

РОЗДІЛ 9. МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ, МОДЕЛІ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕКОНОМІЦІ

ОПТИМІЗАЦІЯ СТРАТЕГІЇ ДНОПОГЛИБЛЕННЯ ПІДХІДНОГО КАНАЛУ ТА ОПЕРАЦІЙНИХ АКВАТОРІЙ ПОРТОВИХ КОМПЛЕКСІВ

OPTIMIZATION OF DREDGING STRATEGY OF APPROACH CHANNEL AND WATER AREAS OF PORT COMPLEXES

Світові тенденції на ринку зерна та вантажоперевезень полягають в тому, що власники суден прагнуть досягнути вигоди від масштабу за рахунок будівництва та використання суден, які перевищують за розмірами існуючі (довжина, ширина, осадка). Використання великотоннажних суден має переваги, зокрема, у зменшенні витрат на фрахт до 15–20% і збільшенні продуктивності їхньої обробки біля причалів без необхідності довантаження на рейді. Щоб обробляти такі судна, порти повинні модернізувати свою інфраструктуру, наземні об'єкти та операційну діяльність. Тому стає важливим визначення ефективності днопоглиблювальних робіт на підхідному каналі та акваторіях портів, які будуть відповідати цим тенденціям. В статті досліджено розробку математичних моделей оптимізації планування днопоглиблювальних робіт, включаючи фактор заносності дна ґрунтовими масами.

Ключові слова: днопоглиблення, економіко-математична модель оптимізації, занесення дна ґрунтовими масами, глибина, портова інфраструктура.

Global trends in the grain and cargo markets are that ship owners seek to achieve economies of scale by building and operating vessels that are larger than existing vessels (length, width, draft). The use of large-tonnage vessels has advantages, in particular, in reducing freight costs by up to 15–20% and increasing the productivity of their handling at the berths without the need for additional loading at the raid. To handle such vessels, ports must modernize their infrastructure, land-based facilities and operations. Therefore, it becomes important to determine the efficiency of dredging works in the approach channel and water areas of port complexes, which will correspond to these trends. The article analyzed foreign experience in planning and dredging, as well as studied its impact on the environment. The development of mathematical models to optimize the planning of dredging works, including the factor of sediments of bottom soil masses, was investigated. The purpose of the article is to develop an economic-mathematical model for optimizing the strategy of dredging in the approach channel and operational water areas of port complexes. This model takes into account revenue from stevedoring operations in the port, revenue from port dues for sea and river vessel calls, investment in dredging and other factors. In the paper, a model was developed, dependencies were analyzed and equations of model factors were compiled, and appropriate verification calculations were carried out. The results confirm that sediments of bottom soil masses depends on the depth at a certain point in time, that is, the greater the amount of dredging, the greater the sediments of bottom soil masses. In addition, an increase in the amount of sediments is observed during dredging operations. The decrease in depth leads to a decrease in the number of sea and river vessels, as the world uses more and more large-tonnage vessels, which requires deep-sea water areas and channels. This model demonstrates that its use contributes to the development of a competent dredging strategy, which, in turn, has a positive effect on the development of port infrastructure.

Key words: dredging, economic-mathematical model of optimization, sediments of the bottom soil masses, depth, port infrastructure.

УДК 627.2

DOI: <https://doi.org/10.32782/bses.81-34>

Гусак В.О.

аспірантка кафедри підприємництва та туризму,
Одеський національний морський університет

Husak Viktoriia

Odessa National Maritime University

Постановка проблеми. Існуючі світові тенденції ринку зерна та фрахова кон'юнктура полягають у прагненні судновласників реалізувати ефект масштабу за допомогою будівництва та застосування суден, які перевищують за своїми параметрами (довжина, ширина, осадка). Крім того, в перспективі зростання експорту зернових планується за рахунок Китаю та країн Південно-Східної Азії. Для перевезення у цих напрямках найбільш ефективним є використання суден дедвейтом понад 70 тис. т. Переваги використання великотоннажних суден також полягають в економії на фрахті на 15–20% та збільшенні інтенсивності їх обробки біля причалів без довантаження на рейді. Для обробки таких суден портам необхідно модернізувати інфраструктуру (причали,

басейни акваторій для розвороту суден тощо), наземні об'єкти (крани, складські приміщення, офіси тощо) та операційну діяльність (днопоглиблення підхідного каналу та операційних акваторій портів, покращення транспортного зв'язку із внутрішніми регіонами тощо).

Поява суден з великим осіданням вимагало забезпечення достатніх глибин у підхідних каналах та портах. Зростання судноплавства супроводжується посиленням заносності каналів. Спостерігається ерозія схилів та обвалення берегів та укосів. Ці явища пояснюються сильними потоками, що впливають на дно і підводні та надводні укоси каналу при русі судна. Тому у світовій практиці були розроблені методи проведення днопоглиблювальних робіт. Такі роботи полягають у розши-

ренні та поглиблення водойм і водотоків шляхом виїмки ґрунту.

Розрізняють два основні види днопоглиблювальних робіт: капітальні, які виконуються при спорудженні гідротехнічних об'єктів, а також для покращення судноплавних умов на водних шляхах, та експлуатаційні (або ремонтні), що здійснюються щорічно з метою видалення наносів, які порушують нормальну експлуатацію гідротехнічних споруд та судноплавних шляхів.

Тому актуальною стає проблема обґрунтування та визначення ефективності проведення днопоглиблювальних робіт на підхідному каналі та операційних акваторіях портових комплексів. Крім того, у зв'язку з тим, що відмовитися від проведення таких робіт поки неможливо, необхідно шукати шляхи мінімізації та компенсації негативного впливу подібного роду діяльності на довкілля.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Загальну проблематику експлуатації внутрішніх водних шляхів аналізують Москвіченко І., Стаднік В. в статті [5, с. 79]. Питанню багаторічного планування днопоглиблювальних робіт з обслуговування судноплавного каналу та управління днопоглиблювальним матеріалом присвячена стаття Zheyong Bian та інших [6, с. 160]. Крім того, авторами наведена математична модель, розроблена для оптимізації планування днопоглиблювальних робіт у руслі та управління витягнутими матеріалами в замкнених сховищах. В роботі [3, с. 69] Khatereh Ahadi та інші моделюють проблему складання бюджету та вибору проектів внутрішнього технічного обслуговування днопоглиблювальних робіт, щоб максимізувати вартість товарів, які можна транспортувати без збоїв системою внутрішніх водних шляхів. Моделювання відновлення приливної піщаної хвилі після днопоглиблення та вплив різних типів стратегій днопоглиблення розглянуті авторами G.H.P. Samptans та іншими в статті [2, с. 50]. В роботі [4, с. 85] Mingxia Zheng та інші наводять математичну модель програмування для визначення оптимальної кількості та початкових масштабів портів для будівництва в певній зоні затоки за допомогою виробничої функції. У статті [7, с. 265] Zhi-Chun Li та інші розглядають питання стратегічного планування портів у внутрішньому річковому коридорі із залежною від місця розташування глибиною водного шляху, яка визначає максимальні розміри суден, що заходять в порт. Запропоновано модель вертикальної структури для врахування взаємозв'язків між портовими операторами, перевізниками та вантажовідправниками. Розроблена комплексна модель, яку можна використовувати для аналізу інвестиційних та регуляторних рішень для внутрішнього річкового судноплавного коридору, що складається з кількох різнорідних портів.

Постановка завдання. Будівництво нового або експлуатація існуючого морського порту пов'язані з вирішенням дуже важливої проблеми – організації та проведення днопоглиблення підхідного каналу та операційних акваторій портових комплексів. Від параметрів гідротехнічних споруд та причальної інфраструктури, у тому числі й від глибини акваторії та підхідного каналу порту, залежить визначення максимального за параметрами типу судна, яке може прийняти під обробку порт. Отже, від цього залежить, яке максимальне судно зможе потрапити в порт, а саме скільки максимально вантажу може прийняти судно, враховуючи його параметри: чим менше прохідне осідання акваторії та каналу порту, тим менше за параметрами може пройти судно та, відповідно, менше вантажу може прийняти судно у порівнянні з більш тоннажним судном. Тому осідання судна та прохідне осідання по каналу та акваторії є одним з основних обмежувальних параметрів.

Крім того, в силу природних процесів глибини поступово зменшуються, що унеможливорює судноплавство. Це вимагає відповідне підтримання глибин у належному стані. Ця проблема стосується не тільки морських акваторій, а й внутрішніх водних шляхів. Щорічно мільярди тонн осадових відкладень, що переносяться течією річок та прибережних вод, осідають на морському та річковому дні, зменшуючи глибину та утруднюючи судноплавство. Через відсутність своєчасного днопоглиблення багато портів припиняють своє існування.

Стосовно існуючого порту, днопоглиблення підхідного каналу та операційних акваторій портових комплексів – це не тільки обов'язкові роботи підтримки експлуатаційних характеристик акваторії та водних підходів, а й необхідний елемент підвищення конкурентоспроможності портового комплексу.

З огляду на вищесказане, обґрунтування та визначення ефективності днопоглиблювальних робіт доцільно проводити способом оптимізації обсягів днопоглиблення при максимізації чистої приведеної вартості, отриманої від використання оновлених акваторій, підхідного каналу та внутрішніх водних шляхів, враховуючи інвестиції у днопоглиблення.

Таким чином, економіко-математична модель оптимізації стратегії днопоглиблення підхідного каналу та операційних акваторій портових комплексів повинна враховувати наступне:

- прибуток від стивідорних операцій у даному порту;
- дохід від портових зборів за суднозаходи морських та річкових суден;
- інвестиції у днопоглиблення.

Мета роботи – побудова економіко-математичної моделі оптимізації стратегії днопоглиблення підхідного каналу та операційних акваторій порто-

вих комплексів з урахуванням всіх цих важливих факторів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Побудуємо економіко-математичну модель оптимізації стратегії днопоглиблення підхідного каналу та операційних акваторій портових комплексів.

Будемо використовувати такі умовні позначення:

t – період часу, дiб;

$I(t)$ – глибина в період часу t , $t = 1, T$, см;

$I(t)$ – інвестиції у днопоглиблення в період часу t , $t = 1, T$, грош. од.;

$\Delta I(I(t))$ – величина днопоглиблення при інвестиціях $I(t)$, $t = 1, T$, см;

$L(I(t))$ – величина заносності дна ґрунтовими масами при глибині $I(t)$, $t = 1, T$, см.

Всі підхідні канали та операційні акваторії тією чи іншою мірою схильні до занесення. Виділяють головні причини занесення – це недостатня транспортуюча здатність водного потоку і сповзання ґрунту бічних укосів дна. Здатність транспортуючого потоку в смузі прорізу зменшується в порівнянні з її початковим значенням, частина ґрунту, що надходить у проріз з боку бічних укосів, залишається на дні і призводить до підвищення його позначок. Крім того, ґрунт, що сповзає з укосів, надходить у проріз, обмежуючи його корисну ширину та глибину. У міру згладжування укосу цей процес загасає, але теоретично він не припиниться повністю, поки дно на ділянці прорізу не відновить свою первісну форму. Як тільки ґрунт, що сповз з укосів, починає обмежувати судноплавну глибину в прорізі, виконується її повторна розробка (днопоглиблення). Обидва процеси – занесення і сповзання ґрунту укосів – мають дві загальні риси: їх початкова інтенсивність пропорційна товщині знятого шару ґрунту і обидва вони з часом (у міру заповнення прорізу ґрунтом) згасають.

Тому чим більше величина днопоглиблення, тим більш величина заносності дна ґрунтовими масами. Звідси відповідна функція є зростаючою і опуклою вгору. Графічно представимо залежність заносності дна $L(I(t))$ ґрунтовими масами від глибини $I(t)$ на рисунку 1:

Принциповий вигляд динаміки глибини представимо наступним рівнянням:

$$I(t) = I(t-1) + \Delta I(I(t)) - L(I(t)), t = \overline{1, T}.$$

Перший доданок (1) показує існуючу глибину на кінець минулого року до проведення днопоглиблювальних робіт у даному році, другий – відображає величину днопоглиблення при відповідних інвестиціях $I(t)$, третій – величину заносності дна ґрунтовими масами в залежності від глибини.

Цільовою функцією (2) моделі оптимізації стратегії днопоглиблення є сумарна чиста приведена вартість від портових зборів та від стивідорних операцій, яка враховує величину інвестицій у відповідне днопоглиблення:

$$F = \sum_{t=1}^T \frac{D(I(t)) + n(I(t)) * d_n + m(I(t)) * d_m - I(t) - I_1(t)}{(1 + \alpha)^t} \rightarrow \max_{\{I(t)\}_{t=1, T}} \quad (2)$$

де F – сумарна чиста приведена вартість від портових зборів та від стивідорних операцій, грош. од.;

$D(I(t))$ – прибуток від перевантаження вантажів при глибині $I(t)$, $t = 1, T$, грош. од.;

$n(I(t))$ – кількість суднозаходів річкових суден при глибині $I(t)$, $t = 1, T$, од.;

$m(I(t))$ – кількість суднозаходів морських суден при глибині $I(t)$, $t = 1, T$, од.;

d_n – середня ставка портових зборів за суднозахід річкового судна, грош. од.;

d_m – середня ставка портових зборів за суднозахід морського судна, грош. од.;

α – ставка дисконту.

$I_1(t)$ – величина постійних витрат, пов'язаних з проведенням днопоглиблювальних робіт, грош. од.

За даною моделлю проведемо перевіорний розрахунок.

Величина днопоглиблення ΔI визначається на підставі аналізу залежності даного показника від інвестицій I . Також встановимо, що днопоглиблювальні роботи проводяться 1 раз у 5 років.

Величина заносності дна ґрунтовими масами $L(I)$ визначається на підставі аналізу залежності даного показника від глибини I у різні моменти часу.

Кількість морських $m(I)$ та річкових $n(I)$ суден визначається в залежності від існуючої у кожен рік глибини I .

Прибуток від перевантаження вантажів $D(I)$ визначається на підставі аналізу залежності даного показника від глибини I .

Як вже зазначалось, цільова клітинка показує сумарну чисту приведену вартість від портових зборів та від стивідорних операцій.

Приклад розрахунку за даною моделлю наведемо в таблиці 1.

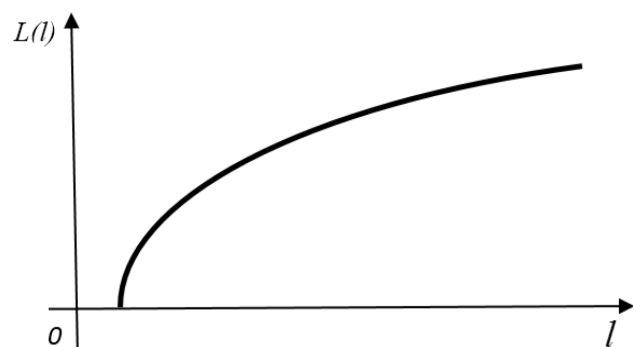


Рис. 1. Принциповий вигляд залежності заносності дна $L(I(t))$ ґрунтовими масами від глибини $I(t)$

Джерело: власна розробка автора

Результати розрахунків за моделлю оптимізації стратегії днопоглиблення підхідного каналу та операційних акваторій портових комплексів

Показники	Позначення	Роки										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Інвестиції у днопоглиблення, грош. од.	I		775,0	0,0	0,0	0,0	313,0	0,0	0,0	0,0	34,2	0,0
Величина днопоглиблення, см	Δl		169,4	0,0	0,0	0,0	97,8	0,0	0,0	0,0	25,6	0,0
Глибина, см	l	200,0	349,2	320,4	293,2	267,5	341,2	312,8	286,1	260,8	262,7	238,9
Величина заносності дна ґрунтовими масами, см	$L(l)$	20,2	28,8	27,2	25,6	24,1	28,4	26,8	25,2	23,7	23,8	22,4
Величина постійних витрат, грош. од.	l_1		300,0	0,0	0,0	0,0	300,0	0,0	0,0	0,0	300,0	0,0
Кількість суднозаходів річкових суден, од.	$n(l)$		926,0	911,0	896,0	880,0	922,0	907,0	891,0	876,0	877,0	861,0
Кількість суднозаходів морських суден, од.	$m(l)$		162,0	158,0	153,0	149,0	161,0	156,0	152,0	148,0	148,0	144,0
Прибуток портових зборів від річкового суднообігу, грош. од.	$D(n)$		370,4	364,4	358,4	352,0	368,8	362,8	356,4	350,4	350,8	344,4
Прибуток портових зборів від морського суднообігу, грош. од.	$D(m)$		324,0	316,0	306,0	298,0	322,0	312,0	304,0	296,0	296,0	288,0
Прибуток від перевантаження вантажів, грош. од.	$D(l)$		682,4	670,5	658,4	646,2	679,1	667,2	655,1	642,9	643,8	631,4
Сумарний прибуток, грош. од.	D		1376,8	1350,9	1322,8	1296,2	1369,9	1342,0	1315,5	1289,3	1290,6	1263,8
Сумарна чиста приведена вартість від портових зборів та від стивідорних операцій, грош. од.	F		298,8	1324,2	1283,9	1245,6	720,2	1264,2	1227,0	1190,6	874,4	1144,1
Цільова клітинка, грош. од.	$\sum F$	10573,1										

Джерело: власна розробка автора

Результати розрахунків підтверджують залежність занесення від глибини у даний момент часу, а саме чим більше величина днопоглиблення, тим більше величина заносності дна ґрунтовими масами – зі зменшенням рівня глибини величина заносності зменшується, а в момент проведення

днопоглиблювальних робіт знов спостерігаємо збільшення величини заносності. Зі зменшенням глибини автоматично спадає кількість заходів морських та річкових суден, тому що кон'юнктура світового флоту має тенденцію до використання великотоннажних суден, що обумовлює акту-

альність будівництва глибоководних акваторій і каналів.

Тому робимо висновок, що проведення грамотної стратегії днопоглиблення позитивно сприяє розвитку функціонування портової інфраструктури, але обмежується фактором заносності ґрунтами.

Висновки з проведеного дослідження.

Таким чином, побудована економіко-математична модель оптимізації стратегії днопоглиблення підхідного каналу та операційних акваторій портових комплексів має низку особливостей:

1. Враховує прибуток від стивідорних операцій у даному порту.

2. Включає дохід від портових зборів за суднозаходи морських та річкових суден.

3. Передбачає наявність інвестицій у днопоглиблення.

4. Модель включає фактор занесення дна ґрунтовими масами, що робить її більш цікавою, докладно складеною.

5. Цільовою функцією моделі оптимізації стратегії днопоглиблення є сумарна чиста приведена вартість від портових зборів та від стивідорних операцій, яка враховує величину інвестицій у відповідне днопоглиблення.

6. За моделлю були проведені відповідні розрахунки, які підтверджують, що заносність дна ґрунтовими масами залежить від глибини на даний момент часу: чим більше днопоглиблення, тим більша заносність, і навпаки – зі зменшенням глибини заносність зменшується, але при проведенні днопоглиблювальних робіт знову спостерігається збільшення заносності. Це може мати наслідки для морських і річкових суден, оскільки вони не можуть пройти в занадто мілких водах. Тому будівництво глибоководних акваторій і каналів є актуальним. Грамотна стратегія днопоглиблення може позитивно вплинути на розвиток портової інфраструктури, але є обмеження у заносності ґрунтами.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Axel Merkel, Johan Holmgren. Dredging the depths of knowledge: Efficiency analysis in the maritime port sector. *Transport Policy*. 2017. № 60. P. 63–74.

2. G.H.P. Campmans, P.C., Roos N.R., Van der Sleen, S.J.M.H. Hulscher. Modeling tidal sand wave recovery after dredging: effect of different types of dredging strategies. *Coastal Engineering*. 2021. № 165. P. 45–53.

3. Khatereh Ahadi, Kelly M. Sullivan, Kenneth Ned Mitchell. Budgeting maintenance dredging projects

under uncertainty to improve the inland waterway network performance. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2018. № 119. P. 63–87.

4. Mingxia Zheng, Feng Lian, Zhongzhen Yang. Study on the transport advantage and optimal port scale of a Bay Area. *Ocean & Coastal Management*, 2022. № 219. P. 73–97.

5. Москвіченко І., Стадник В. Роль внутрішнього водного транспорту в національному господарстві України. *Причорноморські економічні студії*. 2018. № 27. С. 78–84.

6. Zheyong Bian, Yun Bai, W. Scott Douglas, Ali Maher, Xiang Liu. Multi-year planning for optimal navigation channel dredging and dredged material management. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2022. № 159. P. 159–167.

7. Zhi-Chun Li, Mei-Ru Wang, Xiaowen Fu. Strategic planning of inland river ports under different market structures: Coordinated vs. independent operating regime. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2021. № 156. P. 263–287.

REFERENCES:

1. Axel Merkel, Johan Holmgren. (2017). Dredging the depths of knowledge: Efficiency analysis in the maritime port sector. *Transport Policy*, vol. 60, pp. 63–74.

2. G.H.P. Campmans P.C., Roos N.R., Van der Sleen, S.J.M.H. Hulscher. (2021). Modeling tidal sand wave recovery after dredging: effect of different types of dredging strategies. *Coastal Engineering*, vol. 165, pp. 45–53.

3. Khatereh Ahadi, Kelly M. Sullivan, Kenneth Ned Mitchell. (2018). Budgeting maintenance dredging projects under uncertainty to improve the inland waterway network performance. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 119, pp. 63–87.

4. Mingxia Zheng, Feng Lian, Zhongzhen Yang. (2022). Study on the transport advantage and optimal port scale of a Bay Area. *Ocean & Coastal Management*, vol. 219, pp. 73–97.

5. Moskvichenko I., Stadnik V. (2018). Rolj vnutrishnjogho vodnogho transportu v nacionaljnomu ghospodarstvi Ukrajinjy [The role of inland water transport in the national economy of Ukraine]. *Black Sea Economic Studies*, vol. 27, pp. 78–84.

6. Zheyong Bian, Yun Bai, W. Scott Douglas, Ali Maher, Xiang Liu. (2022). Multi-year planning for optimal navigation channel dredging and dredged material management. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 159, pp. 159–167.

7. Zhi-Chun Li, Mei-Ru Wang, Xiaowen Fu. (2021). Strategic planning of inland river ports under different market structures: Coordinated vs. independent operating regime. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 156, pp. 263–287.