

## ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656.612:629.563.82

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.07>

### ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ І ФОРМУВАННЯ ПЛАНУ РОБОТИ ОФШОРНОГО ФЛОТУ ПРИ ОБСЛУГОВУВАННІ ВИДОБУВНИХ ПЛАТФОРМ

**О.А. Кравченко<sup>1</sup>, С.С. Боровик<sup>2</sup>, І.І. Тихоніна<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>к.т.н., доцент кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень»,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-3085-7449

<sup>2</sup>к.т.н., старший викладач кафедри «Експлуатація флоту і технологія  
морських перевезень»,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0003-4168-8537

<sup>3</sup>старший викладач кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень»,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-1945-9845

#### **Анотація**

**Вступ.** У статті наведені експериментальні розрахунки по моделі обґрунтування оптимальної структури суден постачання морських бурових платформ і організації їх роботи. Проведені розрахунки підтверджують мінімізацію транспортних витрат при обслуговуванні морських бурових платформ та отримання оптимальної структури спеціалізованих суден постачання платформ, варіанту маршруту роботи цих суден, враховуючи бюджет часу та несприятливі погодні умови. **Метою** статті є проведення експериментальних розрахунків по моделі обґрунтування структури і формування плану роботи спеціалізованих суден постачання при обслуговуванні морських бурових платформ. **Результати.** В роботі отримана оптимальна структура спеціалізованих суден по вантажопідйомності і визначено їх розподіл за варіантами маршруту роботи. Встановлено, що в період з низьким попитом на забезпечення платформ, достатньо використовувати один буксир на відміну від періодів з більш високим попитом на забезпечення. Визначено оптимальний маршрут роботи спеціалізованих суден з кількості розглянутих. Проаналізовано ефективність використання бюджету часу роботи спеціалізованих суден. Встановлено, що при несприятливих погодних умовах кількість суден в період низького попиту на забезпечення збільшується до 2-х буксирів, що, в свою чергу, збільшує витрати на транспортування 1 т вантажу. Проаналізовано вплив віддаленості бази від платформ та встановлено, що при скороченні відстані доцільніше використовувати короткі маршрути, які включають в себе по одній платформі. **Висновки.** Проведені експериментальні розрахунки підтверджують достовірність моделі обґрунтування структури і формування плану роботи спеціалізованих

суден постачання при обслуговуванні морських бурових платформ та її придатність для вирішення практичних завдань.

**Ключові слова:** спеціалізовані судна постачання, транспортне забезпечення платформ, обґрунтування структури спеціалізованих суден, планування роботи спеціалізованих суден, варіант маршрутів, бюджет часу, несприятливі погодні умови.

## JUSTIFICATION OF THE STRUCTURE AND FORMATION OF THE WORK PLAN OF THE OFFSHORE FLEET IN MAINTENANCE OF EXTRACTION PLATFORMS

O.A. Kravchenko<sup>1</sup>, S.S. Borovyk<sup>2</sup>, I.I. Tikhonina<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., Associate Professor at the Department

“Operation of the Fleet and Technology of Sea Transportation”,  
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-3085-7449

<sup>2</sup>Ph.D., Senior Lecturer at the Department

“Operation of the Fleet and Technology of Sea Transportation”,  
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0003-4168-8537

<sup>3</sup>Senior Lecturer at the Department

“Operation of the Fleet and Technology of Sea Transportation”,  
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-1945-9845

### Summary

**Introduction.** The article presents experimental calculations based on the model of substantiation of the optimal structure of vessels supplying offshore drilling platforms and the organization of their work. The performed calculations confirm the minimization of transport costs when servicing offshore drilling platforms and obtaining the optimal structure of specialized platform supply ships, the variant of the route of operation of these ships, taking into account the time budget and adverse weather conditions. **The purpose** of the article is to carry out experimental calculations based on the model of substantiation of the structure and the formation of the work plan of specialized supply vessels in the service of offshore drilling platforms. **The results.** In the work, the optimal structure of specialized vessels in terms of carrying capacity was obtained and their distribution according to the options of the work route was determined. It has been found that during periods of low demand for the provision of platforms, it is sufficient to use a single tug, in contrast to periods with a higher demand for provision. The optimal route of operation of specialized vessels from the number considered was determined. The efficiency of using the operating time budget of specialized vessels is analyzed. It has been established that in adverse weather conditions, the number of vessels in the period of low supply demand increases to 2 tugs, which, in turn, increases the cost of transporting 1 ton of cargo. The impact of the remoteness of the base from the platforms was analyzed and it was established that when shortening the distance, it is more appropriate to use short routes that include one platform each. **Conclusions.** The conducted experimental calculations confirm the reliability of the model of substantiation of the structure and formation of the work plan of specialized supply vessels in the service of offshore drilling platforms and its suitability for solving practical tasks.

**Key words:** specialized supply vessels, transport support of platforms, substantiation of the structure of specialized vessels, planning of operation of specialized vessels, option of routes, time budget, adverse weather conditions.

**Вступ.** Обслуговування морських бурових платформ складається з декількох завдань, серед яких найважливішими є визначення кількісного і якісного складу спеціалізованих суден, а також планування їх роботи при постачанні платформ та доставки на берег несправного обладнання і порожньої тари. Окремі дослідники такі як [1-6] зверталися до цієї проблеми з пропозиціями різного типу моделей для планування роботи офшорного флоту при обслуговуванні платформ. Авторами роботи [7, 8] надано класифікацію технічних засобів, що залучаються до облаштування родовищ в шельфах морів, а також представлено метод визначення необхідної кількості суден, що обслуговують морські бурові платформи. Питання розробки маршрутів висвітлені в [9, 10]. Але залишилися без уваги питання розробки та визначення маршруту роботи суден для оптимізації витрат по обслуговуванню платформ. Зазначені розробки орієнтовані на конкретну виробничу ситуацію та конкретну компанію, яка займається розробкою родовищ в шельфах морів. Існуючі розробки були вдосконалені в дослідженні [11] шляхом врахування чинників, які не розглядалися в існуючих роботах. Це дозволило в процесі оптимізації отримати результати, що в більшій мірі відповідають реальній ситуації і умовам роботи офшорних суден. А також, забезпечило осіб, котрі приймають рішення більш достовірною інформацією.

**Формулювання цілей статті.** Метою статті є проведення експериментальних розрахунків по обґрунтуванню структури і формування плану роботи спеціалізованих суден постачання при обслуговуванні морських бурових платформ.

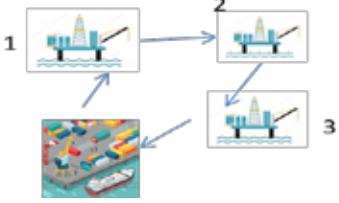

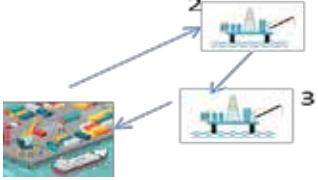
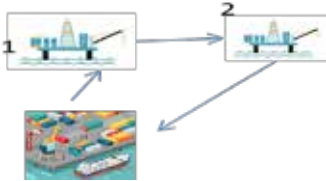
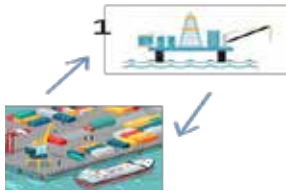
**Виклад основного матеріалу.** В існуючих розробках у вигляді моделей з даної проблеми поняття «ефективність» роботи спеціалізованих суден практично відсутня, апріорі приймається, що мінімізація витрат і забезпечує ефективність їх роботи. Для видобувної компанії ці витрати відносяться до виробничих витрат і, відповідно, чим вони менші, тим вище підсумковий прибуток.

Експериментальні розрахунки проведемо для трьох видобувних платформ. Розглянемо час планування роботи офшорного флоту – 6 місяців. В якості тимчасових періодів планування приймемо  $\tau=1$  місяць, 30 діб, відповідно,  $T=6$ , ( $t=\overline{1,6}$ ). Кількість варіантів залежить від кількості платформ для обслуговування. Нехай розглядається  $P=3$ , ( $p=\overline{1,3}$ ) платформ. С урахуванням того, що на практиці при обслуговуванні платформ найчастіше задіяні розвізно-збиральні варіанти, то далі розглядаємо саме таку сутність варіантів. За структурою, варіанти роботи (обходу платформ) включають в себе 3, 2 і по одній платформі (табл. 1). Загальна кількість варіантів  $n=7$ , ( $i=\overline{1,7}$ ). У цій же таблиці наведемо значення бінарного параметра  $A_i^p$ , що відображає участь тієї чи іншої платформи в даному варіанті маршруту обходу платформ.  $A_i^p$  приймає значення 1, якщо платформа  $p$  входить в варіант роботи суден  $i$ . В іншому випадку  $A_i^p$  приймає значення 0.

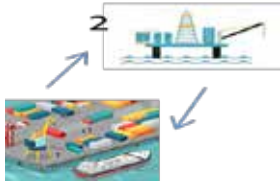
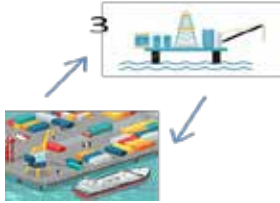
Відібрані  $m=3$ , ( $j=\overline{1,3}$ ) варіантів спеціалізованих суден з конкретними техніко-експлуатаційними та економічними характеристиками (табл. 2).

Таблиця 1

Характеристика варіантів роботи офшорних суден

Номер варіанта	Суть варіанта	$A_i^p$
$i=1$		$A_1^1 = 1$ $A_1^2 = 1$ $A_1^3 = 1$
$i=2$		$A_1^1 = 1$ $A_1^2 = 0$ $A_1^3 = 1$
$i=3$		$A_1^1 = 0$ $A_1^2 = 1$ $A_1^3 = 1$
$i=4$		$A_1^1 = 1$ $A_1^2 = 1$ $A_1^3 = 0$
$i=5$		$A_1^1 = 1$ $A_1^2 = 0$ $A_1^3 = 0$

Продовження таблиці 1

Номер варіанта	Суть варіанта	$A_i^P$
$i=6$		$A_1^1 = 0$ $A_1^2 = 1$ $A_1^3 = 0$
$i=7$		$A_1^1 = 0$ $A_1^2 = 0$ $A_1^3 = 1$

Таблиця 2

**Характеристики альтернативних офшорних суден**

Характеристики суден	Судно 1	Судно 2	Судно 3
Вантажопідйомність $D_j$ , т	1600	2100	2800
Швидкість $V_j$ , вузл.	12	12	12
Добові витрати на ходу $R_j^x$ , дол.	1000	1240	1410
Добові витрати на стоянці $R_j^{cm}$	300	400	480
Ставка тайм-чартерної оренди $R_j^{mч}$ , дол./добу	750	900	1000
Доступна кількість для оренди, од	3	3	3

Відзначимо, що ходовий час рейсу для всіх суден однаковий через однакову експлуатаційну швидкість. Бюджет фактичного часу  $T_t^J$  приймемо для всіх суден однаковим,  $T_t^J = 28$  ( $j=1,3, t=1,6$ ) діб.

Характеристики кожного варіанту роботи спеціалізованих суден залежать від параметрів судна, яке за цим варіантом буде працювати, і характеристик варіанту (відстаней між платформами і базою, відстанню між платформами).

Кожен варіант  $i=1, n$  для конкретного з 3 суден характеризується певним часом рейсу  $t^i$  ( $i=1,7, j=1,3$ ), яке визначається як сума складових елементів часу роботи спеціалізованих суден (табл. 3).

Таблиця 3

Час рейсу  $t_j^i$  та структура часу рейсу по варіантам та витрати  $r_j^i$   
по варіантам

Варіант	Судно 1				Судно 2				Судно 3			
	$t_{x1}^i$ , діб.	$t_{cm1}^i$ , діб.	$t_1^i$ , діб.	$r_1^i$ , дол.	$t_{x2}^i$ , діб.	$t_{cm2}^i$ , діб.	$t_2^i$ , діб.	$r_2^i$ , дол.	$t_{x3}^i$ , діб.	$t_{cm3}^i$ , діб.	$t_3^i$ , діб.	$r_3^i$ , дол.
1	1	0,9	1,9	1270	1	1,1	2,1	1680	1	1,4	2,4	2082
2	0,7	0,6	1,3	880	0,7	0,75	1,45	1168	0,7	1	1,7	1467
3	0,6	0,6	1,2	780	0,6	0,75	1,35	1044	0,6	1	1,6	1326
4	0,8	0,6	1,4	980	0,8	0,75	1,55	1292	0,8	1	1,8	1608
5	0,5	0,3	0,8	590	0,5	0,4	0,9	780	0,5	0,6	1,1	993
6	0,4	0,3	0,7	490	0,4	0,4	0,8	656	0,4	0,6	1	852
7	0,4	0,3	0,7	490	0,4	0,4	0,8	656	0,4	0,6	1	852

Витрати  $r_j^i$  на виконання роботи по кожному варіанту  $i=\overline{1,7}$  для кожного судна  $j=\overline{1,3}$  визначаються нормативами витрат по суднах на ходу і стоянці (табл. 3).

Кожній платформі відповідає певний попит на завезення до бази  $Q_t^p$  та вивезення вантажів від бази  $Q_t^p$ . Для подальших розрахунків прийемо, що попит на обслуговування платформ має два варіанти – один для  $t=1,2,6$  та інше для  $t=3,4,5$  (табл. 4).

Таблиця 4

Характеристика попиту на обслуговування платформ  
в періоди  $t=1,2,6$  та  $t=3,4,5$

Платформа	Мінімальне значення попиту $Q_t^{p \min}$ , тис.т	Максимальне значення попиту $Q_t^{p \max}$ , тис.т
	Періоди $t=1,2,6$	
p=1	40	48
p=2	50	60
p=3	65	78
Періоди $t=3,4,5$		
p=1	25	30
p=2	30	36
p=3	35	42

Таким чином, сформовані всі вихідні дані для моделі. Необхідно визначити оптимальну структуру флоту та сформувати план-графік роботи спеціалізованих суден по обслуговуванню платформ. Відзначимо, що відповідно до схеми експериментальних досліджень, на першому етапі вплив погодних умов не враховується.

У якості параметру управління виступають:

- $v_j \in Z^+ \cup 0, j=\overline{1,3}, t=\overline{1,6}$  – змінна, яка відповідає за вибір того чи іншого типу судна для тайм-чартерної оренди (з урахуванням тривалості оренди) для подальшої роботи з обслуговування платформ;
- $x_{jt}^i \in Z^+ \cup 0, i=\overline{1,7}, j=\overline{1,3}, t=\overline{1,6}$  – змінна, яка відповідає за закріплення судна типу  $j$  за варіантом роботи  $i$  в проміжок часу  $t$  і відображає кількість таких рейсів.

Цільова функція оптимізаційної моделі відображає прагнення забезпечити мінімізацію витрат на обслуговування платформ спеціалізованими судами. Дані витрати складаються з двох категорій: перша категорія – це витрати на тайм-чартерну оренду суден, друга – витрати експлуатаційні на їх роботу.

Математична модель в координатній формі має вигляд:

Цільова функція:

$$\begin{aligned}
 &750 \cdot 30 \cdot \left( v_1^1 + v_1^2 + v_1^3 + v_1^4 + v_1^5 \right) + 900 \cdot 30 \cdot \left( v_2^1 + v_2^2 + v_2^3 + v_2^4 + v_2^5 \right) + \\
 &+ 1000 \cdot 30 \cdot \left( v_3^1 + v_3^2 + v_3^3 + v_3^4 + v_3^5 \right) + 1270 \cdot \left( x_{11}^1 + x_{12}^1 + x_{13}^1 + x_{14}^1 + x_{15}^1 + x_{16}^1 \right) + \\
 &+ 1680 \cdot \left( x_{21}^1 + x_{22}^1 + x_{23}^1 + x_{24}^1 + x_{25}^1 + x_{26}^1 \right) + 2082 \cdot \left( x_{31}^1 + x_{32}^1 + x_{33}^1 + x_{34}^1 + x_{35}^1 + x_{36}^1 \right) + \\
 &+ 880 \cdot \left( x_{11}^2 + x_{12}^2 + x_{13}^2 + x_{14}^2 + x_{15}^2 + x_{16}^2 \right) + 1168 \cdot \left( x_{21}^2 + x_{22}^2 + x_{23}^2 + x_{24}^2 + x_{25}^2 + x_{26}^2 \right) + \\
 &+ 1467 \cdot \left( x_{31}^2 + x_{32}^2 + x_{33}^2 + x_{34}^2 + x_{35}^2 + x_{36}^2 \right) + 780 \cdot \left( x_{11}^3 + x_{12}^3 + x_{13}^3 + x_{14}^3 + x_{15}^3 + x_{16}^3 \right) + \\
 &+ 1044 \cdot \left( x_{21}^3 + x_{22}^3 + x_{23}^3 + x_{24}^3 + x_{25}^3 + x_{26}^3 \right) + 1326 \cdot \left( x_{31}^3 + x_{32}^3 + x_{33}^3 + x_{34}^3 + x_{35}^3 + x_{36}^3 \right) + \\
 &+ 980 \cdot \left( x_{11}^4 + x_{12}^4 + x_{13}^4 + x_{14}^4 + x_{15}^4 + x_{16}^4 \right) + 1292 \cdot \left( x_{21}^4 + x_{22}^4 + x_{23}^4 + x_{24}^4 + x_{25}^4 + x_{26}^4 \right) + \\
 &+ 1608 \cdot \left( x_{31}^4 + x_{32}^4 + x_{33}^4 + x_{34}^4 + x_{35}^4 + x_{36}^4 \right) + 590 \cdot \left( x_{11}^5 + x_{12}^5 + x_{13}^5 + x_{14}^5 + x_{15}^5 + x_{16}^5 \right) + \\
 &+ 780 \cdot \left( x_{21}^5 + x_{22}^5 + x_{23}^5 + x_{24}^5 + x_{25}^5 + x_{26}^5 \right) + 993 \cdot \left( x_{31}^5 + x_{32}^5 + x_{33}^5 + x_{34}^5 + x_{35}^5 + x_{36}^5 \right) + \\
 &+ 490 \cdot \left( x_{11}^6 + x_{12}^6 + x_{13}^6 + x_{14}^6 + x_{15}^6 + x_{16}^6 \right) + 656 \cdot \left( x_{21}^6 + x_{22}^6 + x_{23}^6 + x_{24}^6 + x_{25}^6 + x_{26}^6 \right) + \\
 &+ 852 \cdot \left( x_{31}^6 + x_{32}^6 + x_{33}^6 + x_{34}^6 + x_{35}^6 + x_{36}^6 \right) + 490 \cdot \left( x_{11}^7 + x_{12}^7 + x_{13}^7 + x_{14}^7 + x_{15}^7 + x_{16}^7 \right) + \\
 &+ 656 \cdot \left( x_{21}^7 + x_{22}^7 + x_{23}^7 + x_{24}^7 + x_{25}^7 + x_{26}^7 \right) + 852 \cdot \left( x_{31}^7 + x_{32}^7 + x_{33}^7 + x_{34}^7 + x_{35}^7 + x_{36}^7 \right) \longrightarrow \min
 \end{aligned} \tag{1}$$

Обмеження за обсягом транспортної роботи (попиту) для кожної платформи:

Перша платформа, перший період  $p=1, t=1$

$$\begin{aligned}
 &40000 \leq 1600 \cdot \left( x_{11}^1 + x_{11}^2 + x_{11}^4 + x_{11}^5 \right) + 2100 \cdot \left( x_{21}^1 + x_{21}^2 + x_{21}^4 + x_{21}^5 \right) + \\
 &+ 2800 \cdot \left( x_{31}^1 + x_{31}^2 + x_{31}^4 + x_{31}^5 \right) \leq 48000
 \end{aligned} \tag{2}$$

Перша платформа, другий період  $p=1, t=2$

$$\begin{aligned}
 &40000 \leq 1600 \cdot \left( x_{12}^1 + x_{12}^2 + x_{12}^4 + x_{12}^5 \right) + 2100 \cdot \left( x_{22}^1 + x_{22}^2 + x_{22}^4 + x_{22}^5 \right) + \\
 &+ 2800 \cdot \left( x_{32}^1 + x_{32}^2 + x_{32}^4 + x_{32}^5 \right) \leq 48000
 \end{aligned} \tag{3}$$

Перша платформа, третій період  $p=1, t=3$

$$25000 \leq 1600 \cdot \left( x_{13}^1 + x_{13}^2 + x_{13}^4 + x_{13}^5 \right) + 2100 \cdot \left( x_{23}^1 + x_{23}^2 + x_{23}^4 + x_{23}^5 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{33}^1 + x_{33}^2 + x_{33}^4 + x_{33}^5 \right) \leq 30000 \quad (4)$$

Перша платформа, четвертий період  $p=1, t=4$

$$25000 \leq 1600 \cdot \left( x_{14}^1 + x_{14}^2 + x_{14}^4 + x_{14}^5 \right) + 2100 \cdot \left( x_{24}^1 + x_{24}^2 + x_{24}^4 + x_{24}^5 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{34}^1 + x_{34}^2 + x_{34}^4 + x_{34}^5 \right) \leq 30000 \quad (5)$$

Перша платформа, п'ятий період  $p=1, t=5$

$$25000 \leq 1600 \cdot \left( x_{15}^1 + x_{15}^2 + x_{15}^4 + x_{15}^5 \right) + 2100 \cdot \left( x_{25}^1 + x_{25}^2 + x_{25}^4 + x_{25}^5 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{35}^1 + x_{35}^2 + x_{35}^4 + x_{35}^5 \right) \leq 30000 \quad (6)$$

Перша платформа, шостий період  $p=1, t=6$

$$40000 \leq 1600 \cdot \left( x_{16}^1 + x_{16}^2 + x_{16}^4 + x_{16}^5 \right) + 2100 \cdot \left( x_{26}^1 + x_{26}^2 + x_{26}^4 + x_{26}^5 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{36}^1 + x_{36}^2 + x_{36}^4 + x_{36}^5 \right) \leq 48000 \quad (7)$$

Друга платформа, перший період  $p=2, t=1$

$$50000 \leq 1600 \cdot \left( x_{11}^1 + x_{11}^3 + x_{11}^4 + x_{11}^6 \right) + 2100 \cdot \left( x_{21}^1 + x_{21}^3 + x_{21}^4 + x_{21}^6 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{31}^1 + x_{31}^3 + x_{31}^4 + x_{31}^6 \right) \leq 60000 \quad (8)$$

Друга платформа, другий період  $p=2, t=2$

$$50000 \leq 1600 \cdot \left( x_{12}^1 + x_{12}^3 + x_{12}^4 + x_{12}^6 \right) + 2100 \cdot \left( x_{22}^1 + x_{22}^3 + x_{22}^4 + x_{22}^6 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{32}^1 + x_{32}^3 + x_{32}^4 + x_{32}^6 \right) \leq 60000 \quad (9)$$

Друга платформа, третій період  $p=2, t=3$

$$30000 \leq 1600 \cdot \left( x_{13}^1 + x_{13}^3 + x_{13}^4 + x_{13}^6 \right) + 2100 \cdot \left( x_{23}^1 + x_{23}^3 + x_{23}^4 + x_{23}^6 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{33}^1 + x_{33}^3 + x_{33}^4 + x_{33}^6 \right) \leq 36000 \quad (10)$$



Друга платформа, четвертий період  $p=2, t=4$

$$30000 \leq 1600 \cdot \left( x_{14}^1 + x_{14}^3 + x_{14}^4 + x_{14}^6 \right) + 2100 \cdot \left( x_{24}^1 + x_{24}^3 + x_{24}^4 + x_{24}^6 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{34}^1 + x_{34}^3 + x_{34}^4 + x_{34}^6 \right) \leq 36000 \quad (11)$$

Друга платформа, п'ятий період  $p=2, t=5$

$$30000 \leq 1600 \cdot \left( x_{15}^1 + x_{15}^3 + x_{15}^4 + x_{15}^6 \right) + 2100 \cdot \left( x_{25}^1 + x_{25}^3 + x_{25}^4 + x_{25}^6 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{35}^1 + x_{35}^3 + x_{35}^4 + x_{35}^6 \right) \leq 36000 \quad (12)$$

Друга платформа, шостий період  $p=2, t=6$

$$50000 \leq 1600 \cdot \left( x_{16}^1 + x_{16}^3 + x_{16}^4 + x_{16}^6 \right) + 2100 \cdot \left( x_{26}^1 + x_{26}^3 + x_{26}^4 + x_{26}^6 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{36}^1 + x_{36}^3 + x_{36}^4 + x_{36}^6 \right) \leq 60000 \quad (13)$$

Третя платформа, перший період  $p=3, t=1$

$$65000 \leq 1600 \cdot \left( x_{11}^1 + x_{11}^2 + x_{11}^3 + x_{11}^7 \right) + 2100 \cdot \left( x_{21}^1 + x_{21}^2 + x_{21}^3 + x_{21}^7 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{31}^1 + x_{31}^2 + x_{31}^3 + x_{31}^7 \right) \leq 78000 \quad (14)$$

Третя платформа, другий період  $p=3, t=2$

$$65000 \leq 1600 \cdot \left( x_{12}^1 + x_{12}^2 + x_{12}^3 + x_{12}^7 \right) + 2100 \cdot \left( x_{22}^1 + x_{22}^2 + x_{22}^3 + x_{22}^7 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{32}^1 + x_{32}^2 + x_{32}^3 + x_{32}^7 \right) \leq 78000 \quad (15)$$

Третя платформа, третій період  $p=3, t=3$

$$35000 \leq 1600 \cdot \left( x_{13}^1 + x_{13}^2 + x_{13}^3 + x_{13}^7 \right) + 2100 \cdot \left( x_{23}^1 + x_{23}^2 + x_{23}^3 + x_{23}^7 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{33}^1 + x_{33}^2 + x_{33}^3 + x_{33}^7 \right) \leq 42000 \quad (16)$$

Третя платформа, четвертий період  $p=3, t=4$

$$35000 \leq 1600 \cdot \left( x_{14}^1 + x_{14}^2 + x_{14}^3 + x_{14}^7 \right) + 2100 \cdot \left( x_{24}^1 + x_{24}^2 + x_{24}^3 + x_{24}^7 \right) + \\ + 2800 \cdot \left( x_{34}^1 + x_{34}^2 + x_{34}^3 + x_{34}^7 \right) \leq 42000 \quad (17)$$

Третя платформа, п'ятий період  $p=3$ ,  $t=5$

$$35000 \leq 1600 \cdot (x_{15}^1 + x_{15}^2 + x_{15}^3 + x_{15}^7) + 2100 \cdot (x_{25}^1 + x_{25}^2 + x_{25}^3 + x_{25}^7) + \\ + 2800 \cdot (x_{35}^1 + x_{35}^2 + x_{35}^3 + x_{35}^7) \leq 42000 \quad (18)$$

Третя платформа, шостий період  $p=3$ ,  $t=6$

$$65000 \leq 1600 \cdot (x_{16}^1 + x_{16}^2 + x_{16}^3 + x_{16}^7) + 2100 \cdot (x_{26}^1 + x_{26}^2 + x_{26}^3 + x_{26}^7) + \\ + 2800 \cdot (x_{36}^1 + x_{36}^2 + x_{36}^3 + x_{36}^7) \leq 78000 \quad (19)$$

Обмеження по бюджету часу суден:  
для першого судна  $j=1$

$$1,9 \cdot x_{1t}^1 + 1,3 \cdot x_{1t}^2 + 1,2 \cdot x_{1t}^3 + 1,4 \cdot x_{1t}^4 + 0,8 \cdot x_{1t}^5 + 0,7 \cdot x_{1t}^6 + 0,7 \cdot x_{1t}^7 \leq 28 \cdot v_1^t, t = \overline{1, T} \quad (20)$$

для другого судна  $j=2$

$$2,1 \cdot x_{2t}^1 + 1,45 \cdot x_{2t}^2 + 1,35 \cdot x_{2t}^3 + 1,55 \cdot x_{2t}^4 + 0,9 \cdot x_{2t}^5 + 0,8 \cdot x_{2t}^6 + 0,8 \cdot x_{2t}^7 \leq 28 \cdot v_2^t, t = \overline{1, T} \quad (21)$$

для третього судна  $j=3$

$$2,4 \cdot x_{3t}^1 + 1,7 \cdot x_{3t}^2 + 1,6 \cdot x_{3t}^3 + 1,8 \cdot x_{3t}^4 + 1,1 \cdot x_{3t}^5 + 1 \cdot x_{3t}^6 + 1 \cdot x_{3t}^7 \leq 28 \cdot v_3^t, t = \overline{1, T} \quad (22)$$

Оптимізація проводилася за допомогою Пошук рішення Excel.

В результаті оптимізації отримана наступна структура флоту і його розподілу за варіантами роботи (табл. 5).

Таблиця 5

Структура флоту і його розподілу за варіантами роботи

Структура флоту, змінні						
Час	1	2	3	4	5	6
$v_1$	1	1	0	0	0	1
$v_2$	0	1	0	0	0	1
$v_3$	1	0	1	1	1	0
Розподілення суден, змінні						
Судно 1						
Схема 1	0	0	0	0	0	0
Схема 2	3	7	0	0	0	7
Схема 3	16	16	0	0	0	16
Схема 4	0	0	0	0	0	0
Схема 5	0	0	0	0	0	0
Схема 6	0	0	0	0	0	0
Схема 7	0	0	0	0	0	0

Продовження таблиці 5

Структура флоту, змінні						
Час	1	2	3	4	5	6
Судно 2						
Схема 1	0	12	0	0	0	12
Схема 2	0	2	0	0	0	2
Схема 3	0	0	0	0	0	0
Схема 4	0	0	0	0	0	0
Схема 5	0	0	0	0	0	0
Схема 6	0	0	0	0	0	0
Схема 7	0	0	0	0	0	0
Судно 3						
Схема 1	9	0	7	7	7	0
Схема 2	4	0	2	2	2	0
Схема 3	0	0	4	4	4	0
Схема 4	0	0	0	0	0	0
Схема 5	0	0	0	0	0	0
Схема 6	0	0	0	0	0	0
Схема 7	0	0	0	0	0	0

Аналіз рішення дозволяє зробити наступні висновки:

- 1) в періоди часу  $t = 1, 2, 6$ , тобто періоди з більш високим попитом на забезпечення платформ, слід орендувати в тайм-чартер і використовувати 2 буксира;
- 2) в періоди часу  $t = 3, 4, 5$ , тобто в періоди більш низького попиту, досить використовувати один буксир;
- 3) з розглянутих 7 варіантів роботи суден (обходу платформ), оптимальними є наступні варіанти (рис. 1).

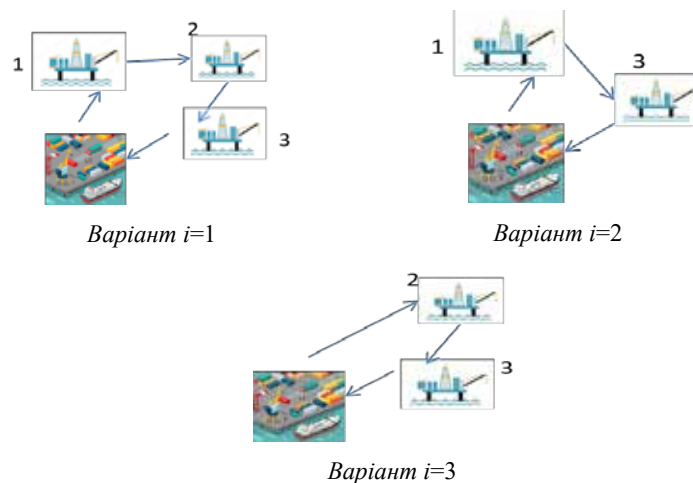


Рис. 1. Оптимальні варіанти роботи суден

Значення цільової функції становлять 424 845 дол., таким чином, усереднені витрати на доставку 1 т вантажів в цілому по системі поставок становлять

2,74 дол./т, де сумарна кількість всіх вантажів, що перевозяться (по мінімальній межі) становить  $Q_t^{p \max} = 155000$  т.

$$\text{Сумарні витрати} \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^m R_j^{m_t} \cdot \tau \cdot v_j^t + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n R_j^i \cdot x_{jt}^i = 424845 \text{ дол.}$$

Проте, забезпечення мінімізації витрат в рамках моделі може не забезпечувати «реальну» їх мінімізацію. Тому отримане рішення по кожній з моделі повинно бути проаналізовано з точки зору ефективності роботи кожного судна.

Оцінимо економічну доцільність отриманого оптимального варіанту забезпечення видобувних платформ за допомогою співставлення часу роботи суден отриманому в результаті рішення оптимального плану із експлуатаційним періодом

$$\frac{\sum_{i=1}^7 t_j^i \cdot x_{jt}^i}{\tau} \geq \beta, j = \overline{1,3}, t = \overline{1,6} \quad (25)$$

де  $0 < \beta < 1$  – коефіцієнт, який відображає допустиму межу використання бюджету часу орендованих суден і задається особою, яка приймає рішення (згідно зі статистикою роботи подібних суден в подібних умовах). Наприклад,  $\beta = 0,75$  означає, що судна, які використовуються на забезпеченні постачання платформ менш, ніж 75% свого бюджету часу, визнаються як неефективно використовувані.

Згідно розрахунків, оптимальному плану відповідають наступні значення для часу роботи суден та коефіцієнт, що відображає допустиму межу використання бюджету часу орендованих суден (табл. 6).

Таблиця 6

**Ефективність бюджету часу**

Варіанти	Час роботи суден по періодах, діб					
	1	2	3	4	5	6
Судно 1	22	28	0	0	0	28
Судно 2	0	27	0	0	0	27
Судно 3	28	0	26	26	26	0
Варіанти	Коефіцієнт $\beta$					
	1	2	3	4	5	6
Судно 1	0,785	1	0	0	0	1
Судно 2	0	0,964	0	0	00	0,964
Судно 3	1	0	0,928	0,928	0,928	0

Як показують розрахунки, практично для всіх суден і всіх тимчасових періодів, використання бюджету часу 92-100%, що є дуже високим показником. Тому можна вважати, що отримане рішення є економічно доцільним.

Умова (25) забезпечує «раціональне» використання бюджету часу орендованого судна, що визначається більше нуля значенням сумарного часу його роботи в аналізованому періоді. Якщо при перевірці виникнуть ситуації, коли умова (25) не виконується, то вихідні дані повинні бути відкориговані з урахуванням результатів аналізу отриманого рішення, якщо це необхідно.

Відзначимо, що на першому етапі експериментальних розрахунків не враховували можливий негативний вплив погодних умов. І, при бюджеті часу суден, що практично повністю використовується, в разі виникнення несприятливих погодних умов відсутня практична можливість даними кількістю і складом флоту виконати всі умови поставок.

Відповідно до запропонованого підходу, спираючись на існуючі розробки [12-14], до обліку негативного впливу погодних умов, нехай час рейсів в середньому збільшується на 10%, тобто поправочний коефіцієнт  $I_n = 1,1$ . Відповідні значення вихідних даних наведено в табл. 7.

Таблиця 7

**Час рейсу та витрати за варіантами  
з урахуванням поправочного коефіцієнта**

Варіант обходу	Судно 1		Судно 2		Судно 3	
	$t_j^i$ , діб	$r_j^i$ , дол.	$t_j^i$ , діб	$r_j^i$ , дол.	$t_j^i$ , діб	$r_j^i$ , дол.
Схема 1	2,09	1397	2,31	1848	2,64	2290
Схема 2	1,43	968	1,595	1285	1,87	1614
Схема 3	1,32	858	1,485	1148	1,76	1459
Схема 4	1,54	1078	1,705	1421	1,98	1769
Схема 5	0,88	649	0,99	858	1,21	1092
Схема 6	0,77	539	0,88	722	1,1	937
Схема 7	0,77	539	0,88	722	1,1	937

В результаті оптимізації отримана наступна структура флоту і його розподілу за варіантами роботи (табл. 8).

Таблиця 8

**Структура флоту і його розподіл за варіантами роботи  
з урахуванням поправочного коефіцієнта**

Структура флоту, змінні						
Час	1	2	3	4	5	6
$v_1$	0	0	2	2	2	0
$v_2$	1	1	0	0	0	1
$v_3$	1	1	0	0	0	1
Розподілення суден, змінні						
Судно 1						
Схема 1	0	0	13	13	13	0
Схема 2	0	0	3	3	3	0
Схема 3	0	0	6	6	6	0
Схема 4	0	0	0	0	0	0
Схема 5	0	0	0	0	0	0
Схема 6	0	0	0	0	0	0
Схема 7	0	0	0	0	0	0

Продовження таблиці 8

Структура флоту, змінні						
Час	1	2	3	4	5	6
Судно 2						
Схема 1	0	0	0	0	0	0
Схема 2	4	4	0	0	0	4
Схема 3	12	12	0	0	0	12
Схема 4	0	0	0	0	0	0
Схема 5	0	0	0	0	0	0
Схема 6	0	0	0	0	0	0
Схема 7	0	0	0	0	0	0
Судно 3						
Схема 1	9	9	0	0	0	9
Схема 2	2	2	0	0	0	2
Схема 3	0	0	0	0	0	0
Схема 4	0	0	0	0	0	0
Схема 5	0	0	0	0	0	0
Схема 6	0	0	0	0	0	0
Схема 7	0	0	0	0	0	0

В результаті рішення задачі з урахуванням поправочного коефіцієнту були отримані наступні результати:

1) в періоди часу  $t = 1, 2, 6$ , тобто періоди з більш високим попитом на забезпечення платформ, як і раніше, слід орендувати в тайм-чартер і використовувати 2 буксира;

2) в періоди часу  $t = 3, 4, 5$  число необхідних суден збільшилася до 2-х, що збільшило усереднені витрати на доставку 1 т вантажу;

3) з розглянутих 7 варіантів роботи суден (обходу платформ), оптимальними залишаються перші три варіанти (див. рис. 1);

Значення цільової функції становить 512 734 дол., таким чином, усереднені витрати на доставку 1 т вантажів в цілому по системі поставок становлять 3,31 дол./т, сумарні витрати 512 734 дол.

Аналогічно викладеного раніше, було проведено аналіз ефективності використання бюджету часу суден (табл. 9).

Таблиця 9

**Ефективність бюджету часу з урахуванням впливу погодних умов**

Варіанти	Час роботи суден по періодах, діб					
	1	2	3	4	5	6
Судно 1	0	0	39	39	39	0
Судно 2	24	24	0	0	0	24
Судно 3	28	28	0	0	0	28
Варіанти	Коефіцієнт $\beta$					
	1	2	3	4	5	6
Судно 1	0	0	0,696	0,696	0,696	0
Судно 2	0,857	0,857	0	0	0	0,857
Судно 3	1	1	0	0	0	1

Таким чином, збільшення тривалості рейсів під впливом погодних умов обґрунтувало необхідність використання додаткових суден, але в цілому, ефективність використання бюджету часу суден як і раніше залишається високою (від 70-100 %).

Відзначимо, що згідно з прийнятим вихідними даними оптимальними з'явилися варіанти роботи 1, 2, 3, що передбачають обхід 2 і 3 платформ. Проаналізуємо, як впливає відстань від бази до платформ на оптимальні варіанти роботи суден (маршрутів обходу платформ). У процесі експериментальних досліджень здійснювалося варіювання дальністю бази на величину в проміжку 25-90 миль як в сторону зменшення, так і в бік збільшення. Висновки, які були зроблені після розрахунків відображають перевагу коротких варіантів обходу (по одній платформі) при відносній близькості бази від платформ і довших (по 2 або 3 платформі) при відносній віддаленості бази від платформ.

**Висновки.** Таким чином, в роботі були проведені та представлені результати експериментальних розрахунків по моделі обґрунтування структури і формування плану роботи спеціалізованих суден постачання при обслуговуванні морських бурових платформ. Отримані результати підтверджують можливість отримати оптимальну структуру спеціалізованих суден по вантажопідйомності і визначити їх розподіл за варіантами маршруту роботи. Встановлено, що в періоди з низьким попитом на забезпечення платформ, достатньо використовувати один буксир на відміну від періодів з більш високим попитом на забезпечення. З урахуванням несприятливих погодних умов кількість суден в період низького попиту на забезпечення збільшується до 2-х буксирів, що, в свою чергу, збільшує витрати на транспортування 1 т вантажу. Оцінка ефективності використання бюджету часу роботи спеціалізованих суден дозволила стверджувати, що судна експлуатуються ефективно. А також проаналізовано вплив віддаленості бази від платформ та встановлено, що при скороченні відстані доцільніше використовувати короткі маршрути, які включають в себе по одній платформі. Отже, проведені експериментальні розрахунки підтверджують достовірність моделі обґрунтування структури і формування плану роботи спеціалізованих суден постачання при обслуговуванні морських бурових платформ та її придатність для вирішення практичних завдань.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Halvorsen-Weare, E. E., Fagerholt, K. Optimization in offshore supply vessel planning. *Optimization and Engineering*. 2017. № 18(1), P. 317-341. DOI: 10.1007/s11081-016-9315-4.
2. Azi, N., Gendreau, M., Potvin, J. Y. An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles. *European Journal of Operational Research*. 2010. № 202(3), P. 756-763.
3. Fagerholt, K. Optimal fleet design in a ship routing problem. *International transactions in operational research*. 1999. № 6(5), P. 453-464.
4. Gribkovskaia, I., Laporte, G., Shlopak, A. A tabu search heuristic for a routing problem arising in servicing of offshore oil and gas platforms. *Journal of the Operational Research Society*. 2008. № 59(11), P. 1449-1459.
5. Halvorsen-Weare, E. E., Fagerholt, K., Nonås, L. M., Asbjørnslett, B. E. Optimal fleet composition and periodic routing of offshore supply

- vessels. *European Journal of Operational Research*. 2012. № 223(2), P. 508-517.
6. Tan, C. C. R., Beasley, J. E. A heuristic algorithm for the period vehicle routing problem. *Omega*. 1984. № 12(5), P. 497-504.
  7. Макеев Г.А. Определение необходимого и достаточного количества судов обслуживающего морские буровые установки флота. *Морской вестник*. СПб., 2008. № 1 (25). С. 39-42.
  8. Шибяев О.Г., Акімова О.В., Кравченко О.А. Класифікація технічних засобів, що забезпечують процес видобутку і транспортування вуглеводнів в шельфах Чорного та Азовського морів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. № 4 (234). С. 119-125. ISSN 1998-7927.
  9. Akimova O., Kravchenko A. Development of the methodology of the choice of the route of work of platform supply vessels in the shelf of the seas. *International Journal "Technology audit and production reserves"*. 2018. Vol. 5, № 2 (43). pp. 30-35. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.146322.
  10. Akimova O., Kravchenko A. Development of a method for selecting a way of raw material transportation from the offshore drilling platform to the onshore infrastructure. *International Journal "Technology audit and production reserves"*. 2019. Vol. 2, № 2 (46). pp. 25-31. DOI: 10.15587/2312-8372.2019.169423.
  11. Кравченко О.А. Обґрунтування оптимальної структури суден постачання морських бурових платформ і організація їх роботи. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2019. № 3 (251). С. 94-100. ISSN 1998-7927.
  12. Онищенко С.П., Вишневская О.Д. Обеспечение эффективности выполнения судном рейса с учетом возможного воздействия факторов риска. *Вісник економіки транспорту і промисловості: зб. наук.-практ. ст.* Харків: УкрДУЗТу, 2016. № 56. С. 104-113.
  13. Вишневская О.Д. Факторы риска, обуславливающие отклонения результатов выполнения рейса морским судном. *SWorld: сб. науч. тр.* 2016. №45 (1). С. 33-36.
  14. Стецюк Т.Г. Сизов В.Г. К вопросу о расчетном определении падения скорости судна в штормовых условиях плавания. *Судовождение*. 2010. С. 22-27.

#### REFERENCES

1. Halvorsen-Weare, E. E. & Fagerholt, K. (2017). Optimization in offshore supply vessel planning. *Optimization and Engineering*, 18(1), 317-341. – DOI: 10.1007/s11081-016-9315-4.
2. Azi, N., Gendreau, M., & Potvin, J. Y. (2010). An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles. *European Journal of Operational Research*, 202(3), 756-763.
3. Fagerholt, K. (1999). Optimal fleet design in a ship routing problem. *International transactions in operational research*, 6(5), 453-464.



4. Gribkovskaia, I., Laporte, G. & Shlopak, A. (2008). A tabu search heuristic for a routing problem arising in servicing of offshore oil and gas platforms. *Journal of the Operational Research Society*, 59(11), 1449-1459.
5. Halvorsen-Weare, E. E., Fagerholt, K., Nonås, L. M. & Asbjørnslett, B. E. (2012). Optimal fleet composition and periodic routing of offshore supply vessels. *European Journal of Operational Research*, 223(2), 508-517.
6. Tan, C. C. R. & Beasley, J. E. (1984). A heuristic algorithm for the period vehicle routing problem. *Omega*, 12(5), 497-504.
7. Makeev G.A. (2008). Determining the necessary and sufficient number of ships of the fleet serving offshore drilling rigs [Opredelenie neobhodimogo i dostatochnogo kolichestva sudov obsluzhivayushogo morskije burovyje ustanovki flota]. *Maritime Gazette*, 1 (25), 39-42. [in Russian].
8. Shibaev O.G., Akimova O.V. & Kravchenko O.A. (2017). Classification of technical means that ensure the process of extraction and transportation of hydrocarbons on the shelves of the Black and Azov seas [Klasyfikatsiia tekhnichnykh zasobiv, shcho zabezpechuiut protses vydobutku i transportuvannia vuhlevodniv v shelfakh Chornoho ta Azovskoho moriv]. *Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl*, 4 (234), 119-125. ISSN 1998-7927. [in Russian].
9. Akimova O.V. & Kravchenko A.A. (2018). Development of the methodology of the choice of the route of work of platform supply vessels in the shelf of the seas. *International Journal "Technology audit and production reserves"*, 2 (43), 30-35. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.146322.
10. Akimova O.V. & Kravchenko A.A. (2019). Development of a method for selecting a way of raw material transportation from the offshore drilling platform to the onshore infrastructure. *International Journal "Technology audit and production reserves"*, № 2 (46), 25-31. DOI: 10.15587/2312-8372.2019.169423. [in Ukrainian].
11. Kravchenko O.A. (2019). Justification of the optimal structure of vessels for the supply of offshore drilling platforms and the organization of their work [Obgruntuvannia optymalnoi struktury suden postachannia morskyykh burovykh platform i orhanizatsiia yikh roboty]. *Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl*, 3 (251), 94-100. ISSN 1998-7927. [in Ukrainian].
12. Onishchenko S.P. & Vishnevskaya O.D. (2016). Ensuring the efficiency of the ship's voyage, taking into account the possible impact of risk factors [Obespechenie effektivnosti vypolneniya sudnom rejsa s uchetom vozmozhnogo vozdeystviya faktorov riska]. *Herald of the economy of transport and industry: coll. science and practice Art.*, 56, 104-113. [in Russian].
13. Vishnevskaya O.D. (2016). Risk factors causing deviations in the results of a voyage by sea vessel [Faktery riska, obuslavlivayushie otkloneniya rezultatov vypolneniya rejsa morskim sudnom]. *SWorld: Sat. science tr.*, 45 (1), 33-36. [in Russian].
14. Stetsyuk T.G. & Sizov V.G. (2010). To the question of the calculated determination of the drop in the ship's speed in stormy sailing conditions [K voprosu o raschetnom opredelenii padeniya skorosti sudna v shtormovykh usloviyah plavaniya]. *Court proceedings 2010*. pp. 22-27. [in Russian].