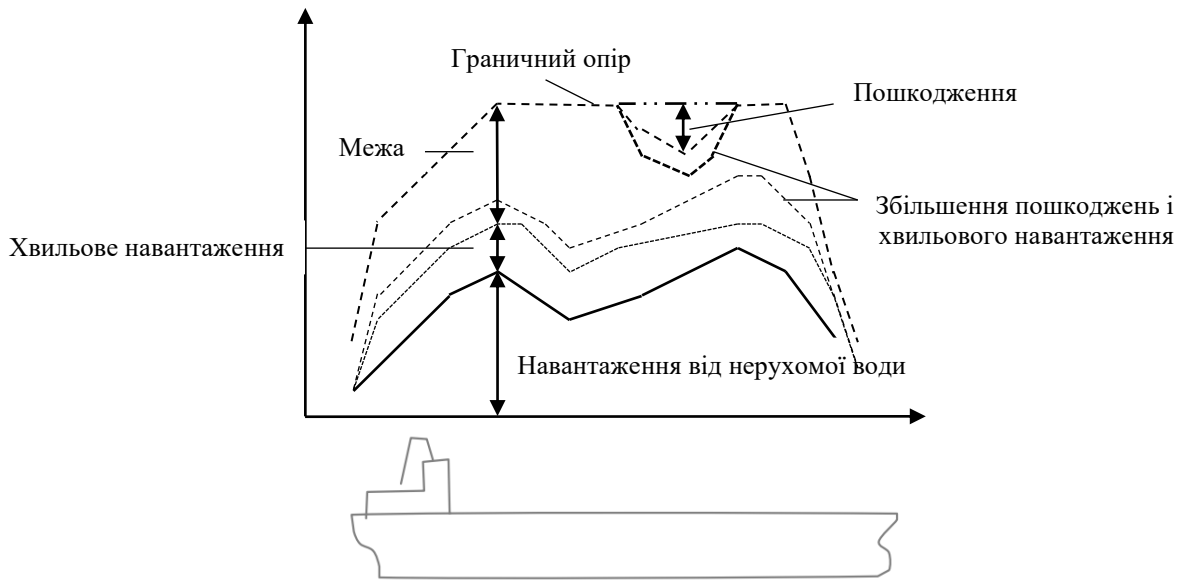


Рисунок 5 – Розподіл згинальних моментів балок корпусу
(Джерело – розроблено автором)

Розрахунок зусилля на ґрунті. Для розрахунку опору проникненню в конструкцію днища використовуються феноменологічні чисельні формули. Конструкція днища судна по всій вантажній площі характеризується сталістю, що дозволяє при моделюванні опору проникненню використовувати тільки частину судна, наприклад довжину танка. Тоді постійна вм'ятина на днищі розглядається як вдавнення перешкоди на обрану відстань у дно з подальшим рухом уздовж судна. Розглянута достатньо велика кількість різних рівнів вдавлювання днища дозволяє узагальнити дані про вертикальну і горизонтальну складові контактної сили у стійкому стані. Отримані значення опору для різних рівнів вдавлювання дозволяють із застосуванням методу інтерполяції визначити фактичний опір, розрахований під час руху жорсткого тіла. Перед колізією перегородкою, тобто для носової частини судна, необхідно проводити окремі розрахунки.

Кожна розмірна категорія типу судна представляється порівняно невеликою кількістю характерних груп, що гарантується однаковими конструктивними схемами побудови, визначеними правилами класифікації суден. Запропонований метод дозволяє визначити опір проникненню для кожної групи суден для різних типів і характеристик морського дна.

За результатами, отриманими у роботі [42], можна оцінити близькість теоретичних викладок ті експериментальних даних. Експеримент із моделлю подвійного дна, що зазнала бічного вдавнення перешкодою конічної форми, показало хорошу збіжність з чисельним моделюванням. А розбіжності пояснюються передчасним розривом зварного шва та/або геометричними неточностями.

Крім розрахунку пошкоджень під час посадки на мілину, даний метод також дозволяє проаналізувати потенційне руйнування корпусу судна, що перебуває на мілині, через вплив припливів і хвиль, а також можливе витікання вантажу та/або затоплення танків. Результати таких розрахунків можуть бути використані для оцінки сили, необхідної для відриву судна від ґрунту. Також наведені розрахунки дозволяють здійснити прогноз потенційного розвитку пошкоджень, тобто навантаження на балки корпусу та оцінка міцності, якщо судно залишиться на мілині, а саме інформацію про:

- ймовірні пошкодження днища судна внаслідок посадки на мілину;

- розрив вантажних танків;
- обсяг розливу вантажу;
- напругу в балках корпусу, яка потребує порівняння з граничним опором балок.

Графіки залежності контактної сили від зсуву, викликаного вдавненням, для танкера під час посадки судна на риф, представленого вузьким і гострим конусом (графіка) і тупим конусом (графік б), наведені на рис. 6 [39], дозволяють будувати спрощені криві вдавлювання для СППР під час моделювання руху балки жорсткого корпусу.

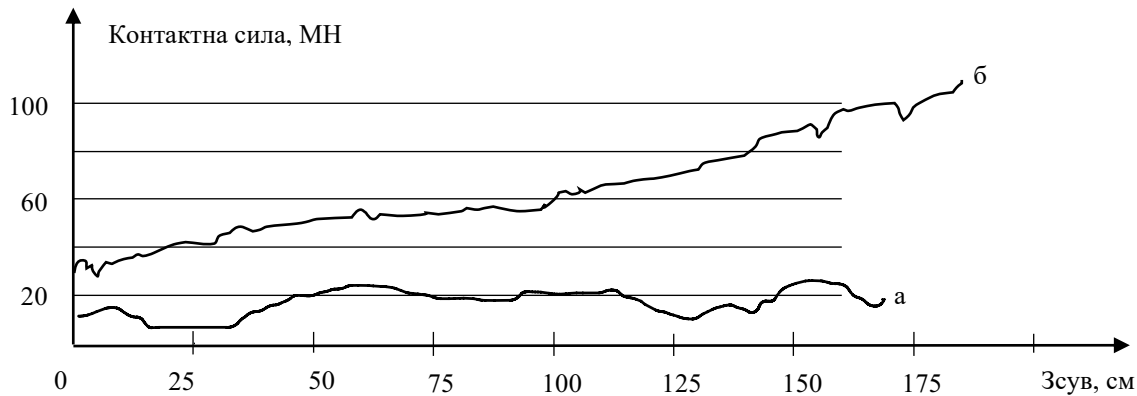


Рисунок 6 – Залежність сили від вдавлювання для вузького і тупого морського дна (Джерело – за даними [39])

Проведене моделювання руху танкера з різними швидкостями та різними висотами піднесення перешкод над осадкою танкера. Так, за результатами моделювання доведено, що при швидкості 4 м/с у момент посадки на міліну в разі піднесення перешкоди на 4 м над середньою осадкою судна при вузькому конусі ушкоджується більша частина балки корпусу, а при тупій перешкоді – лише перший танк.

Руйнування. Моделювання пошкоджень днища судна дозволяє визначити критичні деталі і зародження та поширення тріщин з подальшим прогнозуванням руйнування зовнішньої обшивки для однокорпусних танкерів і внутрішнього днища для двокорпусних танкерів. Найчастіше використовуваним параметром руйнування в моделі скінченних елементів (СЕ) є еквівалентна пластична деформація ε_{cr} . У разі перевищення значення критичної деформації елемент у моделі КЕ видаляється або зв'язки між елементами розриваються і моделюються руйнування.

Однак постійність параметра ε_{cr} обмежує моделювання пошкоджень. Крім того, практикою доведено, що ефективна деформація змінюється за різних типів напружень (для чистого розтягування, зсуву і їхніх комбінацій). Тобто результати моделювання для великого розкиду напружених станів є дещо грубими. Для подолання цих проблем можуть використовуватися інші моделі руйнування, наприклад моделі зростання пустот [42, 43]. Дана модель базується на введенні тривісних станів напружень σ_m/σ_{eq} , яке визначається через середнє напруження σ_m і еквівалентне напруження σ_{eq} . На жаль, у даних моделях в основному розглядають розтягування як основний тип напружень у тривісному режимі. Для охоплення всього діапазону тривісних напружень необхідно поєднувати різні моделі: модель руйнування, що використовує формулу Кроккрофта-Латама для нижнього діапазону тривісності $-1/3 < \sigma_m/\sigma_{eq} < 0$, і модель МакКлінтока для верхнього режиму $\sigma_m/\sigma_{eq} > 1/3$ [44]. Зона з переважанням зсуву $0 < \sigma_m/\sigma_{eq} < 1/3$ визначається експериментами і чисельним моделюванням.

Гарні результати прогнозування поведінки поширення тріщини та глобального деформаційного відгуку при поєднанні скінченно-елементних кодів і моделей руйнування досягаються лише за умови адаптації методу руйнування до розміру та форми сітки моделі. Це

пояснюється сильною залежністю моделі SE від розміру сітки, коли різні розміри комірок при моделюванні однакового завдання є причиною різних прогнозів напружень і деформацій. Отже, застосування у моделях руйнування виключно значень деформації або пошкодження елемента є основною причиною різних допусків на руйнування і, отже, до різної поведінки конструкції.

Для зменшення впливу розміру комірок впроваджено усереднення параметрів руйнування за певним об'ємом [45], що вимагає знання критичних значень тріщин в усередненому об'ємі. Заздалегідь визначені залежності величини пошкодження від розміру елемента дозволяють визначити параметри руйнування. Метод є дуже ефективним в задачах із відносно великими розмірами комірок, наприклад, при моделюванні посадки суден на мілину [46].

Вплив топології дна. Першорядну важливість при оцінці можливих руйнувань у місці посадки судна на мілину грають умови морського дна. А ці умови можуть варіюватися від м'якого дна (глина, пісок) до різких, жорстких перешкод, наприклад гострих вершин. У критичних ситуаціях важливе значення має дослідження характеристик морського дна в потенційних місцях посадки на мілину й оцінка їхньої функціональності. При наявності часу та можливостей необхідно прийняти певні заходи щодо підготовки морського дна для вирівнювання поверхні та видалення несприятливих перешкод. Таким чином, при моделюванні пошкоджень днища судна обов'язково враховуватимуть фактичні умови морського дна.

Крім вказаних вище факторів, що впливають на балку корпусу в місці посадки на мілину, необхідно також враховувати вплив умов навколишнього середовища. Приливні коливання, мілководдя, вітер і хвилі можуть значно змінювати диферент та/або осадку судна, що сіло на мілину, і, тим самим, призвести до надмірних зусиль на балці корпусу, навіть у захищених водах.

Рух у горизонтальній площині переважно являє собою поздовжнє уповільнення судна до повної зупинки. У разі сильного зміщення точка посадки на мілину від центру може статися деяке зачеплення. У разі недостатньо доброго пришвартування судна, що сіло на мілину, можливе розгойдування і/або зачеплення через вітер і хвилі.

СППР має бути здатною впоратися з більш складними сценаріями, коли, наприклад за недостатністю функціоналу системи аварійного реагування танкер може бути викинутий на берег у дуже несприятливому місці (нерівне морське дно, високий ступінь впливу довкілля тощо) або в місці з дуже обмеженою інформацією, і з цим випадком.

Висновки. Представлено розрахункову модель для оцінки пошкоджень днища і навантажень на балки корпусу судна під час посадки на мілину. Результати моделювання дозволяють передбачити наслідки з такою точністю, щоб із високим ступенем упевненості прийняти рішення про можливість безпечної посадки судна, що вийшло з ладу, на мілину (цілісність зберігається, розлив нафти відсутній або мінімальний). Крім надійності, розрахунки мають виконуватися протягом декількох секунд для швидкої оцінки альтернативних дій зі збереження цілісності судна. Роботу присвячено розробленню системи підтримки прийняття рішень для суден, що перебувають в аварійному стані, загалом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Antão, P., Almeida, T., Jacinto, C., Guedes Soares, C., 2008. Causes of occupational accidents in the fishing sector in Portugal. *Safety Science* 46, 885–899.
2. Goerlandt, F., Kujala, P., 2014. On the reliability and validity of ship–ship collision risk analysis in light of different perspectives on risk. *Safety Science* 62, 348–365.
3. Karahalios, H., 2014. The contribution of risk management in ship management: The case of ship collision. *Safety Science* 63, 104–114.

4. Perera, L.P., Carvalho, J.P., Guedes Soares, C., 2012. Intelligent Ocean Navigation and Fuzzy-Bayesian Decision-Action Formulation. *Journal of Oceanic Engineering (IEEE)* 37, 204–219.
5. Wang, Y., Zhang, J., Chen, X., Chu, X., Yan, X., 2013. A spatial–temporal forensic analysis for inland–water ship collisions using AIS data. *Safety Science* 57, 187–202.
6. Qu, X., Meng, Q., Suyi, L., 2011. Ship collision risk assessment for the Singapore Strait. *Accid Anal Prev* 43, 2030–2036.
7. Hänninen, M., Kujala, P., 2012. Influences of variables on ship collision probability in a Bayesian belief network model. *Reliability Engineering & System Safety* 102, 27–40.
8. Mou, J.M., Tak, C.v.d., Ligteringen, H., 2010. Study on collision avoidance in busy waterways by using AIS data. *Ocean Engineering* 37, 483–490.
9. Vanem, E., Endresen, Ø., Skjong, R., 2008. Cost-effectiveness criteria for marine oil spill preventive measures. *Reliability Engineering & System Safety* 93, 1354–1368.
10. Gouveia, J.V., Guedes Soares, C., 2010. Oil Spill Incidents in Portuguese Waters, In: Guedes Soares, C., J. P. (Eds.), *Advanced Ship Design for Pollution Prevention* Taylor & Francis Group, London, pp. 217–223.
11. Sebastião, P., Guedes Soares, C., 2007. Uncertainty in predictions of oil spill trajectories in open sea. *Ocean Engineering* 34, 576–584.
12. Lee, M., Jung, J.Y., 2015. Pollution risk assessment of oil spill accidents in Garorim Bay of Korea. *Mar Pollut Bull* 100, 297–303.
13. Soner, O., Asan, U., Celik, M., 2015. Use of HFACS–FCM in fire prevention modelling on board ships. *Safety Science* 77, 25–41.
14. Jasionowski, A., 2011. Decision support for ship flooding crisis management. *Ocean Engineering* 38, 1568–1581.
15. Ölçer, A.İ., Majumder, J., 2006. A Case-based Decision Support System for Flooding Crises Onboard Ships. *Quality and Reliability Engineering International* 22, 59–78.
16. Santos, T.A., Guedes Soares, C., 2005. Monte Carlo simulation of damaged ship survivability. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* 219, 25–35.
17. Santos, T.A., Guedes Soares, C., 2009. Numerical assessment of factors affecting the survivability of damaged ro–ro ships in waves. *Ocean Engineering* 36, 797–809.
18. Varela, J., Rodrigues, J., Guedes Soares, C., 2014. On-board Decision Support System for Ship Flooding Emergency Response. *Procedia Computer Science* 29, 1688–1700.
19. Goerlandt, F., Montewka, J., 2015. A framework for risk analysis of maritime transportation systems: A case study for oil spill from tankers in a ship–ship collision. *Safety Science* 76, 42–66.
20. Yip, T.L., 2008. Port traffic risks – A study of accidents in Hong Kong waters. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 44, 921–931.
21. Zhang, D., Yan, X.P., Yang, Z.L., Wall, A., Wang, J., 2013. Incorporation of formal safety assessment and Bayesian network in navigational risk estimation of the Yangtze River. *Reliability Engineering & System Safety* 118, 93–105.
22. Pedersen, P.T., 2010. Review and application of ship collision and grounding analysis procedures. *Marine Structures* 23, 241–262..
23. Mazaheri, A., Montewka, J., Kujala, P., 2014. Modeling the risk of ship grounding—a literature review from a risk management perspective. *WMU Journal of Maritime Affairs* 13, 269–297.
24. Kitamura, O., 2002. FEM approach to the simulation of collision and grounding damage. *Marine Structures* 15, 403–428.
25. Uğurlu, Ö., Yıldırım, U., Başar, E., 2015. Analysis of grounding accidents caused by human error. *Journal of Marine Science & Technology* 23.
26. van de Wiel, G., van Dorp, J.R., 2009. An oil outflow model for tanker collisions and groundings. *Annals of Operations Research* 187, 279–304.
26. Akhtar, M.J., Utne, I.B., 2014. Human fatigue’s effect on the risk of maritime groundings – A Bayesian Network modeling approach. *Safety Science* 62, 427–440.

27. Graziano, A., Teixeira, A.P., Guedes Soares, C., 2015. Application of TRACER taxonomy for the codification of grounding and collision accidents, In: Guedes Soares, C., Santos, T.A. (Eds.), *Maritime Technology and Engineering*. Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 215–226.
28. Wu, B., Yan, X., Wang, Y., Guedes Soares, C., 2016. Selection of maritime safety control options for NUC ships using a hybrid group decision-making approach. *Safety Science* 88, 108–122.
29. Abi-Zeid, I., Frost, J.R., 2005. SARPlan: A decision support system for Canadian Search and Rescue Operations. *European journal of operational research* 162, 630–653.
30. Calabrese, F., Corallo, A., Margherita, A., Zizzari, A.A., 2012. A knowledge-based decision support system for shipboard damage control. *Expert Systems with Applications* 39, 8204–8211.
31. Varela, J.M., Guedes Soares, C., 2007. A virtual environment for decision support in ship damage control. *IEEE Computer Graphics and Applications* 27, 58–69.
32. Mabrouki, C., Bentaleb, F., Mousrij, A., 2014. A decision support methodology for risk management within a port terminal. *Safety Science* 63, 124–132.
33. Akyuz, E., Celik, M., 2014. A hybrid decision-making approach to measure effectiveness of safety management system implementations on-board ships. *Safety Science*, 169–179.
34. Mansour, A. and Ertekin, R.C. (eds.), 2003, Proc. 15th Int. Ships and Offshore Structures Congress, ISSC, San Diego, USA, 2003.
35. Wang, G., Spencer, J. and Chen, Y., 2001, Assessment of Ship's performance in accidents, 2nd Int. Conf. on Collision and Grounding of Ships, Copenhagen, Denmark, July, 2001.
36. Pedersen, P.T., 1994, Ship Grounding and Hull-Girder Strength, *J. Marine Structures*, 7(1994)1-29.
37. Simonsen, B. and Wierzbicki, T., 1997, *Tehoretical Manual on Grounding Damage of Ships*, Vol III, Report No. 59, Joint MITIndustry Program on tanker Safety.
38. Simonsen, B., 1997, *Mechanics of Ship Grounding*, PhD Thesis, Dept. Naval Arch. And Ocean Eng., Technical University of Denmark.
39. Amdahl, J., Kavlie, D, and Johansen, A., 1995. Tanker Grounding resistance. Proceedings of the 6th PRADS Conf., 2.1072-2.1083, Seoul, Korea.
40. Ohtsubo, H. and Sumi, Y. (eds.), 2000, Proc. 14th Int. Ships and Offshore Structures Congress, ISSC, Japan, 2000.
41. Wang, G., Chen, Y., Zhang, H. and Peng, H., 2002, Longitudinal Strength of Ships with Accidental Damages, *J. Marine Structures*, 15, 2002.
42. McClintock, F., A., 1968, A criterion for ductile fracture by growth of holes, *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*
43. Rice, J. and Tracey, D., 1969, On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields, *J Mechanics & Physics of Solids*, v 17, n 3, pp. 201-217..
44. Bao, Y., B., and Wierzbicki, T., 2004, On the fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 46, pp. 81-98.
45. Lee, Y., Wierzbicki, T. and Bao, Y., 2003. Necking, Fracture Initiation and Crack Propagation in Flat Tensile Specimens, MIT Impact and Crashworthiness Laboratory, Report no. 114..
46. Simonsen, B., C. and Törnqvist, R., 2004, Experimental and Numerical Modeling of Ductile Crack Propagation in Large-scale Shell Structures, *Marine Structures*, Vol. 17, pp. 1-27.

Khussein Y.

METHOD AND DECISION SUPPORT SYSTEM FOR THE INTENTIONAL EMERGENCY GROUNDING IN THE PORT LIMITS.

The aim of the study is to develop the structure of an onboard decision support system and a decision support method for managing a ship in a degraded state during high sea conditions when stranded, to assess the consequences of such an event. This goal is achieved by processing the initial data for selected scenarios and displaying the necessary information on board the ship for decision makers to assess the consequences of a deliberate grounding. The initial data of the method are the characteristic parameters of the basic types of vessels and typical grounding scenarios. The sources of

initial information are hull sensors and loading computer including on board sensors. Based on the selected grounding scenarios for certain types of vessels, parametric formulae can be derived to assess damage and contact forces between the vessel and the seabed, taking into account the load from still water, dynamic load from waves and tides, and local contact forces from the seabed. The decision support system integrates individual modules into a common data warehouse and a common human-machine interface. The most significant results are the development of the structure of the onboard decision support system and an appropriate method for managing a ship in a forced grounding, which allows decision makers to act effectively on board and ashore in selected critical scenarios. The significance of the obtained results lie in the development of a decision support method for controlling a ship in a degraded state when stranded, which is distinguished by the division of the grounding process into rigid body motion and resistance to penetration into the bottom structure, which is calculated on the basis of pre-established resistance dependencies, taking into account the degradation of the strength of the hull beams due to bottom damage and initial damage, thus allowing decisions to be made in real time and assessing the consequences of such an event (structural damages, water ingress or oil spillage). Thus, the studies have shown the effectiveness of the proposed approach for assessing ship control to limit sea loads so that hull damage does not spread to a critical level for the entire ship, and, in extreme cases, to assess the consequences of ship grounding.

Keywords: *decision support system, navigation, ship, grounding, decision maker, ship framing, damage, oil spill.*

УДК 629.5

doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.03**Сазін С.В., Матейко О.В.**

ОСОБЛИВОСТІ ІНЕРТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ТАНКІВ СУДЕН-ГАЗОВОЗІВ ПІД ЧАС ТРАНСПОРТУВАННЯ ВОГНЕНЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН

Розглянуті особливості обробки вантажних танків суден-газовозів під час транспортування вогнебезпечних речовин. Визначено, що найбільш надійним способом запобігання пожежам та вибухам в вантажних танках є їх інертизація. Наведені способи інертизації вантажних танків суден-газовозів. Виконано аналіз основних технологічних операцій, що безпосередньо пов'язані з процесом транспортування вогнебезпечних речовин, а саме інертизації, дегазації, вакуумування. Надані діаграми для визначення вибухонебезпечних концентрацій суміші різних вантажів з киснем. Виконано аналіз основних особливостей наступних способів навантаження: навантаження із поверненням парів вантажу, навантаження без повернення парів вантажу, навантаження з іншого судна, навантаження хімічних продуктів. Визначено, що всі технологічні операції з приймання, перевезення та видачі скраплених газів як вантажу, що перевозяться суднами-газовозами повинні виконуватися з суворим виконанням умов, що забезпечують їх безпеку, а також з урахуванням вимог постачальників та замовників цих вантажів.

Ключові слова: *вакуумування вантажних танків, дегазації вантажних танків, інертизація вантажних танків, інертний газ, морський транспорт, судна-газовози, транспортування зріджених газів.*

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. *Перевезення скрапленого газу суднами-газовозами є одним з розповсюджених способів транспортування енергоносіїв між континентами [1, 2]. Найбільш*