

УДК 656.612.005.51:656.073.2

DOI 10.47049/2226-1893-2025-2-174-187

## ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНУВАННЯ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ СУДЕН

О.Р. Магамадов

к.т.н., професор кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт»

Одеський національний морський університет, Україна

**Анотація.** Протягом останнього двадцятиліття у проведенні досліджень щодо підвищення ефективності функціонування портів намітилась тенденція, яка орієнтована на створення так званого «розумного порту» (smart port) на основі ідей новітніх наукових напрямів, таких як agile-transformation, scrum-management, digital control з метою розвитку методологічного арсеналу внутрішньопортового оперативного управління. У відповідності із цією орієнтацією в статті досліджуються ключові положення календарного планування обробки суден, що досі залишаються маловивченими. Дослідження спрямовано на обґрунтування актуальних для теорії й практики варіантів постановки завдання календарного планування та створення адекватних до неї економіко-математичних моделей. Проаналізовано характерні для практики виробничі ситуації й визначено для них умови щодо організації обробки суден. Показано, що для дослідження окресленого завдання доцільно керуватись індуктивним методом пізнання, тобто просуватись від окремих його постановок до загальної постановки. Доведено, що базову окрему постановку завдання належить визначати за умовами організації завантаження (розвантаження) суден з умовно однорідним вантажем при сталих значеннях параметрів перевантажувального процесу. Разом з цим розглянуто існуючі підходи до моделювання запропонованого випадку постановки завдання й показано умови отримання з їх допомогою планів обробки суден у календарній формі. Встановлено, що єдиним коректним до створення календарного плану обробки судна є підхід, яким передбачається одночасне моделювання складових цього процесу, а саме: перевалювання вантажу, завантаження (розвантаження) люків судна й використання перевантажувальних ресурсів. Обґрунтовано зміст базової окремої та загальної постановок дослідженого завдання в календарній формі й розроблено адекватні обом постановкам завдання економіко-математичні моделі, що забезпечують подання процесу обробки судна в динаміці з «розкладом» його у часі. Показано, що на додаток до вказаних моделей доцільно в подальшому розробити механізм усунення порушень планового режиму обробки суден у відповідності з концепцією системної оптимізації внутрішньопортового оперативного управління.

**Ключові слова:** обробка судна, управління, постановка завдання, календарне планування, моделювання.

UDC 656.612.005.51:656.073.2

DOI 10.47049/2226-1893-2025-2-174-187

## THEORETICAL AND METHODOLOGICAL BASIS FOR SCHEDULING OF SHIP PROCESSING

**O.R. Mahamadov**

PhD, Professor at the Department of «Port operation and cargo handling technology»

*Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine*

**Abstract.** *Over the past two decades, research on improving the efficiency of ports and port operators has shown a trend towards creating a so-called «smart port» based on the ideas of the latest scientific directions, such as agile-transformation, scrum-management, digital control and adequate development of the methodological arsenal of intra-port operational management. In this paper, in accordance with the indicated orientation, the main provisions of the ship processing calendar planning are investigated, which still remain extremely poorly studied. This study is aimed at substantiating the relevant for theory and practice options for setting the task of ship processing calendar planning, which is considered separately, and creating adequate economic and mathematical models for it. Typical production situations for practice were analyzed and conditions for the organization of ship handling were determined for them. It was shown that for the study of the outlined task it is advisable to be guided by the inductive method of cognition, that is, to move from its individual statements to the general statement. It is proven that the basic separate formulation of the problem should be determined by the conditions of organizing the loading (unloading) of vessels with a homogeneous cargo at constant values of the parameters (indicators) of this process, which is typical for specialized berths. It has been established that the only correct approach to creating a ship handling schedule is an approach that involves simultaneous modeling of the components of this process, namely cargo handling, loading (unloading) of ship hatches, and the use of transshipment resources. The content of the basic separate and general statements of the task of planning the ship processing process in a calendar form is presented, and economic and mathematical models adequate to both statements of the task are developed, which provide a representation of the ship processing process in dynamics with its «schedule» in time. It is shown that in addition to the above models, it is advisable to further develop a compensation mechanism for eliminating violations of the planned regime of ship handling in accordance with the concept of system optimization of intra-port operational management.*

**Keywords:** *ship handling, management, task setting, calendar planning, modeling.*

**Вступ.** На сучасному етапі розвитку методології управління підприємствами й організаціями всіх галузей дослідники все частіше звертаються до концепції гнучкого перетворення (agile-transformation) і гнучкого управління (flexible management, scrum – на професійному сленгу) [1; 2]. Представляється доцільним

використання ідей цього підходу у дослідженнях щодо вирішення проблем удосконалення теорії і методів управління виробничою діяльністю портів у єдності з концепцією створення так званого «розумного порту» (smart port) [3], яка є безумовно перспективною [4; 5]. Здається, що саме цю орієнтацію належить взяти до уваги при пошуку шляхів до розв'язання згаданих проблем у застосуванні до внутрішньопортового оперативного управління, насамперед, календарного планування процесу обробки суден (далі – ПОС) в оптимальній постановці.

Підкреслимо, що позначений підхід обумовлюється як безперечною актуальністю окресленого напрямку досліджень, так і перспективами створення менеджменту smart port.

Крім того, доречно відзначити, що згадані дослідження необхідно проводити виходячи з постулату давньогрецького мислителя Протагора про те, що «теорія без практики... й практика без теорії є ніщо» [6]. Саме цими обставинами визначаються задум, сенс, зміст і логіка викладу основних положень статті у відповідності з принципом «без ретроспективи немає перспективи», що висунув видатний вчений у транспортній галузі, виходець з Одеси, В.С. Тімонов [7].

**Постановка проблеми.** Беручи до уваги, що управління судновими роботами здійснюється на основі календарних планів обробки окремих суден (далі – КПОС), постановку адекватної цій процедурі проблеми належить орієнтувати на дослідження ПОС у динаміці. За такою умовою стає можливим фіксувати розвиток цього процесу у часі, конкретні терміни й способи виконання його складових, а також встановлювати режим використання перевантажувальних ресурсів порту та отримувати інформацію щодо можливих наслідків обробки судна. Очевидно, що дотримання саме цих вимог визначатиме постановку обміркованої проблеми й адекватного їй завдання складання КПОС.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відзначимо відразу, що перелік праць, які присвячені питанням календарного планування обробки судна, яке розглядається окремо, є дуже коротким, а згадані в ньому праці містять результати розгляду цього завдання лише в окремій постановці, яка відповідає випадку, коли передбачається перевалювання однорідного вантажу й сталість параметрів ПОС.

Перші досить вагомні результати досліджень у зазначеному напрямку отримали науковці з Одеського інституту інженерів морського флоту (нині Одеський національний морський університет) А.І. Сакович і М.С. Татаренко., які в середині ХХ століття висунули ідею складання відповідно стрічкових діаграм і погодинних графіків завантаження (розвантаження) судна та продемонстрували процедуру їх реалізації на умовних числових прикладах [7].

Ця ідея набула розвитку в дослідженнях автора даної статті в тому ж інституті наприкінці 1960-х років, що дозволило створити графо-аналітичний метод і перші коректні економіко-математичні моделі (далі – моделі) календарного планування ПОС, удосконалені модифікації яких опубліковано в [8], про що докладно буде сказано в основному матеріалі статті, де наведено також аналіз останніх публікацій з обговорюваної теми.

Зі згаданих фактів стає очевидним, що дослідження завдання календарного планування ПОС навіть в окремій постановці залишається незавершеним, а в

загальній постановці воно взагалі ґрунтовно не розглядалось. Звідси з об'єктивністю випливає, що подальшу дослідницьку роботу щодо створення методології календарного планування ПОС логічно починати з узагальнення та розвитку досягнутих в цьому напрямку уявлень.

**Формулювання цілей статті.** Виходячи з поставленої проблеми, її мету належить зв'язати з виконанням поглибленого дослідження теоретичного й методичного аспектів календарного планування ПОС з орієнтацією на обґрунтування відповідного цієї проблемі завдання й створення моделей, адекватних її загальній й окремим випадкам. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити спільно комплекс таких завдань дослідження:

- визначити умови реалізації ПОС, що визначають зміст і сенс завдання щодо календарного планування обробки судна (далі – досліджуваного завдання) в загальній та окремих постановках;
- обґрунтувати базовий варіант окремої постановки дослідженого завдання й логіку формування її модифікацій;
- дослідити еволюцію підходу до розв'язання базового варіанту окремої постановки завдання й виявити перспективні напрямки його подальшого розвитку;
- показати, що досліджуване завдання належить розглядати в оптимальній постановці за критерієм ефективності мінімуму витрат порту, що відповідає ринковій філософії ведення бізнесу;
- довести, що формалізацію досліджуваного завдання потрібно виконувати за схемою «від реальних умов завдання до його моделі», а не у зворотному напрямку;
- розробити моделі, що адекватні загальній та базовому варіанту окремої постановки досліджуваного завдання й забезпечують пряме отримання КПОС;
- обговорити умови ефективного використання розроблених моделей в практиці оперативного управління функціонуванням портів.

**Основний матеріал дослідження.** Виходячи зі зазначеної мети, звернемося до обговорення питань щодо обґрунтування й аналізу варіантів постановки завдання планування обробки судна, доцільність виділення яких обумовлюється як теоретичними, так і практичними міркуваннями. При цьому будемо спиратися на індуктивний метод пізнання, тобто просуватися від окремих випадків постановки досліджуваного завдання до його загальної постановки.

Почнемо з розгляду найбільш характерного для практики окремого випадку постановки завдання, що відповідає умовам завантаження (розвантаження) суден на спеціалізованих причалах, коли:

- до перевалювання пред'являються однорідні у технологічному відношенні вантажі, зокрема, контейнери, укрупнені вантажні одиниці, пакетовані генеральні, насипні та навалочні вантажі;
- залишаються незмінними протягом періоду обробки судна всі основні параметри ПОС, такі як кількість одночасно завантажених (розвантажених) люків судна й межа концентрації на них технологічних ліній (далі – ТЛ), кількість використовуваних ТЛ і їх продуктивність при будь-яких способах єднання ліній на кожному люку.

Підкреслимо, що саме цей варіант організації ПОС у наведеній постановці завдання розглядався дослідниками досі й, як раніше, зберігає актуальність для внутрішньопортового оперативного управління.

Переходячи до обговорення методичного аспекту реалізації викладеного варіанту постановки завдання планування ПОС, відзначимо, що це завдання може бути легко розв'язано з використанням згаданих вище методик складання стрічкових діаграм або погодинних графіків обробки судна. Разом з цим дослідники проблем управління портовим виробництвом на початку 1960-х років висунули інший підхід до вирішення цього питання, який ґрунтується на математичному моделюванні ПОС шляхом «вписання» умов завдання планування цього процесу в структуру стандартної моделі лінійного програмування. Одна з таких моделей, перша в черзі подібних до неї формальних схем, має вид:

$$x_{ikl} \geq 0, \quad i = 1(1)m; \quad k = 1(1)r_i; \quad l = 1(1)v; \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^{r_i} \sum_{l=1}^v P_{ikl} * x_{ikl} = Q_i, \quad i = 1(1)m; \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^{r_i} \sum_{l=1}^{v^*} P_{ikl} * x_{ikl} = G_i, \quad i = 1(1)m; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{r_i} \sum_{l=1}^v x_{ikl} \leq m * T; \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^{r_i} \sum_{l=1}^v x_{ikl} \leq T, \quad i = 1(1)m; \quad (5)$$

$$f(x) = T \rightarrow \min, \quad (6)$$

де  $i, k, l$  – шифри (номери) відповідно люку судна, кількості одночасно використовуваних на кожному люку ТЛ та технологічної схеми,

$v^*$  – підмножина технологічних схем прямого варіанту;

$r_i$  – межа концентрації ТЛ на  $i$ -му люку;

$P_{ikl}$  – продуктивність  $k$ -тої кількості ТЛ при їх одночасній роботі на  $i$ -му люку за  $l$ -тою технологічною схемою;

$Q_i$  та  $G_i$  – кількість вантажу, що необхідно завантажити в  $i$ -й люк

(вивантажити з нього), відповідно, всього й за прямим варіантом;

$T$  – планова тривалість ПОС;

$x_{ikl}$  – відрізки часу, протягом яких  $i$ -й люк оброблюється  $k$ -тою кількістю ТЛ за  $l$ -тою технологічною схемою (параметри управління моделі).

Умови аналізованої моделі визначені наступним чином: необхідно повністю завантажити (розвантажити) усі люки судна (2), включаючи частку вантажу, що перевалюється за прямим варіантом (3), при використанні робочого часу ТЛ в обсязі його резерву (4) і тривалості обробки кожного люка судна в межах планового періоду ПОС (5) та забезпечити мінімальний час завантаження (розвантаження) судна (6). Умовою (1) передбачається невід’ємність змінних моделі.

Розглянута модель виявилася, на жаль, лише прикладом наукової невдачі внаслідок суперечливості її обмежень і некоректності виразу цільової функції. Крім того, і це є принципово важливим, ця модель і подібні до неї схеми свідомо не можуть забезпечити безпосередньо отримання КПОС, тому що в ній ТЛ фігурують у знеособленому виді.

Протилежний підхід до моделювання ПОС, тобто «від умов і особливостей процесу до його моделі», застосував наприкінці 1960-х років автор даної статті, довівши, що це питання слід вирішувати, ґрунтуючись на двох конструктивних принципах, першим з яких передбачається трактовка ПОС у якості об’єднання трьох його складових – перевалювання вантажів, завантаження (розвантаження) сукупності люків та роботи групи ТЛ, що виділяється для обробки судна, а другий принцип відповідає ідеї одночасного моделювання перерахованих процесів, що відповідає концепції системної оптимізації ПОС. За такою умовою для завдання календарного планування ПОС можуть будуватися моделі, структура яких подібна наступній лінійній формі:

$$x_{\alpha} \geq 0, \quad \alpha = 1(1)\omega; \quad (7)$$

$$\sum_{\alpha=1}^{\omega} D_{i\alpha} * x_{i\alpha} = Q_i, \quad i = 1(1)m; \quad (8)$$

$$R = \sum_{\alpha=1}^{\omega} C_{\alpha} * x_{\alpha} \rightarrow \min, \quad (9)$$

де  $i$  – шифр (номер) люку судна;

$\alpha$  – шифр (номер) варіанту розміщення ТЛ по люках судна;

$Q_i$  – кількість вантажу в  $i$ -му люку;

$D_{i\alpha}$  – інтенсивність (сумарна продуктивність) обробки  $i$ -го люка по  $\alpha$ -му варіанту розміщення ТЛ на судні;

$R$  – витрати порту на обробку судна.

Наведена модель «читається» наступним чином: необхідно забезпечити планове завантаження (розвантаження) люків судна (8) з мінімальними витратами (9) та дотримання обмеження з невід’ємності змінних моделі (7).

Звернемо увагу на ту обставину, що модель (7)-(9) не тільки відрізняється граничною простотою й коректністю, а має унікальну особливість – вона дозволяє представляти процес завантаження (розвантаження) судна в динаміці з фіксацією моментів часу, коли здійснюється перехід від одного до іншого варіанту розмі-

щення ТЛ на люках судна. Ще одна принципово важлива особливість цієї моделі полягає у тому, що вона застосовна у випадку обробки судна, коли при використанні одночасно двох і більше ТЛ на одному люку їх продуктивність знижується на певну величину. За такою умовою інтенсивність завантаження (розвантаження) люків судна за варіантами розміщення ТЛ на судні розраховується за формулою

$$D_{i\alpha} = \left\{ \begin{array}{l} 0, \text{ якщо } n_{i\alpha} = 0; \\ P_i, \text{ якщо } n_{i\alpha} = 1; \\ P_i * n_{i\alpha} * k_{i\alpha}, \text{ якщо } 1 < n_{i\alpha} \leq r_i; \end{array} \right\}, \quad (10)$$

де  $F_i$  – продуктивність ТЛ при роботі на  $i$ -му люку;

$n_{i\alpha}$  – кількість ТЛ, що одночасно працюють на  $i$ -му люку за  $\alpha$ -м варіантом розміщення ТЛ на судні;

$k_{i\alpha}$  – коефіцієнт, що враховує зниження продуктивності ТЛ при спільній роботі двох і більше ліній на  $i$ -му люку за  $\alpha$ -м варіантом їх розміщення на судні.

У результаті реалізації наведеної моделі знаходиться оптимальний план,  $\{X_\alpha^0\}$ , компонентами якого визначаються відрізки часу, протягом яких розміщення ТЛ на судні залишається постійним. Цими часовими відрізками фіксуються етапи ПОС у виді свого роду «смуг», склеювання яких у певній технологічній послідовності дозволяє отримати КПОС без додаткових обчислень та графічних побудов.

Завершуючи характеристику моделі (7)-(9), відзначимо, що в ній відсутні обмеження на кількість і час використання ТЛ для обробки судна. Це пояснюється тим, що перший вказаний параметр визначається попередньо, виходячи з умови дотримання сталійного часу й фіксується як константа за варіантами розміщення ТЛ на судні, а другому параметру відповідає сума відрізків часу, яка дорівнюється тривалості ПОС. Завдяки цьому згадані обмеження дотримуються автоматично.

Обговорювана модель має ще одну особливість, яка полягає в тому, що в ній відсутнє також обмеження на тривалість ПОС у відповідності зі сталійним часом судна внаслідок того, що воно задовольняється автоматично, як вказано вище.

Видається очевидним, що процедуру виділення окремих випадків завдання планування обробки судна можна продовжити шляхом зняття умови сталості параметрів ПОС по одному, двом і так далі. Однак, займатися цією справою немає раціонального сенсу, тому що встановлені таким чином окремі випадки завдання відповідатимуть або моделі (7)-(9), або його узагальненій модифікації, що обговорюється нижче.

Вказана модифікація моделі планування ПОС дозволяє врахувати в уявній формі обмеження на тривалість ПОС і записується таким чином:

$$x_{\alpha} \geq 0, \alpha = \overline{1, m}; \quad (11)$$

$$\sum_{\alpha=1}^m D_{i\alpha} * x_{i\alpha} = Q_i, i = \overline{1, m}; \quad (12)$$

$$\sum_{\alpha=1}^m x_{\alpha} \leq T^0; \quad (13)$$

$$R = \sum_{\alpha=1}^m C_{\alpha} * x_{\alpha} \rightarrow \min, \quad (14)$$

де  $T^0$  – сталійний час судна.

Як бачимо, наведена модель, як і схема (7)-(9), передбачає необхідність дотримання невід’ємності змінних (11) та планового завантаження (розвантаження) люків судна (12) при забезпеченні сталійного часу (13) і мінімальних витрат на його обробку (14), а також можливість безпосереднього отримання календарного плану ПОС за інформацією, що надається оптимальним планом  $\{X_{\alpha}^0\}$ .

Звернемо увагу на ту обставину, що в моделі (11)-(14) відсутні обмеження на кількість ТЛ, що використовується для здійснення ПОС. Це пояснюється тим, що для коректної реалізації вказаної моделі втім як і схеми (7)-(9), належить скласти множину допустимих варіантів розміщення ТЛ по люках для однієї, двох і так далі до межі концентрації ліній на судні. Завдяки цьому в процесі вирішення задачі фіксується кількість ТЛ, при якій обробку судна може бути виконано у термін сталійного часу. У результаті відпадає необхідність конструювання відповідного обмеження у складі розглянутої моделі.

Вважаючи, що модель (11)-(14) повністю відповідає суті окремої постановки досліджуваного завдання, звернемося до питань щодо її розвитку з метою переходу до загальної постановки завдання. Першу спробу в цьому напрямку зроблено в [9], де наведено наступну модель (у позначеннях і термінології з указанного джерела)

$$x_{ij} \geq 0, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}; \quad (15)$$

$$\sum_j P_{ij} * x_{ij} = Q_j, j = \overline{1, n}; \quad (16)$$

$$\sum_j x_{ij} \leq T_{cyd}, i = \overline{1, m}; \quad (17)$$

$$\sum_i \sum_j v_{ij} * x_{ij} \rightarrow \max, \quad (18)$$

де  $i$  та  $j$  – шифри (номери) відповідно ТЛ і трюму судна;

$Q_j$  – кількість вантажу  $j$ -го трюму;

$P_{ij}$  – усереднена продуктивність  $i$ -ої ТЛ на  $j$ -му трюмі;

$T_{суд}$  – запланований час обробки судна;

$V_j$  – значення пріоритетності роботи  $i$ -ої ТЛ на  $j$ -му трюмі.

З аналізу моделі (15)-(18) стає очевидним, що її суттєвою відмінністю від моделі (11)-(14) є заміна в цільовій функції показника питомих витрат на показник під назвою «пріоритетність роботи  $i$ -ої ТЛ на  $j$ -му трюмі», що встановлюється експертним шляхом. При осмисленні суті цього прийому природно виникає питання про його реальний сенс у змістовному розумінні. Справа полягає в тому, що апріорний вибір «доцільних» варіантів закріплення ТЛ за люками судна не може, за визначенням, гарантувати оптимальності реалізації розглянутої моделі внаслідок можливого прояву «людського фактору» портових спеціалістів.

З результатів викладеного дослідження питань планування й моделювання ПОС в окремій постановці з очевидністю впливає, що узагальнення постановки цього завдання і розробку адекватної до неї моделі потрібно виконувати, починаючи зі зняття умови щодо сталості параметрів ПОС. Така орієнтація відповідає виробничій ситуації, коли до перевалювання пред'являється неоднорідний вантаж, а всі параметри ПОС, що фігурують при розробці моделей (7)-(9) і (11)-(14), періодично змінюються (наприклад, в практиці – за виробничими змінами, у «світлий» і «темний» час доби, з оперативних міркувань керівників експлуатаційних підрозділів порту).

Конкретизуємо перераховані умови організації обробки судна, акцентуючи увагу на визначенні порядку зміни значень адекватних їм параметрів ПОС. Перша умова – різноманітність вантажу або композитне завантаження судна – характеризується різноманітністю, що фіксується за шістьма (!) ознаками, а саме – за кількістю вантажу, шифрами його найменування в судовій партії, люку судна, секції портового складу чи суміжного транспортного засобу та технологічної схеми перевантаження. У той же час інші вказані умови визначаються за значеннями відповідних їм параметрів ПОС, які варіюються в деяких діапазонах, а саме – від мінімальної до максимальної величини. При цьому значення продуктивності ТЛ і питомих витрат на обробку судна приймаються у прив'язці до технологічних схем перевантаження.

Представляється зрозумілим, що намір врахувати безпосередньо таку велику кількість значущих ознак факторів на етапі формалізації розглянутої постановки завдання планування ПОС є очевидно нераціональним, тому що веде як мінімум, до громіздких модельних конструкцій та непростих обчислювальних проблем. Виходом з цієї ситуації є коректне скорочення чисельності згаданих

факторів завдяки переходу від різнорідного до умовно однорідного завантаження кожного люка судна, що дозволяє замінити п'ять з шести ознак вантажу й оперувати показником кількості умовного вантажу у люках судна. Разом з цим виключається необхідність урахування всієї множини технологічних схем перевалювання вантажів і з'являється можливість застосування лише одного показника – продуктивності ТЛ з диференціацією по люках судна.

Введемо такі позначення:

$R$  – витрати на обробку судна;

$i, j, l, \alpha$  – індекси (шифри) відповідно, люку судна, складу, технологічної схеми, варіанту розміщення ТЛ на судні;

$S_{ijl\alpha}$  – питома собівартість перевантаження вантажу з  $i$ -го люку судна в  $j$ -й склад або у зворотному напрямку за  $l$ -ю технологічною схемою при  $\alpha$ -му варіанту розміщення ТЛ на судні;

$Q_i$  – кількість вантажу  $i$ -го люку судна;

$Q_j$  – максимальна кількість вантажу, яку можна буде розмістити в  $j$ -му складі (вивантажити з нього);

$Q_{ij}$  – максимальна кількість вантажу, яка може бути перевантажена з  $i$ -го люку в  $j$ -й склад;

$T^0$  – нормативна (договірна) тривалість обробки судна.

Звернемо увагу на ту обставину, що параметр  $Q_{ij}$  належить фіксувати за формулою

$$Q_{ij} = \min \{Q_i, Q_j\}, \quad i = 1(1)m; \quad j = 1(1)z. \quad (19)$$

У прийнятих позначеннях шукана модель планування ПОС в узагальненій постановці має такий вид:

$$R = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^z \sum_{l=1}^v \sum_{\alpha=1}^{\omega} S_{ijl\alpha} * x_{ijl\alpha} \rightarrow \min; \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^z \sum_{\alpha=1}^{\omega} x_{ijl\alpha} \leq Q_j, \quad j = 1(1)z; \quad (21)$$

$$\sum_{l=1}^z \sum_{\alpha=1}^{\omega} x_{ijl\alpha} \leq Q_{ij}, \quad i = 1(1)m, \quad j = 1(1)z; \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^z \sum_{l=1}^v \sum_{\alpha=1}^{\omega} x_{ijl\alpha} \leq T^0; \quad (23)$$

$$x_{ijl\alpha} \geq 0, \quad i = 1(1)m, \quad j = 1(1)z, \quad l = 1(1)v, \quad \alpha = 1(1)\omega, \quad (24)$$

де  $x_{ijl\alpha}$  – відрізки часу, протягом яких вантаж перевантажується з  $i$ -го люку судна в  $j$ -й склад за за  $l$ -ю технологічною схемою при  $\alpha$ -му розміщення ТЛ на судні.

Створена модель, як і схеми (7)-(9) і (11)-(14), дозволяє отримати КПОС, який забезпечує мінімальні витрати порту (20) з урахуванням обмежень по кількості вантажів для розміщення в складах (21) і в люках судна (22) при дотриманні потрібного терміну обробки судна (23) і невід'ємності змінних моделі (24).

Здається доцільним звернути увагу на той факт, що при граничних значеннях кількості люків судна, складів, технологічних схем перевантаження вантажів та варіантів розміщення ТЛ на судні матриця задачі (20)-(24) має велику розмірність (десятки рядків  $\times$  сотні стовпців), з якої проте можна боротися шляхом фільтрації допустимих варіантів розміщення ТЛ на судні та автоматизації підготовки вихідних даних для складання КПОС.

Отже, моделі (11)-(14) і (20)-(24) сприяють значною мірою задовільному у теоретичному відношенні вирішенню проблеми календарного планування ПОС. Вони дозволяють розглядати розвиток (динаміку) цього процесу у часі, визначають раціональну послідовність варіантів розміщення ТЛ на судні, завдяки чому гарантується оптимальність КПОС, і відрізняються простотою й зручністю у використанні в практичних умовах.

Завершуючи дослідження розглянутих аспектів календарного планування ПОС в оптимальній постановці, відзначимо, що просування в цій області логічно зв'язувати з такими напрямками, як розвиток запропонованих моделей, удосконалення алгоритмічного та інформаційного забезпечення реалізації моделей в умовах функціонування сучасних систем автоматизованого управління портами, подібних до «Цифрової диспетчерської», яка створена стивідорною компанією «Новотех-Термінал» в Одеському порту [10].

**Висновки.** Підбиваючи підсумки охарактеризованого в цій статті дослідження теоретичних та практичних положень календарного планування обробки суден, відзначимо, що його конкретні результати полягають у наступному:

- встановлено, що ключову роль у визначенні умов постановки дослідженого завдання грають такі фактори, як рід перевалювального вантажу й основні параметри ПОС з урахуванням їх динаміки у часі;
- показано, що процедуру виділення варіантів окремої постановки дослідженого завдання доцільно виконувати, починаючи з базового варіанту його окремої постановки, коли передбачається перевалювання однорідного вантажу на спеціалізованих причалах при сталих значеннях параметрів ПОС;

- проаналізовано існуючі методи та моделі розв'язання дослідженого завдання в базовій окремій постановці та показано, що не усі з них орієнтовано на безпосереднє отримання календарного плану ПОС;
- доведено, що досліджене завдання необхідно розглядати в оптимальній постановці за критерієм мінімуму витрат порту на обробку судна;
- оведено, що моделювання дослідженого завдання потрібно здійснювати за схемою «від його змістовних умов до моделі» шляхом одночасного розгляду складових ПОС, а саме – перевалювання вантажу, завантаження (розвантаження) люків судна та роботи ТЛ, що приймають участь у реалізації цього процесу;
- створені моделі планування ПОС, які відображають у динаміці хід завантаження (розвантаження) судна в якості мультикрокового процесу з визначенням тривалості обробки судна, його кожного люку й кожної ТЛ, а також з фіксацією у часі моментів початку-закінчення кроків процесу, обробки люків судна та варіантів розміщення на ньому ТЛ;
- визначено, що для підвищення ефективності використання запропонованих у статті моделей календарного планування ПОС належить розробити механізм усунення порушень плану обробки судна, а також удосконалити алгоритмічне та інформаційне забезпечення реалізації цих моделей у виробничих умовах.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Conforto E, Salum F, Amaral D, et al. (2014) *Can Agile Project Management Be Adopted by Industries Other than Software Development?* *Project Management Journal*. Vol. 45 (June/July), № 3. P. 21-34.
2. *Agile project management with Scrum*. URL: <https://www.pmi.org/learning/library/agile-project-management-scrum-6269>(дата звернення 30.01.2025).
3. Douaioui K., Fri M., Mabrouki C. (2018). *Smart port: Design and perspectives* In: *2018 4th International Conference on Logistics Operations Management (GOL)*. IEEE/ P. 1-6.
4. Jun Wang Ki & Lee Min-Kyu & Choi Jae Young (2018). *Impact of the smart port industry on the Korean national economy using input-output analysis*. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Vol. 118(C). P. 480-493. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.10.004>.
5. Kyryllova O., Kyryllova V., Mahamadov O., & Romakh V. (2024). *Smart port: the latest technologies and international experience in their implementation*. *Transport Development*. № 2(21). P. 62-74.
6. Протагор. Знамениті цитати. URL: <https://uk.wikiquote.org/wiki/Протагор> (дата звернення 30.01.2025).

7. Кириллова О.В., Магамадов О.Р., Шурін Б.В. Зародження и розвиток внутрішньопортового оперативного управління. Вісник Одеського національного морського університету. 2021. Вип. 1(64). С. 81-98.
8. Магамадов О.Р. Система оптимального внутрішньопортового оперативного планування (концепція ОІМФ-ОНМУ). Вісник Одеського національного морського університету. 2005. Вип. 17. С. 236-248.
9. Крук Ю.Ю. Методи адаптивного управління діяльністю оператора портового терміналу: дис...канд. техн. наук: 05.22.01/Одеський національний морський університет. Одеса, 2017. 179 с.
10. Овсяников Ю. Цифрова диспетчерська – нове слово в управлінні вантажними роботами та технікою. Судноплавство. 2019. № 10 (177). С. 42-45.

## REFERENCES

1. Conforto E, Salum F, Amaral D, et al. (2014) Can Agile Project Management Be Adopted by Industries Other than Software Development? *Project Management Journal*. Vol. 45 (June/July), № 3. P. 21-34.
2. Agile project management with Scrum. URL: <https://www.pmi.org/learning/library/agile-project-management-scrum-6269>.
3. Douaioui K., Fri M., Mabrouki C. (2018). Smart port: Design and perspectives In: 2018 4th International Conference on Logistics Operations Management (GOL). IEEE. P. 1-6.
4. Jun, Wang Ki & Lee, Min-Kyu & Choi, Jae Young (2018). Impact of the smart port industry on the Korean national economy using input-output analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Vol. 118(C). P. 480-493. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.10.004>.
5. Kyryllova O., Kyryllova, V., Mahamadov, O., & Romakh, V. (2024). Smart port: the latest technologies and international experience in their implementation. *Transport Development*. № 2(21). P. 62-74.
6. Protagoras. Znameniti tsytaty [Famous quotes]. URL: <https://uk.wikiquote.org/wiki/Протагор> [in Ukrainian]/
7. Kyryllova O.V. & Mahamadov O.R. & Shurin, B.V.(2021) Zarodzhennya y rozvytok vnutrishn'oportovoho operatyvnoho upravlinnya [Origin and development of in-port operational management]. *Visnyk Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu*, 1 (64) [in Ukrainian].
8. Magamadov A.R. (2005) Sistema optimal'nogo vnutriportovogo operativnogo planirovaniya (konczepczyia OIIMF-ONMU) [System of optimal intra-port operational planning (concept of OISFE-ONMU)]. *Vi`snik Odes`kogo naczional'nogo mors`kogo uni`versitetu*. Vip.17. [in Ukrainian].

9. Kruk Y.Y. (2017). *Metody adaptivnoho upravlinnya diyal'nisty operatora portovoho terminalu [Methods of adaptive management of the port terminal operator]. Candidate's thesis. Odesa [in Ukrainian].*
10. Ovsyannikov Y. (2019). *Tsifrovaya dispatcherskaya – novoye slovo v upravlenii gruzovymi robotami i tekhnikoy [Digital dispatching – a new word in the management of cargo operations and equipment]. Sudokhodstvo, 10 [in Ukrainian].*

*Стаття надійшла до редакції 03.02.2025*

**Посилання на статтю: Магамадов О.Р.** Теоретико-методичні основи календарного планування процесу обробки суден // *Вісник Одеського національного морського університету*: Зб. наук. праць, 2025. № 2 (76). С. 174-187. DOI 10.47049/2226-1893-2025-2-174-187.

*Article received 03.0.2025*

**Reference a journal artic: Mahamadov O.R.** Theoretical and methodological basis for scheduling of ship processing // *Herald of the Odesa National Maritime University: Coll. scient. works*, 2025. № 2 (76). P. 174-187. DOI 10.47049/2226-1893-2025-2-174-187.