УДК 656.61.052 doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.11

Постніков Є.Є.

МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ ПЛАВУЧОЇ БУКСИРУЄМОЇ ПЛАТФОРМИ НА ХВИЛЮВАННІ

Буксирування об'єктів морем є особливим випадком морської практики. Як правило, буксирування здійснюється спеціалізованими транспортно-буксирними суднами або потужними комерційними буксирами, або буксирами-рятувальниками. Операція по буксируванню передбачає навігаційний аналіз майбутнього маршруту переходу, проведення попередніх розрахунків по забезпеченню надійності буксирної лінії, вироблення рекомендацій капітанам по проведенню буксировочної операції. Для розробки практичних проєктних рекомендацій необхідно правильно моделювати динамічну поведінку морських об'єктів, тобто отримувати оцінки амплітудно-частотних та фазово-частотних характеристик (при рішенні задач у частотній області), отримувати характеристики динамічних процесів (при рішенні задач у часовій області). Існуючі методики рішення таких задач стосовно до маломорехідних морських об'єктів у даний час засновані на теорії ідеальної рідини, що значно звужує область можливих практичних розрахунків.

В статті розроблена математична модель та проведене оцінювання динаміки плавучої буксируємої платформи на хвилюванні.

***Ключові слова**: буксирування, динаміка, морська платформа, навігаційна безпека, хвилювання.*

Вступ. Стрімкий розвиток морської техніки пов'язаний з появою нових суден та маломорехідних об’єктів, які знадні освоювати морський (океанічний) простір, добувати корисні копалини, проводити наукові дослідження, розширювати горизонт знання людини про оточуючий світ. Дослідження навігаційної природи руху суден та мало морехідних об’єктів в умовах хвилювання є вихідними даними для проєктування та розробки нових технічних рішень, оцінювання ризиків при виконанні буксировочних операцій маломорехідних об’єктів. Визначення гідродинамічних і динамічних характеристик таких об'єктів при відсутності реальних, відпрацьованих на практиці прототипів вимагає проведення значної кількості складних, дорогих модельних та натурних експериментів. Для розробки практичних проектних рекомендацій необхідно правильно моделювати динамічне поводження морських об'єктів.

Слід відзначити, що безпека мореплавання є найважливішим фактором при здійсненні морського судноплавства. На теперішній час питання безпеки залишається одним із пріоритетних практично у всіх морських державах світу. Хвилювання, як правило, впливає на безпеку навігації для судів та буксируємих споруд у відкритому морі. Рух у штормових умовах пов'язаний з цілим рядом небезпечних обставин: посиленням хитавиці, зариванням у хвилю, потрапляння на палубу великих мас води, обрив буксировочного тросу. Особливий вплив морське хвилювання робить на такі морехідні якості судна, як остійність, хитавиця та керованість. Особливо актуальним питання оцінювання динаміки мало морехідного об’єкту на хитавиці стає під час оцінювання ризиків маневрування при буксируванні.

Мета статті є розроблення математичної моделі та методу оцінювання динаміки плавучої буксируємої платформи на хвилюванні.

Аналіз літературних джерел.

Слід відзначити, що дослідження стану морських платформ та їх морських характеристик знайшли своє відображення в роботах Акімова О.В., Кравченко А.А. [1, 2], Слуцького Н.Г. [3], Товстокорого О.М., Нестеренка В.Б., Завальнюка О.Б. [4]. Дослідження динаміки морських об'єктів на хвилюванні досліджені в роботах Н.В. Корнєва [5, 6], М.П. Лобачова [7, 8], І.В. Ткаченко [9], J.H. Ferziger, M. Peric [10], E.G. Paterson, R. Wilson [11], H.W. Coleman [12]. В той же час єдиних підходів щодо оцінювання динаміки складних маломорехідних, буксируємих об'єктів на хвилюванні виявлено не було.

Основна частина.

На першому етапі необхідно побудувати математичну модель динаміки руху платформи на хвилюванні.

Для визначення розмірів чисельної області необхідно зробити теоретичний аналіз динаміки морського об'єкта на хвилюванні. Класичним прикладом такого аналізу є побудова амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) певного виду коливань.

Найцікавішими видами хитавиці є її основні види: кільова, вертикальна й бортова. У виді особливостей архітектурно-конструктивного типу морської платформи (МП) кільова й бортова хитавиці цього типу морських об'єктів відрізняються слабко, на відміну від звичайних суден. Тому для досить повного аналізу динаміки поведінки МП на морському хвилюванні досить розглянути кільові (на зустрічному або попутному хвилюванні) або бортові (на лаговому хвилюванні) та вертикальні коливання на відповідному курсовому куті до хвилювання.

Оскільки більшість МП симетричні відносно діаметральної площини та мідель-шпангоута, то рівняння розглянутих коливань будуть незалежні друг від друга.

МП може експлуатуватися у двох режимах: транспортувальному, коли осад не перевищує верхньої крайки понтонів та стаціонарному, коли понтони повністю занурені під воду шляхом баластування, а діюча ватерлінія проходить через стабілізуючі колони.

Типовий вид АЧХ вертикальної динаміки МП показано на рисунку 1 [7]. На рис. 1 введені наступні позначення: η_3 - амплітуда вертикальних коливань, ζ_a – амплітуда хвилі, що набігає, k – хвильове число хвилі, що набігає, B – поперечний кліренс (відстань між діаметральних площин понтонів), ω_n – власна частота вертикальних коливань МП, z_m – z-положення центру ваги (ЦВ) понтонів, g - прискорення вільного падіння, T - період коливань, T_n - власний період вертикальних коливань МП.

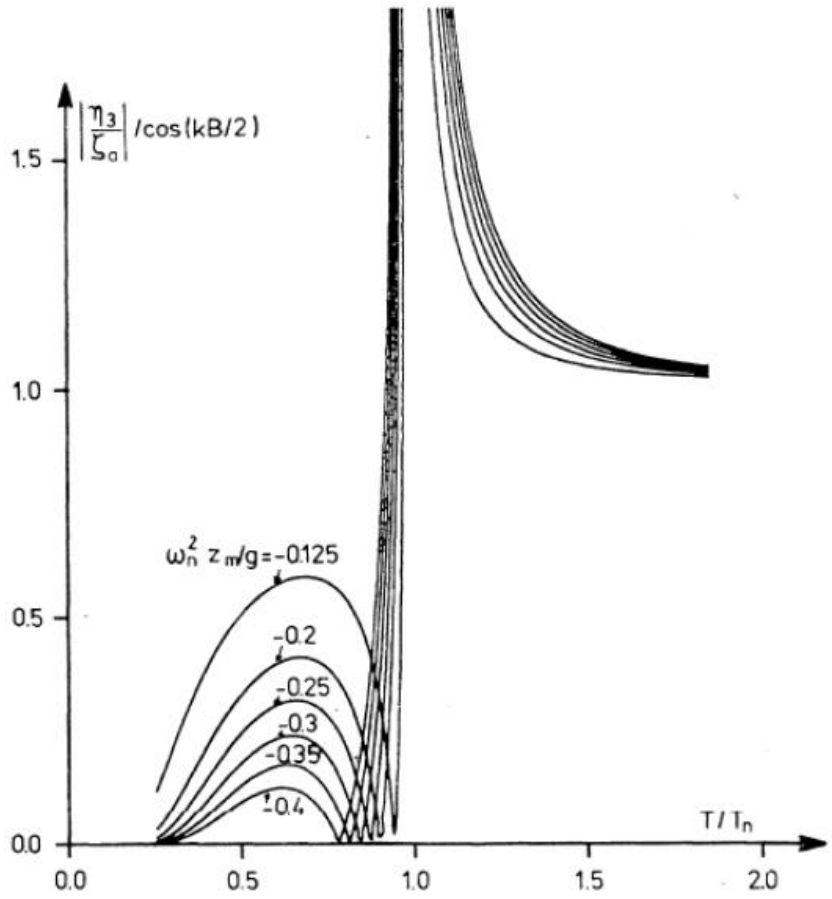

Рисунок 1 – Амплітудно-частотна характеристика вертикальної хитавиці морської платформи

Згідно з даними, наведеними на рис. 1. АЧХ вертикальної хитавиці МП має два піки, один з яких резонансний. Відомо, що резонанс хитавиці наступає при збігу власної частоти хитавиці й частоти хвилі, що набігає [6-8].

Для розрахунків власної частоти вертикальної хитавиці МП можна скористатися наступною формулою [7]:

$$\omega_\zeta = \sqrt{\frac{\rho g A_w}{M + A_{33}}} \tag{1}$$

де ω_ζ - власна частота вертикальних коливань МП, A_w - площа ватерлінії, M - масова водотоннажність, A_{33} - приєднана маса.

Для визначення приєднаної маси можна скористатися рівнянням з [9]:

$$A_{33} = 4.6\rho AL \tag{2}$$

де A - площа поперечного перерізу понтона, або рівнянням з [8]:

$$A_{33} = 1.5\rho\pi\left(n_p L_p (B_p/2)^2 + n_c L_c (B_c/2)^2\right), \tag{3}$$

де n_p, L_p і B_p - кількість, довжина й ширина понтонів відповідно, n_c, L_c і Bc - кількість, довжина й ширина стабілізуючих колон відповідно.

Власні період коливань пов'язаний із власною частотою наступною формулою:

$$T_\zeta = 2\pi/\omega_\zeta$$

Згідно [8] МП повинні проектувати з умовою – власний період вертикальних, кільових і бортових коливань повинен бути не менш 20с, що сильно перевищує більшість хвиль, які зустрічаються у відкритих морях.

Згідно з даними, що наведені на рис. 1, АЧХ вертикальної хитавиці МП має також період, коли вертикальна хитавиця дорівнює нулю. Згідно [8] цю частоту можна розрахувати за формулою:

$$\omega = \frac{\omega_\zeta}{\sqrt{1 - |z_m|\,\omega_\zeta^2/g}} \tag{4}$$

Для розрахунків власної частоти кільової й бортової хитавиці рекомендується використовувати відповідно з формулою [5]:

$$\omega_\psi = \sqrt{\frac{\rho g \nabla H_0}{I_5 + A_{55}}} \tag{5}$$

$$\omega_\theta = \sqrt{\frac{\rho g \nabla h_0}{I_4 + A_{44}}} \tag{6}$$

де ∇ - об'ємна водотоннажність, H_0 - початкова поздовжня метацентрична висота, I_5 - момент інерції МП щодо поперечної вісі, A_{55} - приєднаний момент інерції, h_0 - початкова поперечна метацентрична висота, I_4 - момент інерції МП щодо поперечної вісі, A_{44} - приєднаний момент інерції.

Згідно [7] для наближеної оцінки приєднаного моменту інерції кільової хитавиці можна вважати, що $A_{55} \approx I_5$. Згідно [8] для наближеної оцінки приєднаного моменту інерції бортової хитавиці можна керуватися наступною формулою:

$$A_{44} = 0.85 A_{33} (B/2)^2. \tag{7}$$

Для проведення чисельного експерименту використовувалася модель схематичної напівзаглибної установки, яка представлена на рис. 2. Така платформа була розроблена в технічному університеті Дельфта, Голландія для випробувань в дослідному басейні. Пінкстер у своїх роботах [13, 14] провів експеримент і зрівняв його з потенційною теорією. Проведемо порівняння результатів [13, 14] із чисельним моделюванням.

МП являє собою 6 циліндричних колон, прикріплених зверху до палуби й знизу до двом понтонам, між якими розташовуються поперечні розпірки. Розрахунки по потенційній теорії проводилися для натурного об'єкта, розміри й характерні величини якого наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Характерні величини морської платформи

Показник	Символ	од. виміру	модель	розрахунки
Масштаб	-	-	1:40	1:1
Довжина	L	м	100,00	
Ширина	B	м	76,00	
Осад	T	м	20,00	
Водотоннажність	∇	м^3	35925	
Центр ваги	$K\bar{G}$	м	8,64	7,92
Метацентрична висота	$G\bar{M}$	м	16,76	17,48
Поперечний радіус інерції	k_{xx}	м	-	30,55
Поздовжній радіус інерції	k_{yy}	м	30,89	30,89
Вертикальний радіус інерції	k_{zz}	м	-	41,74
Власний період вертикальної хитавиці	T_z	сек.	21,3	21,8
Власний період бортової хитавиці	T_φ	сек.	21,3	22,4
Власний період кільової хитавиці	T_θ	сек.	19,5	19,8
Глибина води	Wd	м	40,0	

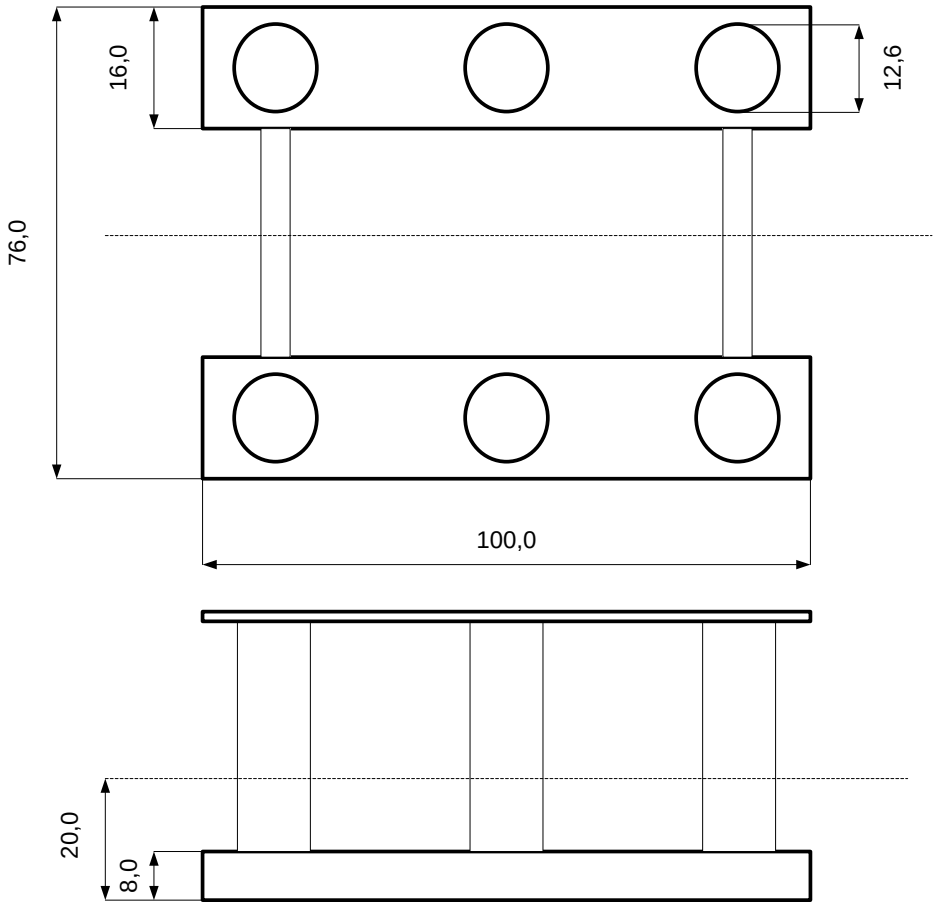

Рисунок 2 – Схематичне зображення та лінійні розміри платформи

Для завдання хвильової поверхні використовувалася хвиля Стокса першого роду. Усі розрахунки були проведено для Fr=0,0. Амплітуда хвилі - ζ_a≈0.020 метра. Для вивчення руху платформи на хвилюванні був обраний наступний діапазон довжин хвиль: $\lambda/L\in$[0,5;

12,0], який відповідає експериментальним даним [13, 14]. Параметри кутової частоти й хвильового числа визначаються з формул хвильової теорії [4]. Параметри середовища відповідали значенням, наведеним в експерименті тіла Віглей на тихій воді. Розрахунки виконувалися на динамічній сітці, що полягає із трьох мільйонів розрахункових гнізд (рис. 3).

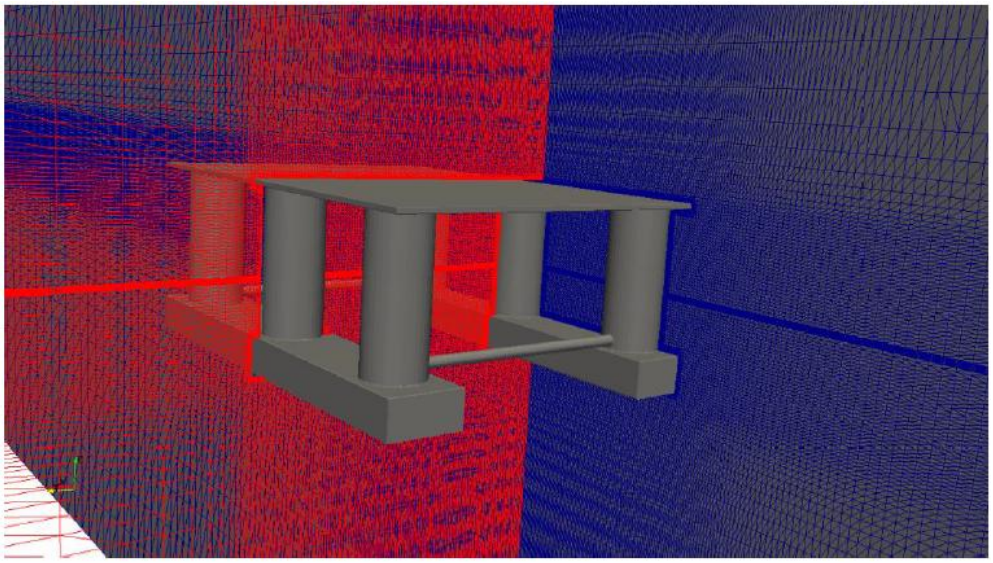

Рисунок 3 – Розрахункова сітка для схематичної морської платформи

Для моделювання довгих хвиль, потрібно значне збільшення геометричних параметрів розрахункової області. Таким чином, вхідна границя перебувала від досліджуваного об'єкта на відстані $15 \cdot L_{pp}$, а вихідна на відстані $30 \cdot L_{pp}$, де L_{pp} – відстань між перпендикулярами напівзаглибної платформи. Для моделювання турбулентності використовувалася $k\text{-}\omega\ SST$.

Розрахунки вертикальної та кільової хитавиці. АЧХ вертикальної й кільової хитавиці, отримані чисельним моделюванням, представлені на рис. 4. При чисельному моделювання отримане значення власної частоти МП добре узгодиться з потенційною теорією. Для таких об'єктів власна частота лежить у нижньому діапазоні частот, тому що вони мають більшу масу, і вільна поверхня перетинає невелику частину поверхні. Тому, МП ухвалюють незначну частину хвильової енергії й, відповідно, мають незначні параметри хитавиці.

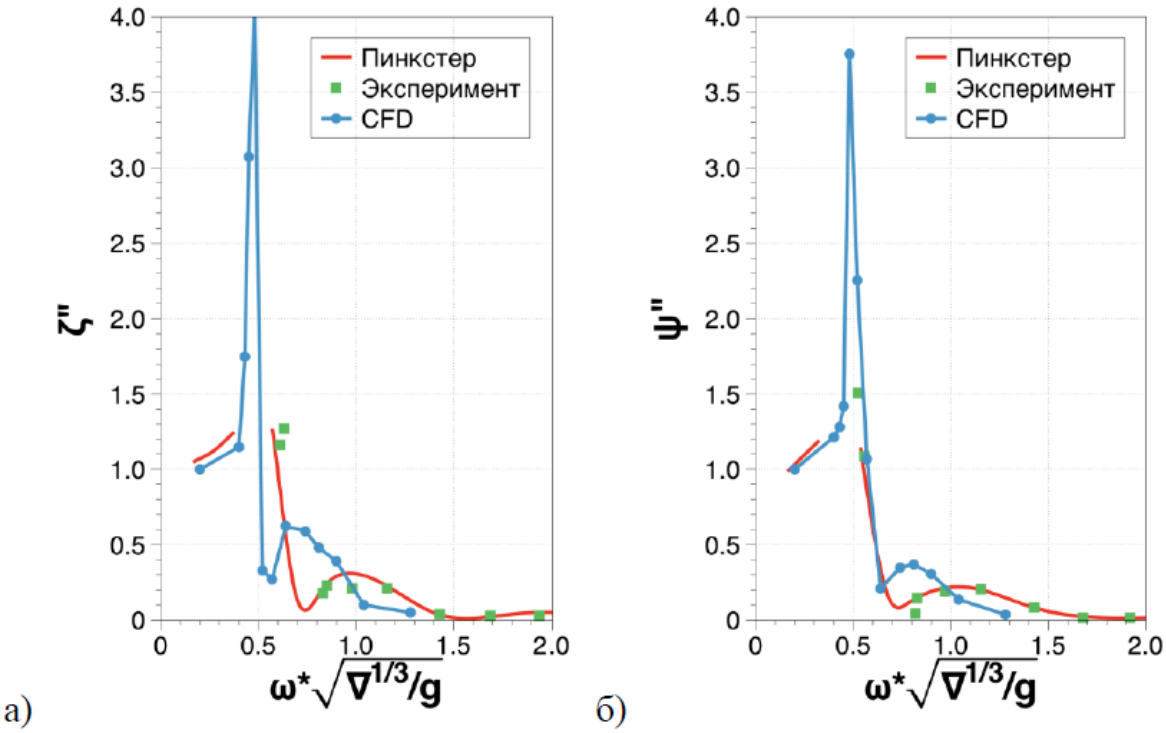

Рисунок 4 – АЧХ вертикальної (а) і кільовий (б) хитавиці схематичної морської платформи

При чисельному моделюванні було отримано, що в'язкісна складова сили становить менш 1% від повної. Відомо, що для нерухомих об'єктів простої форми розрахунки, виконані за потенційною теорії, у якій не враховується в'язкість, добре узгодяться з експериментальними даними. Значення, наведені на рис. 4 свідчать, що на високих частотах у чисельних розрахунках відбувається зрушення, як по частоті, так і по амплітуді.

Висновки. В статті наведена математична модель, рішення якої представляє значний практичний інтерес. Існуючі методики обґрунтування параметрів хвилювання вимагають залучення результатів модельних експериментів, зокрема для урахування в'язкісного демпфірування. Можливості існуючих обчислювальних засобів і відповідного програмного забезпечення дозволяє на початкових етапах проектування морських маломорехідних обєктів досить точно прогнозувати параметри їхньої хитавиці на хвилюванні з урахуванням сил в'язкісної природи. Це дозволяє значно знизити вартість проектних робіт у частині визначення гідродинамічних характеристик морських об'єктів, а також виконання специфічних операцій як буксирування та маневрування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Akimova O.V., Kravchenko A.A. Development of the methodology of the choice of the route of work of platform supply vessels in the shelf of the seas / O. Akimova, A. Kravchenko // International Journal "Technology audit and production reserves", 2018. – Vol. 5, № 2 (43). pp. 30-35. - ISSN (print) 2226-3780, ISSN (online) 2312-8372. – DOI: 10.15587/2312-8372.2018.143558

2. Akimova O.V., Kravchenko A.A. Development of a method for selecting a way of raw material transportation from the offshore drilling platform to the onshore infrastructure / O.

Akimova, A. Kravchenko // International Journal "Technology audit and production reserves", 2019. – Vol. 2, № 2 (46). pp. 25-31. - ISSN (print) 2664- 9969, ISSN (on-line) 2706-5448. - DOI: 10.15587/2312-8372.2019.169423.

3. Слуцкий, Н. Г. Особенности проектирования и строительства композитных плавучих доков большой подъемной силы [Текст] / Н. Г. Слуцкий, В. Н. Конов, А. С. Рашковский // Безопасность мореплавания и ее обеспечение при проектировании и постройке судов (БМС–2007) : материалы междунар. науч.-техн. конф. — Николаев : НУК, 2007. — С. 9–12.

4. Товстокорий О.М. Особливості контролю остійності буксирних суден при маневруванні на шельфі / О. М. Товстокорий, В. Б. Нестеренко, О. П. Завальнюк // Науковий вісник Херсонської державної морської академії: Том 1 № 20 (2019). - doi.org/10.33815/2313-4763.2019.1.20.040-046

5. Kornev N., Taranov A., Shchukin E., & Kleinsorge L. 2011. Development of hybrid URANS-LES methods for flow simulation in the ship stern area. Ocean Engineering, 38(16), 1831-1838.

6. Abbas, N., Kornev, N., Shevchuk, I., and Anschau, P. 2015. CFD prediction of unsteady forces on marine propellers caused by the wake nonuniformity and nonstationarity. Ocean Engineering, 104, 659-672.

7. Bagaev D.V., Lobachev M.P., Ovchinnikov N.A., Taranov A.E. Prediction of the scale effect for the hull-propeller interaction factors // Computational Methods in Marine Engineering V - Proceedings of the 5th International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, MARINE 2013 2013. С. 699-710.

8. Денисихина Д.М., Лобачёв М.П., Пустотный А.В., Чичерин И.А. Влияние выбора модели турбулентности на точность расчёта вязкостного сопротивления транспортных судов // Морской вестник. 2008. № 3. С. 95-100.

9. Овчинников К.Д., Ткаченко И.В., Тряскин Н.В. Численное моделирование качки полупогружной платформы на регулярном волнении // Морские интеллектуальные технологии. 2015. Т. 1. № 2 (28). С. 14-18.

10. Ferziger, J.H., Peric, M., 2002. Computational Methods for Fluid Dynamics, (Third Edit.) Springer, Berlin, Germany.

11. Simonsen, C.D., Otzen, J.F., Joncquez, S., Stern, F., 2013. EFD and CFD for KCS heaving and pitching in regular head waves. J. Mar. Sci. Technol. 18 (4), 435–459.

12. Stern, F., Wilson, R.V., Coleman, H.W., Paterson, E.G., 2001. Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations-Part 1: methodology and procedures. J. Fluids Eng. 123 (4), 793–802.

13. Pinkster, J.A., 1980. Low Frequency Second Order Wave Exciting Forces on Floating Structures, PhD thesis, Delft University of Technology.

14. Pinkster, J., Dercksen, A. and Dev, A. (1993). Hydrodynamic Aspects of Moored Semisubmersibles and TLPs. Offshore Technology Conference.