

## БАЛАСТУВАННЯ АВАРІЙНОГО СУДНА ПРИ ПОСАДЦІ НА МІЛИНУ

**Терлич С. В.**, к.т.н., доцент кафедри суднобудування та ремонту суден Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, e-mail: slavus.ter@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6044-3087

Реалізується методика баластування аварійного судна при посадці на ґрунт та запобігання його викидання силами хвиль та вітру на мілину. Мета досягнута шляхом створення та аналізу математичної моделі аварійного судна, яке підлягає баластуванню і в той же час дрейфує під впливом дій вітру та хвиль в умовах мілководдя та із високою ймовірністю викидання судна на мілину. Розглянуто математичну модель позиціонування судна при контакті із дном акваторії шляхом прийняття та переміщення рідкого баласту вздовж корпусу. Запропоновано розрахункові залежності та номограми для визначення раціональної кількості баласту, його позиціонування та переміщення. Надано рекомендації щодо запобігання дрейфу судна під час аварійного контакту із ґрунтом. З'ясовано, що запропоновані графічні залежності підвищують ефективність запобігання дрейфу аварійного судна та сприятимуть підготовці екіпажу судна до погіршення погодних умов, зменшенню ступеню пошкодження та об'єму рятувальних робіт.

**Ключові слова:** аварійне судно, посадка на мілину, мілководдя, хитавиця суден.

DOI: 10.33815/2313-4763.2020.2.23.050-057

**Постановка задачі.** Баластування аварійного судна після непередбаченої посадки на ґрунт відоме як найбільш ефективний спосіб запобігання подальшого викидання судна на мілину. Досвід морської практики [1, 2] та відповідні нормативні документи [3, 4, 5] визначають якісну сторону поставленого питання. У зв'язку з цим склалися твердження: якщо судно сіло на мілину, то прийняття рідкого баласту в будь-якій кількості створює сприятливу дію. Інший варіант – баластувати судно до припинення дрейфу, а при його поновленні продовжити приймання баласту. Зрозуміло, що такий підхід не сприяє стабілізації аварійної ситуації і крім того вносить невпевненість та неоднозначність дій екіпажів аварійних суден.

**Актуальність дослідження** полягає у тому, що кількісна регламентація баластування дозволить подолати відмічені недоліки та більш успішно використовувати цей метод при виконанні аварійно-рятувальних робіт.

Отримана **мета** досягнута шляхом створення та аналізу математичної моделі аварійного судна, яке підлягає баластуванню і в той же час дрейфує під впливом дій вітру та хвиль в умовах мілководдя та із високою ймовірністю викидання судна на мілину.

Прийнята гідродинамічна модель процесу викидання судна на мілину передбачає відповідну схематизацію фізичних явищ. У якості **наукового методу** прийнято положення лінійної гідродинамічної теорії хитавиці в умовах мілководдя згідно методики, запропонованою у роботі [6]. Силкові впливи вітру та хвиль на судно, яке дрейфує в зоні мілководдя приводить до періодичних ударів корпусу об ґрунт.

**Аналіз досліджень та публікацій за темою статті.** Вплив мілководдя на приєднані маси  $\lambda_{22}, \lambda_{33}$  площинного контуру отримано шляхом осереднення залежностей Т. Н. Хавелока, Ю. М. Гулієва, Д. Прохаски [7, 8] для шпангоутів із коефіцієнтом повноти від 0,7 до 0,9. Інтерполяційна залежність цього осереднення виражається коефіцієнтом:

$$\begin{aligned} k_{22} &= 1 + 2,5 \left( \frac{d}{H} \right)^{2,35}, \\ k_{33} &= 1 + 1,2 \left( \frac{d}{H} \right)^{2,40}, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $d$  – осадка судна, м;  $H$  – глибина акваторії, м.

В той же час залежності, які розглядаються отримано із дослідів вертикальної вібрації контурів на незбуреній вільній поверхні, тому не враховують параметрів хвилювання. Для наближеного оцінювання приєднаних мас судна при вертикальних коливаннях використовувались теоретичні залежності Д. Воссерса [9] для круглого циліндру, який здійснює коливання на мілкій воді, а також результати дослідження хитавиці великотоннажних суден на портових акваторіях, наведених В.В. Бурячком [10]. Для повністю розвинутого хвилювання ця залежність апроксимується виразом:

$$\varepsilon_{33}^h = \left( e^{\frac{d}{H}} - 0,45 \right) \left( \frac{\sigma_0^2 B}{2g} \right)^{0,1 \left( 1 + \frac{d}{H} \right)}, \quad (2)$$

де  $\sigma_0$  – частота хвилювання,  $\text{с}^{-1}$ ;  $B$  – розрахункова ширина судна, м;  $g = 10 \text{ м/с}^2$  – прискорення сили тяжіння.

**Результати дослідження.** На мілководді за мірою зменшення відносної глибини  $\frac{d}{H}$  істотно збільшуються приєднані маси корпусу судна  $\lambda_{22}, \lambda_{33}$ . Починає істотно домінувати вплив обтікання опорних площадок корпусу із нерівностями на міліні та кінцевостей корпусу судна. Гіпотеза площинних перерізів стає неприпустимою. Теоретичні та експериментальні залежності доводять, що:

$$\begin{cases} k_{22} \rightarrow \infty \\ k_{33} \rightarrow \infty \end{cases} \Big|_{\frac{d}{H} \rightarrow 1}, \quad (3)$$

у зв'язку з цим для збереження фізичного смислу коефіцієнтів необхідно задати їх числові значення. Враховуючи, що теоретичні залежності приєднаних мас  $\lambda_{22}, \lambda_{33}$  від відносної глибини  $\frac{d}{H}$ , рівних 1,1...1,25, є справедливими і для реальних умов ділянка корпусу до контакту з ґрунтом екстраполюється ступеневою функцією, яка апроксимує цю залежність. Після дослідження максимумів величини приєднаних мас  $\lambda_{22}, \lambda_{33}$  приймаються як константи. На базі обробки експериментальних даних В. Г. Павленко [11], а також досліджень Інституту гідромеханіки НАН України [12] для моделей побудованих суден та еліпсоїда обертання [2] зростання приєднаних мас при поперечно-вертикальній хитавиці більш точно у порівнянні із (1) можна апроксимувати як:

$$\begin{aligned} k_{22} &= 1,22 + 2,71 \left( \frac{d}{H} \right)^{2,38} \\ k_{33} &= 1,31 + 1,24 \left( \frac{d}{H} \right)^{2,47} \end{aligned} \quad (4)$$

Залежність приєднаних мас від частоти хитавиці приймаються аналогічно із залежністю (2):

$$\varepsilon_{22}^h = \varepsilon_{33}^h \frac{k_{22}}{k_{33}}. \quad (5)$$

Для мілководдя відношення  $\varepsilon_{22}^h = \frac{\lambda_{33}^h}{\lambda_{33}^\infty}$  виявилось близьким до відношення коефіцієнтів хвильового демпфування  $\frac{\mu_{33}^h}{\mu_{33}^\infty}$  [1]. У зв'язку із відсутністю даних про вплив

мілководдя на коефіцієнт демпфування поперечно-вертикальної хитавиці, вважається справедливим рівність:

$$\frac{\lambda_{22}^h}{\lambda_{22}^\infty} = \frac{\mu_{33}^h}{\mu_{33}^\infty}. \quad (6)$$

Із виходом на мілководдя морські хвилі видозмінюються. Довжини та висоти хвиль змінюються таким чином, що крупні хвилі зменшуються по довжині, а малі – зростають із висотою. Зростання висоти гребня та одночасне зменшення глибини западення враховується поправкою:

$$\delta h = 0,15 \left[ \frac{h}{H} \left( \frac{\lambda}{H} \right)^2 \right]^{0,1} \xi_A, \quad (7)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі, м;  $h$  – висота хвилі, м;  $\xi_A$  – абсциса хвилі, м.

Враховуючи вищенаведене, а також рівняння для гідродинамічних сил [9], складено систему рівнянь, яка описує процес викидання судна на мілину та відображає вплив баластування аварійного судна на даний процес. При цьому використано вже відомі залежності висоти хвилі від її частоти [6], а також застосовано рухому систему координат, яка використовується у кораблебудуванні (рис. 1). Тут і далі система  $(x; y; z)$  – рухома система координат відносно центру тяжіння судна  $G$ . Система  $(\xi; \eta; \zeta)$  є нерухомою системою координат відповідно центру коливань судна  $O$  під час хитавиці.

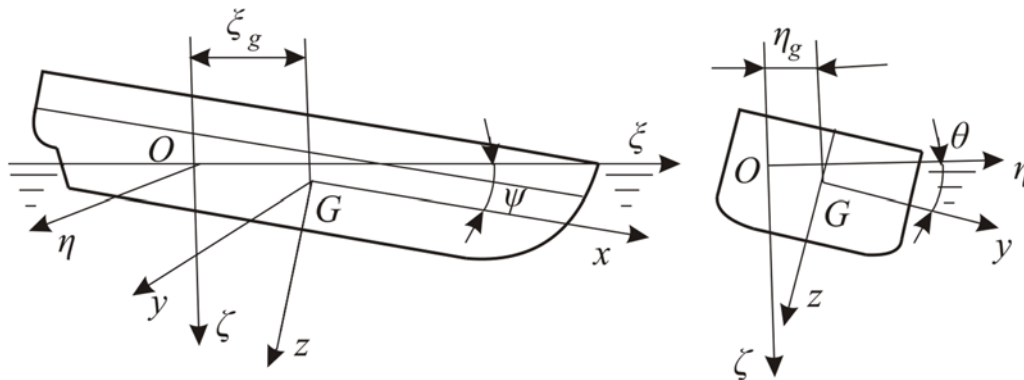


Рисунок 1 – Загальнокорабельна система координат при хитавиці судна

$$\begin{cases} (D + \lambda_{33}^h + P_B) \ddot{\xi}_g + \mu_{33}^h \dot{\xi}_g + \gamma S_0 \xi_g = \\ = \gamma S_0 (f_1 x_1^+ - f_2 x_2^-) (\xi_A e^{i\sigma_0 t} + \Delta h) - \sigma_0 \cdot c_W \cdot \text{cth}(k_0 \cdot H) \times (\lambda_{33}^h \sigma_0 - i \mu_{33}^h) (\xi_A e^{i\sigma_0 t} + \delta h); \\ (D + \lambda_{22}^h + P_B) \ddot{\eta}_g + \mu_{22}^h \dot{\eta}_g = \\ = i \gamma S_0 b_2 (\xi_A e^{i\sigma_0 t} + \delta h) + R_{ya} - R_{yr} + \sigma_0 \cdot \text{cth}(k_0 \cdot H \cdot c_W) \times (\mu_{22}^h + i \sigma_0 \lambda_{22}^h) (\xi_A e^{i\sigma_0 t} + \delta h); \\ \varepsilon_{33}^h = \left( e^{\frac{d}{H}} - 0,45 \right) \left( \frac{\sigma_0^2 B}{2g} \right)^{0,1 \left( 1 + \frac{d}{H} \right)}; \quad \lambda_{33}^h = \lambda_{33}^\infty \varepsilon_{33}^h; \quad \lambda_{22}^h = \lambda_{22}^\infty \varepsilon_{22}^h; \quad \mu_{33}^h = \mu_{33}^\infty \varepsilon_{33}^h; \quad \mu_{22}^h = \mu_{22}^\infty \varepsilon_{22}^h; \\ \Delta h = 0,15 \left[ \frac{h}{H} \left( \frac{\lambda}{H} \right)^2 \right]^{0,1} \xi_A; \\ \sigma_0 = 1,74 h^{-0,4}; \\ H = H_0 - \eta_g \text{tg} \alpha; \end{cases} \quad (8)$$

де перший вираз системи – рівняння вертикальної хитавиці; другий – рівняння поперечно-горизонтальної хитавиці; третій – змінення приєднаних мас та коефіцієнтів демпфування;

четвертий – поправка амплітуди хвилі при ході на мілководді; п'ятий – частота розвиненого хвилювання; шостий – зміни глибини при дрейфуванні на міліні;  $D$  – водотоннажність без баласту, кН;  $P_B$  – вага баласту, кН;  $\gamma$  – питома вага забортної води, кН/м<sup>3</sup>;  $S_0$  – площа ватерлінії, м<sup>2</sup>;  $f_1$  та  $f_2$  – відповідно площа носової та кормової частини ватерлінії, м<sup>2</sup>;  $x_1^+$  та  $x_2^-$  – відповідно центри тяжіння носової та кормової частин ватерлінії, м<sup>2</sup>;  $R_{ya}$ ,  $R_{yb}$  – відповідно опір обтікання корпусу та бортовий опір забортної води, кН;  $c_W$  – коефіцієнт повноти ватерлінії;  $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\zeta$  – відповідно абсциса, ордината та апліката нерухомої системи координат, м;  $\alpha$  – максимальний кут хвильового схилу, рад.

Для чисельного прикладу розглянуто два судна: багатоцільове судно типу ріка-море «Микола Бобровніков» проекту 17620 та буксиру «Бакай» проекту G06(B, F, K, L). Вибір саме цих суден визначається тим, що вони охоплюють широкий діапазон змін коефіцієнтів приєднаних мас та демпфування. Основні характеристики цих суден наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Головні характеристики теплоходів «Микола Бобровніков» та «Бакай»

Характеристика, одиниця вимірювання	Чисельні значення	
	«Микола Бобровніков»	«Бакай»
Водотоннажність, т	2270	625
Довжина між перпендикулярами, м	126,80	27,92
Ширина на міделі, м	16,6	9,70
Висота борту, м	6,70	4,80
Осадка по КВЛ, м	4,80	3,38
Водяний баласт, т	3485	53
Валова місткість, т	5180	355

Вплив баластування на параметри зіткнення корпусу із ґрунтом при висоті хвилі 2 м наведено на рис. 1.

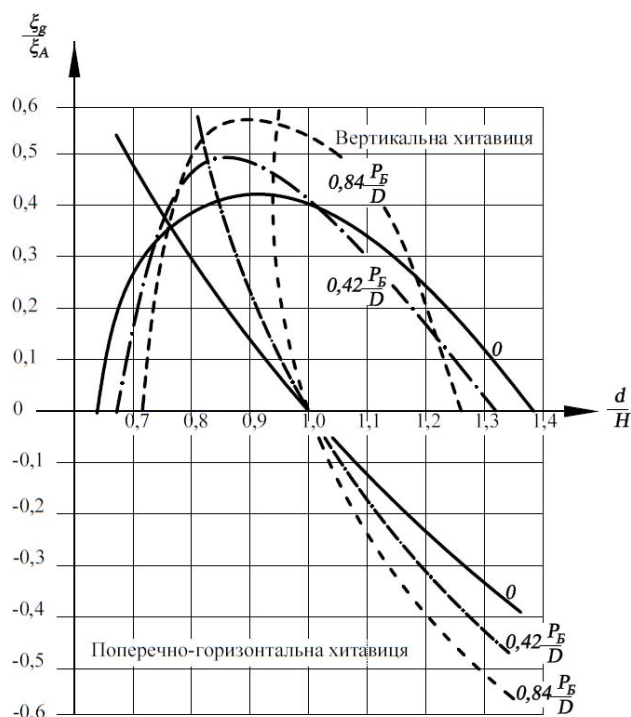


Рисунок 1 – Вплив баластування на параметри зіткнення корпусу із ґрунтом при  $h = 2$  м; відносна кількість баласту:

0; 
   $0,42 \frac{P_B}{D}$ ; 
   $0,84 \frac{P_B}{D}$

Із зростанням ступеня баластування  $\frac{P_B}{D}$  від 0 до 0,8 максимум швидкості зіткнення зміщується від  $\frac{d}{H}$  рівного 0,92 до 1,0 та зростає з 0,58 до 0,67  $\xi_A$ . Таким чином, баластування в процесі дрейфу доцільно проводити лише після досягнення  $\frac{d}{H}$  значення 1,2, тим самим запобігає зріст пошкоджень корпусу у порівнянні із ударами о ґрунт без баласту. Після розгляду граничних параметрів судна, яке випрошено на міліну при різних висотах хвиль та кількості прийнятого баласту побудовано діаграму (рис. 2). Робоче поле діаграми обмежується прямою  $\frac{d}{H_{кр}}$ , яка характеризує зону руйнування хвилями.

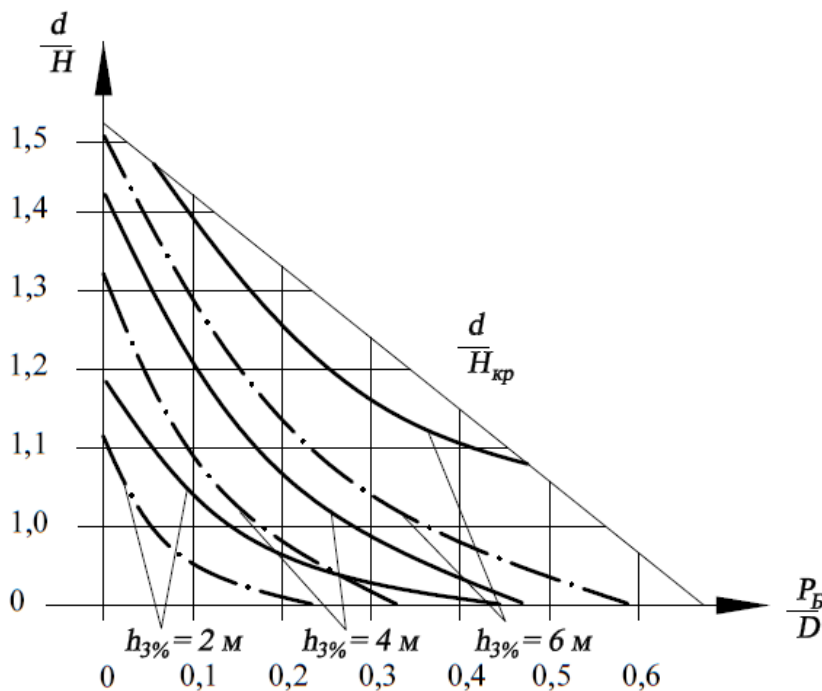


Рисунок 2 – Діаграма потрібного баластування судна:

————— для буксирних та промислових суден, - - - - - для транспортних суден

При визначенні потрібної кількості баласту для запобігання дрейфу необхідно «увійти» в діаграму із величиною відносної аварійної осадки  $\frac{d}{H}$  та інтерпольованим значенням висоти хвилі, яка спостерігається або очікується. Величина, яка розраховується знімається із точки їх перетину з вісі відносного баласту, як частина водотоннажності при осадці  $d$ .

**Аналіз отриманих результатів.** Порівняння результатів використання діаграми із даними фактичних баластувань доводить, що фактично прийнята кількість баласту на судах, які потрапили у аварію без вантажу – надлишкова, а на судах у вантажі – недостатня. Урахування динаміки у вказаних задачах знижує величину необхідного баласту приблизно в 1,5 рази при використанні у розрахунках хвиль із 3 % забезпеченістю.

Таким чином, наведена діаграма дозволяє визначити мінімальну кількість баласту, необхідну для запобігання дрейфу судна на міліні. Прийняття меншої кількості баласту недоцільно.

**Практичний приклад.** «Аварійне судно «сидить» на кам'янистому ґрунті, днище має великі пошкодження, забаластовано всі вільні танки, в трюмах знаходиться вантаж, який псується від солоної води, отримано штормове попередження», – дуже багато

подібних ситуацій описано на інтернет-порталах у науковій, довідковій та художній літературі [11–17].

Зрозуміло, що для прийняття раціонального рішення екіпажу необхідно знати мінімально можливу кількість рідкого баласту для того, щоб рішуче прийняти забортну воду в один трюм згідно розрахунку та не чекати, доки це «зробить» стихія через ушкоджене днище з усіма відсіками.

**Висновки з перспективами.** Використання запропонованої діаграми підвищить ефективність використання даного способу запобігання дрейфу аварійного судна, буде сприяти завчасній його підготовці до погіршення погодних умов, зменшенню ступеня пошкодження корпусу та об'єму аварійно-рятувальних робіт.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Яркін П. И. Управление судном. Одесса : ОНМА, 2006. 156 с.
2. Снопков В. И. Управление судном. учеб. для ВУЗзов. Санкт-Петербург : АНО НПО «Профессионал», 2004. 536 с.
3. Руководство по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. Санкт-Петербург : РМРС, 2003. 226 с.
4. СОЛАС 74. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море. Санкт-Петербург : ЦНИИМФ, 2015. 1088 с.
5. Кодекс торговельного мореплавства України. *Інтернет-ресурс*. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/176/95-%D0%B2%D1%80#Text>
6. Борисов Р. В., Семенова В. Ю. Качка корабля. Санкт-Петербург : СпБГМТУ, 2006. 94 с.
7. Гулиев, Ю.М. Гребные винты. Москва : Морской транспорт, 1961. 134 с.
8. Сизов В. Г. Об одном способе улучшения формы судна. *Вестник ОНМУ*. Одесса : ОНМУ, 2006. Вып. 19. С. 14–19.
9. Vossers G. Fundamentals of the Behavior of Ships in Waves. JSP. 1961. P. 13–28.
10. Бурячок В. В. К теории качки крупнотоннажных судов на портовых акваториях. Москва : Труды Союзморниипроект, 1982. 212 с.
11. Павленко В. Г. Ходкость и управляемость судов. Москва : Морской транспорт, 1991. 397 с.
12. Інститут гідромеханіки НАН України. *Офіційний сайт*. URL : <http://www.hydr mech.com.ua/rus/activity.html>.
13. Аварии и происшествия. *Інтернет-ресурс*. URL : <https://mortrans.info/allnews>.
14. Родионов А. А., Аунг Куи Мьинт. Численное моделирование аварийного разрушения днищевого перекрытия при контакте с подводным камнем *В сборнике «Труды Крыловского государственного научного центра»*. Вып. 82 (366). Санкт-Петербург, 2014. С. 31–36.
15. Муромов И. Сто великих кораблекрушений. Москва : Вече, 2015. 321 с.
16. Олейник Е. А. Анализ причин кораблекрушений, безопасность гражданского судоходства. *Актуальные проблемы развития судоходства и транспорта в азиатско-тихоокеанском регионе : материалы Международной научно-технической конференции*. Владивосток : ФГАОУ ВО ДальФУ, 2019. С. 36–40.
17. Труднев С. Ю., Нистор А. С. Анализ аварийности судов рыбопромыслового флота дальнего востока. *Техническая эксплуатация водного транспорта : проблемы и пути развития*. Петропавловск-Камчатский : КГУ, 2018. С. 21–28.

## REFERENCES

1. Yarkin P. I. (2006). *Upravlenie sudnom*. Odessa : ONMA.
2. Snopkov V. I. (2004). *Upravlenie sudnom : ucheb. dlya VUZzov*. Sankt-Peterburg : ANO NPO «Professional».

3. *Rukovodstvo po tekhnicheskomu nablyudeniyu za sudami v ehkspluatacii.* (2003). Sankt-Peterburg : RMRS.
4. SOLAS 74. (2015). *Mezhdunarodnaya konvenciya po okhrane chelovecheskoy zhidni na more.* Sankt-Peterburg : CNIIMF.
5. Кодекс торгівельного мореплавства України. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/176/95-%D0%B2%D1%80#Text>
6. Borisov R. V., Semenova V. Yu. (2006). *Kachka korablya.* Sankt-Peterburg : SpBGMTU.
7. Guliev, Yu.M. (1961). *Grebnihe vintih.* Moskva : Morskoy transport.
8. Sizov V. G. (2006). Ob odnom sposobe uluchsheniya formih sudna. *Vestnik ONMU.* Odessa : ONMU. Vol. 19. 14–19.
9. Vossers G. (1961). Fundamentals of the Behavior of Ships in Waves. *JSP.* 13–28.
10. Buryachok V. V. (1982). *K teorii kachki krupnotonnazhnikh sudov na portovihkh akvatoriyakh.* Moskva : Trudih Soyuzmorniiproekt.
11. Pavlenko V. G. (1991). *Khodkostj i upravlyaemostj sudov.* Moskva : Morskoy transport.
12. Institut gidromekhaniki NAN Ukrainy. Retrieved from <http://www.hydronech.com.ua/rus/activity.html>.
13. Avarii i proshestviya. Retrieved from <https://mortrans.info/allnews>.
14. Rodionov A. A., Aung Kui Mjint. (2014). Chislennoe modelirovanie avariynogo razrusheniya dnithevoogo perekrihtiya pri kontakte s podvodnim kamnem *V sbornike «Trudih Krihlovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra».* Sankt-Peterburg. Vol. 82 (366). 31–36.
15. Muromov I. (2015). *Sto velikikh korablekrusheniyj.* Moskva : Veche.
16. Oleyjnik E. A. (2019). Analiz prichin korablekrusheniyj, bezopasnostj grazhdanskogo sudokhodstva. *Aktualjnihe problemih razvitiya sudokhodstva i transporta v aziatsko-tikhookeanskom regione : materialih Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii.* Vladivostok : FGAOU VO DaljFU, 36–40.
17. Trudnev S. Yu., Nistor A. S. (2018). Analiz avariynosti sudov rihbopromihslavogo flota daljnego vostoka. *Tekhnicheskaya ehkspluatsiya vodnogo transporta : problemih i puti razvitiya.* Petropavlovsk-Kamchatskiy : KGU, 21–28.

**Терлыч С. В. БАЛЛАСТИРОВКА АВАРИЙНОГО СУДНА ПРИ ПОСАДКЕ НА МЕЛЬ**

*Реализуется методика балластировки аварийного судна при посадке на грунт и предотвращения выброса силами волн и ветра на мель. Цель достигнута путем создания и анализа математической модели аварийного судна, подлежащего балластировке и в то же время дрейфует под влиянием действий ветра и волн в условиях мелководья и с высокой вероятностью выбрасывания судна на мель. Рассмотрена математическая модель позиционирования судна при контакте с дном акватории путем принятия и перемещения жидкого балласта вдоль корпуса. Предложены расчетные зависимости и номограммы для определения рационального количества балласта, его позиционирование и перемещение. Даны рекомендации по предотвращению дрейфа судна во время аварийного контакта с грунтом. Выяснено, что предложенные графические зависимости повысят эффективность предотвращения дрейфа аварийного судна и способствовать подготовке экипажа судна к ухудшению погодных условий, уменьшению степени повреждений и объема спасательных работ. Ключевые слова: аварийное судно, посадка на мель, мелководье, качка судов.*

**Ключевые слова:** аварийное судно, посадка на мель, мелководье, качка судов.

**Terlych S. THE INFORMATION TECHNOLOGIES APPLICATIONS IMPROVING IN SHIP AND SHIPS CONSTRUCTIONS DURABILITY AND VIBRATION.**

*The technique of ballasting the damaged vessel when landing on the ground and preventing the ejection of waves and wind forces aground is being implemented. A mathematical model of the positioning of a vessel in contact with the bottom of the water area by taking and moving liquid ballast along the hull is considered. The relevance of the study is that the quantitative regulation of ballasting will overcome the shortcomings and more successfully use this method in the implementation of rescue operations. This fact is achieved by creating and analyzing a mathematical model of an emergency vessel, which is subject to ballasting and at the same time drifts under the influence of wind and waves in shallow water and with a high probability of*

*throwing the vessel ashore. The adopted hydrodynamic model of the process of throwing a ship aground provides an appropriate schematization of physical phenomena. The force of wind and waves on a vessel drifting in a shallow area leads to periodic hull impacts on the ground. Calculated dependences and nomograms are proposed for determining the rational amount of ballast, its positioning and movement. Recommendations are given for preventing the drift of a vessel during emergency contact with the ground. Recommendations are given for preventing the drift of a vessel during emergency contact with the ground. The proposed graphical dependencies will increase the efficiency of preventing the drift of the damaged vessel and contribute to the preparation of the ship's crew for worsening weather conditions, reducing the degree of damage and the volume of rescue operations. The research results are used in the educational process in training specialists in specialty 135 "Shipbuilding" during the study of the theory of the ship and ship repair items.*

**Keywords:** *emergency ship, grounding, shallow water, vessel dynamics.*

© Терлич С. В.

Статтю прийнято  
до редакції 18.10.20