

УДК 656.073(045)

DOI: 10.31653/2306-5761.36.2024.131-146

**STOCHASTIC MODEL OF PORT OPERATION AT UNEVEN CARGOES
PASSAGE AND VESSELS DELAY RISK ASSESSMENT****СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ РОБОТИ ПОРТА ПРИ НЕРАВНОМІРНОМУ
ПРОХОДЖЕННІ ВАНТАЖІВ І ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ ПРОСТОЮ
СУДЕН**

I. Petrov¹, *D.Sc, Professor, Deep Sea Captain*, **N. Rudnichenko²**, *C.Sc, Assistant Professor*,
Yu. Kazak³, *PhD, senior lecturer*

І.М. Петров І.М.¹, *д.т.н., професор, к.д.п.*, **М.Д. Рудніченко²**, *к.т.н, доцент*, **Ю. В. Казак³**,
к.т.н., ст. викладач

^{1,3} National University "Odessa Maritime Academy", Ukraine

^{1,3} Національний університет «Одеська морська академія», Україна

² Odessa Polytechnic National University, Ukraine

² Національний університет «Одеська політехніка», Україна

ABSTRACT

The article considers the probabilistic model of the port terminal operation, which takes into account the irregularity of cargo delivery by land transport and its removal by sea vessels. The tasks of the article are solved using a combination of methods of mass service theory and inventory theory. A conclusion was made about the shortcomings of existing methods for the needs of modern logistics. The analysis of the operation of the terminal was carried out under the assumption of uneven delivery of cargo to the terminal warehouse by ground modes of transport and removal by ships, and the unloading front has unlimited capacity. The operation of the terminal is studied in the steady mode. Using a number of mathematical assumptions, the flow of loaded vehicles is described by a model of a complex Poisson process with integral trajectories and zero drift. The work derives a system of integro-differential equations and boundary conditions. The system is solved using the Laplace-Stieltjes method and the application of the function convolution theorem. This allows to ultimately arrive at a ratio for the operation of the terminal in the steady mode. Such calculations made it possible to obtain stationary mathematical expectations of the amount of cargo, the number of vessels also for an arbitrary moment of time, the stationary probability of a vessel being idle while waiting for cargo to be picked up, and the carrying capacity of the cargo front of the terminal. An example of a system solution for a particular case, when there is one vessel under processing at one berth, is given. The risks of the sea Agent, which lead to the downtime of the ships due to the incomplete completion of the ship's consignment of cargo, are considered. Such risks will pose a significant problem for the canvasser and the shipowner. With the help of the insurance expediency criterion derived in the work, recommendations are given for Shipowners and their Agents to eliminate the risks of additional downtime of vessels at the berth due to delays in the delivery of cargoes to the terminal warehouse, which will lead to the emergence of new risks of additional downtime of vessels. It is shown that the obtained results are important for the needs of practice, as they allow forming a strategy for replenishing cargo stocks at port warehouses in conditions of uneven arrival of vehicles at the time of their need for loading ships. From a theoretical point of view, the obtained results demonstrate the possibility of using the apparatus of Markov processes to solve various tasks of optimal management of stocks under conditions of random fluctuations in their demand.

Keywords: agent, canvassing, terminal, cargo, warehouse, ship, inventory theory, stochastic model, Markov random process, Laplace-Stieltjes transformation, function convolution theorem, insurance.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Основною виробничою ланкою транспортно-логістичних ланцюгів, у яких відбувається взаємодія транспортних потоків суміжних видів транспорту, є портові вантажні термінали. Від ефективності цієї взаємодії залежать терміни та вартість доставки вантажів, а також їх збереження. Завезення та зберігання необхідної кількості вантажу до приходу судна до порту на практиці є складною економіко-організаційною проблемою. Так, лишня кількість веде до «залежалості вантажів», їхнього омертвіння. При нестачі їх до обсягу судової партії судно нестиме непродуктивний простий в очікуванні його завезення до порту. Ключову роль вирішення проблеми забезпечення вантажем суден, що прибувають у порт для навантаження, грає механізм поведінки лінійного агента, що здійснює канвасінгові операції, пов'язані із залученням вантажів для відвантаження на морські судна. Для забезпечення завантаження суден, що прибувають у порт, і виконання обумовленого режиму відходів, мінімізації термінів доставки вантажів, забезпечення їх збереження, агенти приймають вантаж на свої склади до приходу судна [1].

Однак при цьому можуть виникати певні ризики, пов'язані з неможливістю з будь-яких причин організувати своєчасну доставку вантажу на момент прибуття суден на портовий термінал [2]. Тому на практиці виникає завдання прогнозування ризиків несвоєчасного прибуття вантажу на термінал або відсутності його на складі в необхідній кількості для своєчасного навантаження. Такий прогноз необхідний для науково обґрунтованого управління зазначеними ризиками. Для розв'язання цього завдання можна використати сучасні методи математичного моделювання роботи портових терміналів [3,4].

Зазвичай для формального опису функціонування вантажного терміналу використовуються поєднання методів теорії масового обслуговування (ТМО) та теорії запасів. Роль, наприклад, ТМО для проектних розрахунків полягає в тому, що вона дозволяє прогнозувати коливання довжин черг і часу перебування в черзі транспортних засобів (ТЗ) на терміналі, що очікують початку завантаження або розвантаження на перспективу. Об'єктивно існуючі нерівномірність і нерегулярність руху ТЗ створюють важкий режим експлуатації виробничих потужностей портів, викликають необхідність створення їх резервів. Теорія запасів дозволяє коректно оцінити рівень очікуваних запасів вантажу на складі терміналу та визначити його потрібну місткість, науково обґрунтувати значення експлуатаційних навантажень на конструктивні елементи причальних споруд та підвищити їхню надійність. Опис вантажного терміналу у вигляді тієї чи іншої обслуговуючої системи є доцільним також для отримання науково обґрунтованої оцінки очікуваних значень економічних результатів та витрат, пов'язаних з експлуатацією терміналу.

Нижче виконано побудову та аналіз стохастичної моделі роботи портового терміналу у припущенні нерівномірності завезення вантажу на склад ТЗ наземного виду транспорту (при необмеженій пропускній спроможності фронту вивантаження) та вивезення його суднами. Це є необхідною основою розробки науково обґрунтованого методу оцінки ризику простою суден внаслідок нерівномірності завезення вантажу до вантажного складу терміналу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

У перших оптимізаційних моделях, які були розроблені до початку 20-го століття Ф. Еджуортом і Ф. Харрісом [5,6], передбачалося, що завезення вантажів на склад здійснюється в задані проміжки часу, а їх взяття є рівномірним.

З середини минулого століття при проектуванні портових терміналів почали використовуватися методи імітаційного моделювання [7,8] та дослідження операцій [9,10]. Працями дослідників з'явилися нові моделі, що ґрунтуються на теорії управління запасами, які, проте, недостатньо відображали портову специфіку [11,12]. Згодом практика виявила слабку їхню придатність для вирішення завдань проектування транспортних систем.

Наприклад, для інтенсивності вхідного потоку ТЗ використовується закон Пуассона. Хоча було доведено, що це потоки мають лише певною часткою регулярності, а час обслуговування є випадковою величиною розподіленою за показовим законом чи законом Ерланга з параметрами, близькими пуассонівському, що спочатку закладало похибку в 5-8 % [12]. В роботах того часу питання оптимізації роботи портового складу лише торкалися на постановочному рівні. На жаль, вони не відрізняються глибиною опрацювання та чітких висновків щодо поставленої проблеми не містять. В роботах [13,14] управлінські рішення пропонувалися з урахуванням прогнозування попиту з допомогою евристичних, економіко-математичних методів, кількісної розрахункової методики, наприклад, методики експоненційного згладжування. Наприклад, у роботі [14] розглянуто систему з фіксованим розміром замовлення при зменшенні розміру запасу до критичного рівня – «точки замовлення». Для визначення оптимального розміру замовлення використано формулу Вілсона, яка враховує умову мінімуму середньорічних витрат на виконання замовлень та їх зберігання у запасі. Але така модель більш підходить для дорогих товарів, оскільки передбачає жорсткіший контроль над станом запасів, коли може бути забезпечена швидша реакція на загрозу вичерпання запасу. У другій половині 20-го століття були виконані перші дослідження, присвячені моделюванню взаємодії транспортних потоків у порту. В них вводилося припущення про необмежені пропускні спроможності вантажних фронтів [15,16].

Наприкінці 20-початку 21 століття в дослідженнях розробляються та використовуються стохастичні моделі роботи портових терміналів з урахуванням кінцевої пропускної спроможності вантажних фронтів [4,17,18], побудовані за допомогою поєднання методів теорії запасів та ТМО. Однак, у них досліджуються, як правило, щодо прості моделі взаємодії транспортних потоків, у яких одне із потоків є рівномірним, але з урахуванням їхньої нерегулярності для дослідження більший інтерес представляють дослідження саме цих адекватних, а й складніших випадків.

Деякі роки тому з'явилася робота [19], в якій розроблено модель координації потоку суден і залізничних вагонів, засновану на узагальненні класичної моделі теорії управління запасами Вагнера-Уайтіна. Але нерівномірність прибуття ТЗ запропонована модель не враховує. У статті [20] систематизовані та наводяться дослідження роботи мультимодального та інтермодального транспорту, проте лише в детермінованих умовах без урахування факторів невизначеності та її впливу на пропускну спроможність порту (терміналу). Це стосується і робіт [21, 22]. В них під час вирішення завдання оптимізації розстановки судів по причалам порту із застосуванням стохастичної динаміки, питання підтримки рівня запасу вантажів на портових складах не розглянуті. У [23] автори досліджували регулярність підходу суден у порт під навантаження, проте також у припущенні регулярності його завезення на термінал наземним транспортом, що є сильним спрощенням реальних процесів у порту. Особняком стоять роботи [24-26], присвячені оптимізації перевезень вантажів від виробника на склад у межах міста. Розроблені в них моделі детерміновані, вони враховують структуру виробництва, баланс матеріальних потоків в умовах обмеженої пропускної спроможності інфраструктури мегаполісу. Так, у роботі [24] представлена математична детермінована модель, яка дозволяє мінімізувати автомобільні перевезення у місті та кількості запасів, що зберігаються на складах, а також регулювати час виконання замовлення постачальниками. У статті [25] представлено модель продуктивності стійких ланцюгів постачання міських кластерів за умов невизначеності. [26] представлена модель багатоповерхової компоновки об'єктів на складах, що містить морфологічний аналіз обладнання адитивного виробництва. Проведений авторами аналіз літературних джерел виявив і ризико-орієнтовану проблематику в роботі суб'єктів господарювання на морському транспорті. та ремонту суден. З одиничних робіт у цій галузі можна відзначити роботу [29,30], де описаний метод оцінки та усунення ризиків пошкодження вантажів у порту, і [31], присвячену ризикам пошкодження причалу від навалу суден при їх швартуванні. У цих роботах розвиток отримали методи ТМО. Розроблені методичні підходи до управління різними ризиками, зокрема гіпотетичними для цієї роботи ризиками простою суден через нерівномірне завезення на портові склади вантажів, передбачає вибір методів їх

демпфування. Вміння грамотно керувати ризиками дає можливість і стивідорній, і агентській компанії стійко функціонувати у процесі здійснення спільної діяльності із завантаження судна.

Проведений аналіз літературних джерел показує, що в даний час за допомогою ТМО розроблено достатньо моделей обслуговуючих систем різних типів [19,32,33]. Але ця обставина породжує необхідність розробки більш вузькоспеціалізованих моделей, включаючи моделі роботи портових терміналів, що цікавлять нас, де специфіка проявляється в одночасному перебігу двох визначальних поведінку системи процесів, - прибуття суден під обробку, і завезення вантажів на портовий склад. Останнім часом для опису таких процесів отримав розвиток і застосування особливий вид випадкових марківських процесів – марківські процеси зі зносом (або «швидкостями»). Їх фазовий простір є прямим множенням дискретного (визначуваних дискретними змінними типу числа суден біля причалів і в очікуванні постановки до них) і безперервної множини (може описувати, наприклад, коливання запасу вантажу на складі в часі) [33–36]. Це дає нам можливість ставити і вирішувати цілу низку завдань щодо оптимального управління запасами в умовах невизначеності та ризику у різних логістичних системах [37]. Наприклад, коли вхідний потік є не вантажі на портовий склад, а змінно-запасні частини на консигнаційний склад морського агента або склад СРЗ, де постачаються або ремонтуються судна, як це змодельовано в [38,39].

Грунтуючись на сказаному вище, звернемо увагу на те, що на сьогоднішній день, аналітичними методами досить повно досліджено моделі, що описують випадок, коли один з потоків ТЗ є рівномірним, а другий задається моделлю пуассонівського потоку. Якщо ж взаємодіють два нерівномірні транспортні потоки, то через серйозні аналітичні труднощі в рамках марківських моделей вдалося вивчити лише найпростіший випадок взаємодії двох одиничних ТЗ. Виходом зі становища у цьому разі можуть стати ті чи інші спрощуючі припущення, наприклад, про нескінченність одного з вантажних фронтів, про необмежену ємність складу, та інші.

Таким чином, методичні положення та підходи для побудови стохастичної моделі роботи порту та оцінки ризику простою суден через нерівномірність завезення вантажів на склади порту, що ґрунтуються на залученні математичного апарату, на сьогоднішній день розроблені слабо або зовсім відсутні. Це визначає актуальність, мету та завдання запропонованої статті.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою роботи є побудова та аналіз стохастичної моделі роботи портового терміналу в умовах нерівномірності завезення на склад та вивезення вантажу наземним та морським видами транспорту. На цій основі розробити та обґрунтувати метод оцінки ризику простою суден, що прибули під навантаження.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розглянути портовий термінал та дати його формалізований опис із залученням наукового інструментарію теорії масового обслуговування та теорії запасів з урахуванням нерівномірності завезення вантажу на портовий термінал наземними видами транспорту та вивезення його морськими суднами;

- прийняти необхідні допущення для спрощення та можливості вирішення завдань; для інтерпретації роботи вантажного терміналу у термінах однорідного марківського процесу з нульовим знесенням, але з додатковими граничними умовами;

- вказати метод розв'язання побудованої системи інтегро-диференціальних рівнянь для знаходження спільного розподілу числа суден, що знаходяться на терміналі, та кількості вантажу, що знаходиться на складі;

- на основі отриманого рішення знайти формули для розрахунку показників роботи терміналу, таких, як така кількість вантажу, що знаходиться на складі терміналу, та кількість суден, що прибули в порт для завантаження, у довільний момент часу; ймовірність відсутності вантажу на складі та простою суден в очікуванні завезення вантажу; пропускну спроможність вантажного фронту терміналу;

- обґрунтувати доцільність страхування ризику простою суден в очікуванні додаткового підвезення вантажу на термінал, для чого розробити та обґрунтувати критерій доцільності страхування.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Опис загальної схеми моделювання роботи портового терміналу.

Подальша побудова та аналіз стохастичної моделі роботи портового терміналу будуть виконані в припущенні про нерівномірність завезення вантажу на склад транспортними засобами (ТЗ) наземного виду транспорту (при необмеженій пропускній спроможності фронту вивантаження) та вивезення його суднами. Це є необхідною основою розробки науково обґрунтованого методу оцінки ризику простою суден внаслідок нерівномірності завезення вантажу до складу терміналу.

Розглянемо портовий термінал, що складається з n взаємозамінних причалів та складу. Однорідний вантаж завозиться на термінал за допомогою наземного виду транспорту (автомашинами або залізничними потягами) і відразу потрапляє на склад. Вважаємо, що потік цих ТЗ описується моделлю процесу накопичення [3,17]. Це означає, що інтервали часу між сусідніми моментами прибуття ТЗ є взаємно незалежними випадковими величинами з однаковою функцією розподілу (ф.р.) $A(t)$, а їх вантажопідйомності – незалежні від них і також взаємно незалежні випадкові величини з однією функцією розподілу $G(x)$. Весь завезений на склад вантаж вивозиться за допомогою суден, що прибувають для завантаження відповідно до закону Пуассона з параметром a , а функція розподілу (ф.р.) чистої вантажопідйомності довільного судна є $H(x)$. Інтенсивність навантаження вантажу зі складу (якщо він не порожній) на будь-яке судно дорівнює W . Гранично допустима довжина черги суден в очікуванні вільного причалу дорівнює r .

Для спрощення побудови та аналізу математичної моделі припустимо, що:

- а) місткість складу досить велика, тобто нехтуватимемо ймовірністю додаткового простою ТЗ, викликаного повним заповненням складу;
- б) час вивантаження вантажу з ТЗ на склад дуже малий, (дорівнює нулю), іншими словами, вважаємо, що фронт вивантаження вантажу має необмежену пропускну спроможність.

Зазначимо, що зазначені припущення не виключають ситуацію, за якої одне або кілька суден можуть простоювати біля причалів додатковий час через відсутність вантажу на складі, очікуючи на підвезення вантажу на ТЗ.

Позначимо:

$\nu(t)$ – кількість суден, що знаходяться на терміналі (біля причалів та черги до них) у момент часу t ;

$\xi(t)$ – кількість вантажу, що знаходиться на складі в момент часу t .

Виведення системи інтегро-диференціальних рівнянь щодо граничного розподілу ймовірностей. Математична модель завдання

З математичної точки зору нашим завданням є знаходження граничного при $t \rightarrow \infty$ розподілу випадкового вектора $\{\nu(t), \xi(t)\}$. Це означає, що ми вивчаємо роботу терміналу в режимі, що встановився.

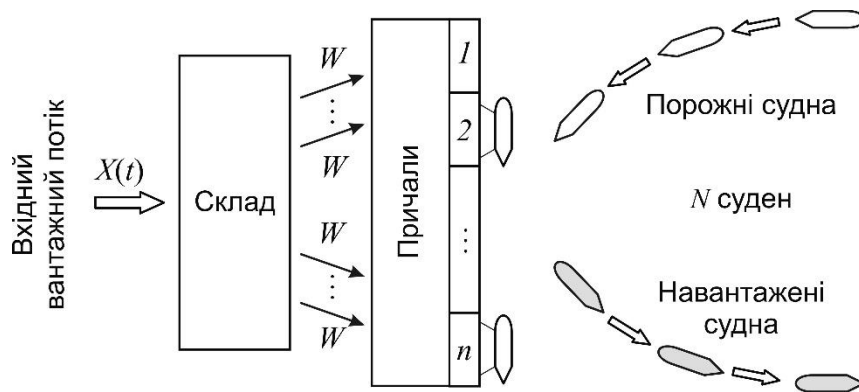


Рисунок 1. Структурна схема взаємодії транспортних потоків на портовому терміналі

Позначимо

$$F_k(x) = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{v(t) = k, \xi(t) \leq x\}, x \geq 0, k = 0, 1, \dots, n + r,$$

граничний розподіл ймовірностей (у припущенні існування зазначених границь). Для знаходження цього розподілу необхідно зробити низку додаткових припущень, що дозволяють звести випадковий процес $\{v(t), \xi(t)\}$ до марківського процесу. Покладемо

$$A(t) = 1 - e^{-\lambda t}, t \geq 0;$$

$$H(x) = 1 - e^{-x/g}, x \geq 0,$$

де $1/\lambda$ – середній інтервал часу між сусідніми прибуттями суден на термінал;

g – середня чиста вантажопідйомність судна.

При цих припущеннях потік завантажених ТЗ описується моделлю складного пуассонівського процесу $X(t)$, $X(0)=0$, з невід’ємними траєкторіями та нульовим знесенням [6,17,37], а процес $\{v(t), \xi(t)\}$ стає однорідним марківським. Для знаходження граничного розподілу цього процесу необхідно спочатку вивести відповідну систему інтегро-диференціальних рівнянь. Ця система рівнянь виводиться за допомогою типових міркувань (див., наприклад, [19,37]), що полягають у записі асимптотичних співвідношень, що пов’язують шуканий розподіл у двох нескінченно близьких моментах часу, і в подальшому граничному переході [4,37 та ін]. Тоді справедлива наступна система інтегро-диференціальних рівнянь та граничних умов:

$$0 = -(\lambda_1 + \lambda_2)F_0(x) + \lambda_1 \int_0^x G(x-y)dF_0(y) + \mu(F_1(x) - F_1(0)), x > 0, \quad (1)$$

$$-W_k F_k'(x) = -(\lambda_1 + \lambda_2)F_k(x) + \lambda_1 \int_0^x G(x-y)dF_k(y) - \mu_k(F_k(x) - F_k(0)) + (N - k + 1)\lambda_2 F_{k-1}(x) + \mu_{k+1}(F_{k+1}(x) - F_{k+1}(0)), x > 0, k = 1, 2, \dots, n + r - 1, \quad (2)$$

$$-W_N F_N'(x) = -(\lambda_1 + \mu_N)F_N(x) + \lambda_1 \int_0^x G(x-y)dF_N(y) + \lambda_2 F_{N-1}(x), x > 0, \quad (3)$$

$$W_k F_k'(0) = [\lambda_1 + \lambda_2(N - k)]F_k(0) + \lambda_2(N - k + 1)F_{k-1}(0), k = 1, 2, \dots, N, \quad (4)$$

$$F_0(0) = 0. \quad (5)$$

де $W_k = \mu_k g$; $\mu_k = \mu \min(k, n)$; $\mu = W / g$.

Умови нормування:

$$\sum_{k=0}^N F_k(\infty) = 1. \quad (6)$$

Система рівнянь (1)-(6) може бути розв'язана аналітично за допомогою методу перетворення Лапласа. Позначимо через

$$\begin{aligned} \varphi_0(s) &= \int_0^{\infty} e^{-sx} dF_0(x), \\ \varphi_k(s) &= F_k(0) + \int_0^{\infty} e^{-sx} dF_k(x), \operatorname{Re} s \geq 0, k = 1, 2, \dots, n+r, \end{aligned} \quad (7)$$

перетворення Лапласа-Стілтєса від функцій $F_k(x), k = 0, 1, \dots, n+r$. Перетворимо систему (1)-(6), застосувавши до інтегральних членів теорему про згортання функцій та враховуючи умови (4), (5). В результаті прийдемо до наступної системи алгебраїчних рівнянь для знаходження функцій (7)

$$-[\lambda_1(1-g(s)) + \lambda_2]\phi_0(s) + \mu_1\phi_1(s) = \mu_1F_1(0), \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & -[-sW_k + \mu_k + \lambda_1(1-g(s)) + \lambda_2]\phi_k(s) + \lambda_2\phi_{k-1}(s) + \\ & + \mu_{k+1}\phi_{k+1}(s) = (-\mu_k + sW_k)F_k(0) + \mu_{k+1}F_{k+1}(0), k = 1, 2, \dots, n+r-1, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & -[-sW_N + \lambda_1(1-g(s)) + \mu_N]\phi_{n+r}(s) + \lambda_2\phi_{n+r-1}(s) = \\ & = (-\mu_{n+r} + sW_{n+r})F_{n+r}(0), \operatorname{Re} s \geq 0; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\sum_{k=0}^{n+r} \phi_k(0) = 1. \quad (11)$$

Складаючи всі рівняння системи (8)-(10), після елементарних перетворень отримаємо наступну рівність:

$$-\lambda_1(1-g(s)) \sum_{k=0}^{n+r} \phi_k(s) = s \sum_{k=1}^{n+r} [W_k(F_k(0) - \phi_k(s))]. \quad (12)$$

Розділивши обидві частини рівності (12) на s і перейшовши до межі при $s \rightarrow +0$, отримаємо співвідношення, яке виражає так званий закон збереження вантажопотоку, що входить на склад терміналу і виходить з нього, що має місце в режимі роботи терміналу, що встановився:

$$\lambda_1 g^{(1)} = \sum_{k=1}^{r+n} W_k (F_k(\infty) - F_k(0)), \quad (13)$$

де $g^{(1)} = \int_0^{\infty} x dG(x) < \infty$ – середня вантажопідйомність одного ТЗ. Дійсно, в лівій частині

рівності (13) стоїть інтенсивність вантажопотоку, що надходить на склад терміналу, а в лівій – інтенсивність потоку відвантаженого зі складу на судна вантажу.

Рішення системи (8)-(10) може бути знайдено шляхом послідовного виразу функцій $\varphi_k(s), k = 1, 2, \dots, n+r$, через $\varphi_0(s)$ и наступного використання рівності (12). Постійні, що залишились невідомими $F_k(0), k = 1, 2, \dots, n+r$, знаходяться з умови аналітичності функцій $\varphi_k(s), k = 0, 1, \dots, n+r$, в правій напівплощині $\operatorname{Re} s \geq 0$. Можна показати [37], що визначник системи (8)-(10) має рівно $n+r$ нулів у цій напівплощині.

Визначивши функції $F_k(x), k = 0, 1, \dots, n+r$, можна обчислити, наприклад, такі важливі показники роботи терміналу:

а) стаціонарне математичне очікування кількості вантажу, що знаходиться на складі у довільний момент часу,

$$\mathbf{M}\xi = \int_0^{\infty} x \sum_{k=0}^{n+r} dF_k(x) = - \sum_{k=0}^{n+r} \frac{d}{ds} \varphi_k(s) \Big|_{s=0};$$

б) стаціонарне математичне очікування числа суден, що знаходиться на терміналі у довільний момент часу,

$$\mathbf{M}\nu = \sum_{k=1}^{n+r} kF_k(\infty) = \sum_{k=1}^{n+r} k\varphi_k(0);$$

в) стаціонарну ймовірність того, що склад порожній і судна додатково простоюють внаслідок очікування підвезення вантажу

$$\sum_{k=1}^{n+r} F_k(0);$$

г) пропускну спроможність фронту навантаження терміналу

$$\sum_{k=1}^{n+r} W_k F_k(\infty).$$

Зазначимо, що вираз

$$\sum_{k=1}^{n+r} W_k F_k(\infty) - \lambda_1 g^{(1)}$$

має сенс резерву пропускну спроможності фронту навантаження терміналу. Щоб уникнути занадто великого скупчення вантажу на терміналі з часом цей резерв має бути позитивним (див. (13)). З формальної точки зору позитивність резерву означає існування режиму роботи аналізованої транспортно-складської системи.

Розв'язування системи (8)–(11) для окремого випадку $r = 0, n = 1$.

Для цього окремого випадку (одне судно, один причал) система (8)-(10) набуде наступного вигляду:

$$[\lambda_1(1-g(s)) + \lambda_2]\phi_0(s) - \mu\phi_1(s) = -\mu F_1(0),$$

$$-\lambda_2\phi_0(s) + [-sW + \mu + \lambda_1(1-g(s))]\phi_1(s) = (\mu - sW)F_1(0), \operatorname{Re} s \geq 0. \quad (14)$$

Розв'язування системи (14) дається формулами:

$$\phi_0(s) = \mu \frac{\phi_1(s) - F_1(0)}{\lambda_1(1-g(s)) + \lambda_2}, \quad (15)$$

$$\phi_1(s) = F_1(0) \frac{[\lambda_1(1-g(s)) + \lambda_2](\mu - sW) - \lambda_2\mu}{[\lambda_1(1-g(s)) + \lambda_2][\mu - sW + \lambda_1(1-g(s))] - \lambda_2\mu} \quad (16)$$

При $s \rightarrow +0$ з формул (15), (16), використовуємо правило Лопітала і отримуємо співвідношення

$$F_0(\infty) = \frac{\mu}{\lambda_2}(F_1(\infty) - F_1(0)), \quad F_1(\infty) = F_1(0) \frac{\mu \lambda_1 g^{(1)} - \lambda_2 W}{\lambda_1 g^{(1)}(\lambda_2 + \mu) - \lambda_2 W}. \quad (17)$$

З (11), (17) знаходимо

$$F_1(0) = 1 - \frac{\lambda_1 g^{(1)}(\lambda_2 + \mu)}{\lambda_2 W}, \quad F_0(\infty) = \frac{\lambda_1 g^{(1)} \mu}{\lambda_2 W}, \quad F_1(\infty) = 1 - \frac{\lambda_1 g^{(1)} \mu}{\lambda_2 W}. \quad (18)$$

Формули (15)-(18) дають рішення завдання.

Оскільки вирази (18) є ймовірності, то всі вони повинні бути невід'ємними і меншими одиниці, звідки слідує необхідність виконання умови

$$\lambda_1 g^{(1)} < \frac{\lambda_2 W}{\lambda_2 + \mu}. \quad (19)$$

Зазначимо, що співвідношення (13) у цьому випадку набуде вигляду:

$$\lambda_1 g^{(1)} = (1 - F_1(0)) \frac{\lambda_2 W}{\lambda_2 + \mu}, \quad (20)$$

Перетворення Лапласа-Стілтєса від ф.ш. кількості вантажу, що знаходиться на складі [37], є

$$\phi(s) = \phi_0(s) + \phi_1(s), \quad (21)$$

тому перші два початкові моменти цього розподілу можна знайти за формулами

$$\mathbf{M}\xi = -\phi'(0), \quad \mathbf{M}\xi^2 = \phi''(0). \quad (22)$$

За допомогою формул (15), (16) після ряду нескладних обчислень знаходимо

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\xi &= \frac{1}{2} \{ \lambda_1 (2Wg^{(1)} + \mu g^{(2)}) F_1(0) + \lambda_1 F_1(\infty) [(\mu - \lambda_2)g^{(2)} + 2g^{(1)}(\lambda_1 g^{(1)} - W)] \} \times \\ &\quad \times [\lambda_2(\lambda_1 g^{(1)} - W) - \lambda_1 g^{(1)} \mu]^{-1}, \\ \mathbf{M}\xi^2 &= \frac{1}{\lambda_2} [(\lambda_2 + \mu)\phi_1''(0) - 2\lambda_1 g^{(1)}\phi_0'(0) + \lambda_1 g^{(2)}F_0(\infty)], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{де } g^{(i)} &= \int_0^{\infty} x^i dG(x) < \infty, i=1,2,3; \\ \phi_0'(0) &= \frac{1}{\lambda_2} [\mu \phi_1'(0) - \lambda_1 g^{(1)} F_0(\infty)]; \\ \phi_1'(0) &= \frac{\lambda_1}{2} \{F_1(0)(2Wg^{(1)} + \mu g^{(2)}) + F_1(\infty)[(\mu - \lambda_2)g^{(2)} + 2g^{(1)}(\lambda_1 g^{(1)} - W)]\} \times \\ &\quad \times [\lambda_2 W - \lambda_1 g^{(1)}(\lambda_2 + \mu)]^{-1}; \\ \phi_1''(0) &= \frac{\lambda_1}{3} \{(3g^{(2)}W + \mu g^{(3)})(F_1(\infty) - F_1(0)) + F_1(\infty)(\lambda_2 g^{(3)} - 6\lambda_1 g^{(1)}g^{(2)}) - \\ &\quad - 3\phi_1'(0)[(\lambda_2 + \mu)g^{(2)} + 2g^{(1)}(W - \lambda_1 g^{(1)})]\} [\lambda_2 W - \lambda_1 g^{(1)}(\lambda_2 + \mu)]^{-1}. \end{aligned}$$

Обґрунтування доцільності страхування ризику додаткового простою суден.

Розглянемо практичний приклад використання одержаних вище теоретичних результатів на прикладі оцінки доцільності страхування ризику простою суден через додаткове очікування підвезення вантажу на термінал. Очевидно, що ризики подібного роду здебільшого прямо лежать на відповідальності лінійного агента, який виступає в ролі канвасера [1,2,29] (якщо термінал порту, що розглядається, обслуговує судна лінії). Для простоти приймемо, що є лише один причал, тобто. $n = 1$. Оцінимо спочатку середній час додаткового простою суден біля причалу під вантажними операціями, викликаного відсутністю вантажу на складі і очікуванням його підвезення. Імовірність цієї події, як випливає з вищенаведених результатів, дорівнює

$$\sum_{k=1}^{r+1} F_k(0). \quad (23)$$

Отже, протягом періоду часу T (у режимі роботи терміналу, що встановився) середній час простою суден із зазначеної причини складе

$$\Delta = T \sum_{k=1}^{r+1} F_k(0). \quad (24)$$

Нехай s_{cm} означає добові витрати на стоянці судна біля причалу. Тоді додаткові середні витрати судновласника через відсутність вантажу на складі становитимуть $s_{cm} \Delta$. Якщо агент судновласника розгляне питання про можливе страхування цього ризику, він може вдатися до таких міркувань [29,30]. Якщо він укладе зі страховою компанією договір про страхування на період T , зобов'язуючись їй виплатити страхову премію в цей період у розмірі c , то найпростіший критерій доцільності страхування виглядатиме так:

$$c < s_{cm} \Delta = s_{cm} T \sum_{k=1}^{r+1} F_k(0). \quad (25)$$

Зокрема, якщо на термінал може прибувати лише одне судно, то (див. (18)) останній критерій набуде наступного вигляду:

$$F_1(0) = 1 - \frac{\lambda_1 g^{(1)}(\lambda_2 + \mu)}{\lambda_2 W} > c / T s_{cm}. \quad (26)$$

На закінчення зауважимо, що наведені викладки дозволяють встановити також резерв пропускної спроможності фронту навантаження терміналу

$$\sum_{k=1}^{n+r} W_k F_k(\infty) - \lambda_1 g^{(1)} \quad (27)$$

Зрозуміло, що він повинен бути позитивним, щоб уникнути занадто великого скупчення вантажу (див. (13)). З формальної погляду позитивність резерву означає стан встановленого режиму роботи аналізованої транспортно-складської системи, що відповідає практиці роботи вантажного терміналу порту.

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

1. Запропонована методика має позитивні особливості, які полягають у її простоті, відсутність вимог великої кількості даних, високої кваліфікації зайнятого в роботах персоналу. Базою для цього є інформація, що передається агентами та експедиторами, вантажовласниками та капітанами суден і що дозволяє планувати вантажну обробку на заданому тимчасовому горизонті та в різних виробничих ситуаціях.

2. Проведені дослідження дозволяють поширювати висновки на розробку критеріїв доцільності страхування ризику простою суден через додаткове очікування підвезення вантажу на термінал.

3. Для використання розроблених моделей на практиці можна використовувати стандартне програмне забезпечення (наприклад, пакети програм *Microsoft Excel*).

4. На жаль, можна констатувати, що точність розглянутих вихідних даних на практиці зазвичай не така висока. Тому в перспективних дослідженнях слід використовувати параметри, що є випадковими величинами із заданими законами розподілу. Це вимагатиме вже нових завдань стохастичної оптимізації обліку виникнення ризиків додаткового простою суден через все тієї ж причини недостатньої кількості вантажів на складі.

5. Модель може використовуватися в менеджменті портових терміналів та агентських компаній, що займаються аквізицією та конвасингом, а також при плануванні завезення вантажів у порти та вантажної обробки суден на заданому тимчасовому горизонті. Отримані результати можуть покращити планування та управління логістичними процесами, сприяти розвитку вантажної бази. Основою використання практично може бути інформація, що міститься у заявках суден і підприємств портового сервісу, що обслуговують ці судна.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Лапкин А.И. Особенности агентирования при выполнении проекта организации работы флота последовательными рейсами / А.И. Лапкин. Методи і засоби управління розвитком транспортних систем. Збірник наукових праць. Випуск 2. – Одеса: ОДМУ, 2001. – С. 169-175.
- [2] Петров І.М. Сучасний стан і проблеми розвитку берегових сервісних формувань на морському транспорті / Принципи розвитку організації морських перевезень в сучасних умовах міжнародного судноплавства: монографія // [авт. кол.: Ніколаєва Л.Л., Савчук В.Д., Петров І.М. та ін.] під редакцією Л.Л. Ніколаєвої. – Одеса: НУ «ОМА». 2019. – С. 123-162.
- [3] Воевудский, Е.Н. Стохастические модели в проектировании портов и управлении их деятельностью [Текст] / Е.Н. Воевудский, М.Я. Постан. – Транспорт, 1987. – 318 с.
- [4] Постан, М.Я. Экономико-математические модели смешанных перевозок [Текст] / М.Я. Постан. – Одесса: Астропринт, 2006. – 376 с.
- [5] Edgeworth Francis I. The British Economic Association / Francis Edgeworth // The Economic Journal (EJ), Vol. 1, march 1891. – pp. 1-14.

- [6] Harris Seimur E. Saving American capitalism/ Seimur Harris. – N.Y., 1948. – p. 194
- [7] Семенов, К. М. Методика систематизации процессов в дискретно-событийной имитационной модели морского порта [Текст]/К. М. Семенов // *Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология.* – 2013. – №2. – С. 184-192.
- [8] Rizzoli, A. E. A simulation tool for combined/rail/ road transport in intermodal terminals [Text]/ A. E. Rizzoli, N. Fornara, L.M. Gambardella// *Mathematics and Computers in Simulation.*-2002.- Vol.59, Issues 1-3. – P. 57-71. doi:10.1016/s0378-4754(01)00393-7.
- [9] Macharis, C. Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review [Text]/ C. Macharis, Y. M. Bontekoning//*Eur J Oper Res.* – 2004. – Vol. 153, Issue 2. – P. 1-34. doi: 10.1016/s0377-2217(03) 00161-9.
- [10] Постан, М. Я. Экономико-математические модели смешанных перевозок [Текст] /М. Я. Постан. – Одесса: Астропринт, 2006. – 376 с.
- [11] Imakita, J. Techno-economic analysis of the port transport system [Text] /J.Imakita. – Saxon House, England, 1978. – 216 p.
- [12] Горбатый, М. М. Теория и практика оптимизации производственных мощностей морских портов [Текст]/ М. М. Горбатый.- Транспорт, 1981. –168 с.
- [13] Петров И.М. Агентирование морских судов: теория и практика: учебное пособие/ И.М. Петров, В.А. Виговский – Черновцы, «Книги – XXI», 2005. – 496 с.
- [14] Петров И.М. Диверсификация агентской деятельности и предоставление шипчандлерских услуг. //Судовождение: Сб. науч. трудов / ОНМА. Вып. 20. – Одесса: «ИздатИнформ», 2011. – С. 157-164.
- [15] Зильдман, В.Я. Взаимодействие встречных транспортных потоков, имеющих пуассоновский характер при отсутствии регулирования [Текст] / В.Я. Зильдман, Г.В. Поддубный // *Экономика и математические методы.* – 1977. – Т. XIII. – Вып. 3. – С. 524-535.
- [16] Зильдман, В.Я. Модель взаимодействия потока судов, прибывающих с грузом, со встречным потоком железнодорожных составов [Текст] / В.Я. Зильдман, Г.В. Поддубный // *Морской флот и порты: Проблемы развития и совершенствования производственной деятельности.* – В/О «Мортехинформреклама», 1985. – С. 55-60.
- [17] Постан, М.Я. Об унифицированных схемах моделирования взаимодействия транспортных потоков в пунктах перевалки грузов [Текст]/М.Я. Постан// *ВИНИТИ. Транспорт: наука, техника, управление.*–1992. – №6.– С. 8–20.
- [18] Воевудский, Е.Н. О стохастических моделях взаимодействия транспортных потоков в пунктах перевалки грузов [Текст] /Е.Н. Воевудский, М.Я. Постан // *Кибернетика и системный анализ.* – 1993. – №1. – С.101–112.
- [19] Крук, Ю. Ю. Разработка и анализ динамической модели оптимизации взаимодействия транспортных потоков на портовом терминале [Текст] /Ю. Ю. Крук, М. Я. Постан // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* – 2016. – №1/3 (79). – С.19-23. doi:10.15587/1729-4061.2016.61154.
- [20] Steadie Seifi, M. Multimodal freight transportation planning: A literature review [Text]/ M. Steadie Seifi, N.P. Dellaert, W. Nuijten, et al.// *Eur J Oper Res.* – 2014. – Vol. 233. – Issue 1. – P. 1-15/.
- [21] Ursavas E. Optimal policies for the berth allocation problem under stochastic nature [Text] / E. Ursavas, Zhu S.X. // *Eur. J. Oper Res.* – 2016. – Vol. 255. – Issue 2. – P. 380-387.

- [22] Gaobo, L. The model of location for single allocation multimodal hub under capacity constraints [Text] / L. Gaobo, D. Hu, L. Su // *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. – 2013. – 96. – P. 351-359.
- [23] Postan M. Ya. Modeling the influence of transport units movements irregularity on storage level of cargo at warehouse [Text] / M. Ya. Postan, Yu. V. Kurudzhi // *Acta Systemica*. – 2012. – Vol. XII, #1. – P. 31-36.
- [24] Clusters / Bogusz Wiśnicki, Tygran Dzhuguryan, Sylwia A Decision Support Model for Lean Supply Chain Management in City Multifloor Manufacturing Mielniczuk, Ihor Petrov, Liudmyla Davydenko // *Sustainability*. – 2024. – Vol. 16/ issue 20, 8801. <https://doi.org/10.3390/su16208801>. On-line at <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/20/8801>.
- [25] The Design of Sustainable City Multi-Floor Manufacturing Processes Under Uncertainty in Supply Chains / Tygran Dzhuguryan, Agnieszka Deja, Bogusz Wiśnicki, Zofia Józwiak // *Sustainability*. – Special Issue Sustainable Human Resource Management in Industry 4.0, 2020, 12(22), 439. <https://doi.org/10.3390/su12229439>.
- [26] Green technologies in smart city multifloor manufacturing clusters: A framework for additive manufacturing management / Agnieszka Deja, Wojciech Ślaczka, Lyudmyla Dzhuguryan, Tygran Dzhuguryan, Robert Ulewicz // *Production engineering archives 2023*, 29(4). Online at <https://pea-journal.eu>.
- [27] Шахов А.В. Проектно-ориентированное управление функционированием ремонтпригодных технических систем [Текст]/А.В. Шахов, В.И. Чимшир. – Одесса: Феникс, 2006. – 213 с.
- [28] Александровская Н.И. Риск-ориентированная стратегия технического обслуживания и ремонта судов [Текст]/Н.И. Александровская, В.И. Шахов, А.В. Шахов//Методи та засоби управління розвитком транспортних систем: Зб. наук. праць ОНМУ. – 2011. – №17. – С. 7–17.
- [29] Postan, M.Ya. Method of Evaluation of Insurance Expediency of Stevedoring Company's Responsibility for Cargo Safety [Text] // M.Ya. Postan, O.O. Balobanov / *Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. Methods and Algorithms in Navigation*. A. Weintrit, T. Neumann (eds.). Boca Raton-London-New York-Leiden: CRC Press, 2011. - P. 33-36.
- [30] Балобанов А.О., Петров И.М., Постан М.Я. Метод обоснования целесообразности страхования риска сюрвейерской компании в порту // *Вісник ОНМУ*. – Одеса: Вид-во ОНМУ. – 2017. – № 3(52). – С. 163-172.
- [31] Postan, M.Ya. Method of Assessment of Insurance Expediency of Quay Structures' damage Risks in Sea Ports [Text] / M.Ya. Postan, M.B. Poizner // *Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. Maritime Transport and Shipping*. A. Weintrit, T. Neumann (eds.). Boca Raton-London-New York-Leiden: CRC Press, 2013. - P. 123-127.
- [32] Бродецкий Г.Л. Экономико-математические методы и модели в логистике: потоки событий и системы обслуживания [Текст]/Г.Л. Бродецкий. – Академия, 2011. – 272 с.
- [33] Постан, М.Я. Об одном классе смешанных марковских процессов и их применение в теории телеграфика [Текст]/М.Я. Постан//Проблемы передачи информации. –1992. – Т. XXVIII, №3. – С. 40–53.
- [34] Postan M.Ya. Application of Markov Drift Processes to Logistical Systems Modeling [Text] / M.Ya. Postan // *Proc. of First Intl. Conf. "Dynamics in Logistics"*, 2007. Aug. 2007, Bremen: Springer-Verlag. – P. 443–455. (DOI:10/1007/978-3-540-76862-3).
- [35] Postan M.Ya. Optimization of Spare Parts Lot Size for Supply of Equipment's Park [Text] /M.Ya. Postan, I.V. Morozova, L.V. Shyryaeva // *Proc. of 2nd Intl. Conf. "Dynamics in*

- Logistics” LDIC’2009. – Springer, 2011.– P. 105–113. (DOI: 10.1007/978-3-642-11996-5_10).
- [36] Postan M.Ya. Application of Semi-Markov Drift Processes to Logistic Systems Modeling and Optimization [Text]/M.Ya. Postan//Proc. of 4th Intl. Conf. “Dynamics in Logistics” LDIC2014. – Berlin: Springer, 2016. – P. 227–237. (DOI: 10.1007/978-3-319-23512-7_22)
- [37] Postan M.Ya., Kushnir L.V. A method of determination of port terminal capacity under irregular cargo delivery and pickup / M.Ya. Postan, I.V. Kushnir // Eastern–European Journal of Enterprise Technologies. 2016. V.4, № 4/3 (82). P. 30–37. (DOI: 10.15587/ 1729 – 4061.2016.76285). Scopus.
- [38] Петров И.М. Модель оптимизации управления запасами на консигнационных складах в сервисных эргатических системах на морском транспорте // Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науковий журнал. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2016. - № 2 (15). – С. 57-64.
- [39] Petrov I.M., Postan M.Ya. Construction and analysis of the model for stochastic optimization of inventory management at a ship repair yard / I.M. Petrov, M.Ya. Postan // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. No. 6/3 (96). P. 62-70. (DOI: 10.15587 / 1729-4061.2018.151922). Scopus.

REFERENCES

- [1] Lapkyn A.Y. Osobennosty ahentyrovaniya pry vypolnenny proekta orhanyzatsyy raboty flota posledovatelny my reisamy / A.I. Lapkin. Metody i zasoby upravlinnia rozvytkom transportnykh system. Zbirnyk naukovykh prats. Vypusk 2. – Odesa: ODMU, 2001. – S. 169-175.
- [2] Petrov I.M. Suchasnyi stan i problemy rozvytku berehovykh servisnykh formuvan na morskomu transporti / Pryntsypy rozvytku orhanizatsii morskykh perevezen v suchasnykh umovakh mizhnarodnoho sudnoplavstva: monohrafiia // [avt. kol.: Nikolaieva L.L., Savchuk V.D., Petrov I.M. ta in.] pid redaktsiieiu L.L. Nikolaievoi. – Odesa: NU «OMA». 2019. – S. 123-162.
- [3] Voevudskyi, E.N. Stokhastycheskye modely v proektyrovanny portov y upravlenyy ykh deiatelnosti [Tekst]/ E.N. Voevudskyi, M.Ia. Postan.– Transport, 1987. – 318 s.
- [4] Postan, M.Ia. Экономыко-математыcheskye modely smeshannykh perevozok [Tekst]/M.Ia. Postan. – Odessa: Astroprynt, 2006. – 376 s.
- [5] Edgeworth Francis I. The British Economic Association/ Francis Edgeworth // The Economic Journal (EJ), Vol. 1, march 1891. – pp. 1-14.
- [6] Harris Seimur E. Saving American capitalism/ Seimur Harris. – N.Y., 1948. – p. 194
- [7] Semenov, K. M. Metodyka systematyzatsyy protsessov v dyskretno-sobytyinoi ymytatsyonnoi modely morskoho porta [Tekst]/K. M. Semenov //Vestnyk AHTU. Ser.: Morskaia tekhnika y tekhnolohyia. – 2013. – №2. – S. 184-192.
- [8] Rizzoli, A. E. A simulation tool for combined/rail/ road transport in intermodal terminals [Text]/ A. E. Rizzoli, N. Fornara, L.M. Gambardella// Mathematics and Computers in Simulation.-2002.- Vol.59, Issues 1-3. – P. 57-71. doi:10.1016/s0378-4754(01)00393-7.
- [9] Macharis, C. Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review [Text]/ C. Macharis, Y. M. Bontekoning//Eur J Oper Res. – 2004. – Vol. 153, Issue 2. – P. 1-34. doi: 10.1016/s0377-2217(03) 00161-9.
- [10] Postan, M. Ya. Экономыко-математыcheskye modely smeshannykh perevozok [Tekst] /M. Ya. Postan. – Odessa: Astroprynt, 2006. – 376 s.

- [11] Imakita, J. Techno-economic analysis of the port transport system [Text] / J.Imakita. – Saxon House, England, 1978. – 216 p.
- [12] Horbatiy, M. M. Teoriya y praktyka optymizatsyy proyzvodstvennykh moshchnosti morskyykh portov [Tekst]/ M. M. Horbatiy.- Transport, 1981. – 168 s.
- [13] Petrov Y.M. Ahentyrovanye morskyykh sudov: teoriya y praktyka: uchebnoe posobyе/ Y.M. Petrov, V.A. Vyhovskiy – Chernovtsy, «Knyhy – XXI», 2005. – 496 s.
- [14] Petrov Y.M. Dyversyfykatsiya ahentskoi deiatelnosti y predostavlenye shypchalerskykh usluh. //Sudovozhdenye: Sb. nauch. trudov / ONMA. Vyp. 20. – Odessa: «YzdatYnform», 2011. – S. 157-164.
- [15] Zyldman, V.Ia. Vzaymodeistviye vstrechnykh transportnykh potokov, ymeiushchykh puassonovskiy kharakter pry otsutstviy rehulyrovaniya [Tekst] / V.Ia. Zyldman, H.V. Poddubnyi //Экономика y matematycheskiye metody. – 1977. – T.XIII. – Vyp. 3. – S. 524-535.
- [16] Zyldman, V.Ia. Model vzaymodeistviya potoka sudov, prybyvaiushchykh s hruzom, so vstrechnym potokom zheleznodorozhnykh sostavov [Tekst] / V.Ia. Zyldman, H.V. Poddubnyi // Morskoi flot y porty: Problemy razvytiya y sovershenstvovaniya proyzvodstvennoi deiatelnosti. – V/O «Mortekhynformreklama», 1985. – S. 55-60.
- [17] Postan, M.Ia. Ob unyfytsirovannykh skhemakh modelirovaniya vzaymodeistviya transportnykh potokov v punktakh perevalky hruzov [Tekst]/M.Ia. Postan// VYNYTY. Transport: nauka, tekhnika, upravleniye. –1992.– №6.– S. 8–20.
- [18] Voevudskiy, E.N. O stokhastycheskykh modeliakh vzaymodeistviya transportnykh potokov v punktakh perevalky hruzov [Tekst] /E.N. Voevudskiy, M.Ia. Postan //Kybernetika y systemnyi analiz. – 1993. – №1.– S.101–112.
- [19] Kruk, Yu. Yu. Razrabotka y analiz dynamycheskoi modeli optymizatsyy vzaymodeistviya transportnykh potokov na portovom termynale [Tekst] /Iu. Yu. Kruk, M. Ya. Postan //Vostochno-Evropeyskiy zhurnalпередovykh tekhnolohiyi. – 2016. – №1/3 (79). – S.19-23. doi:10.15587/1729-4061.2016.61154.
- [20] Steadie Seifi, M. Multimodal freight transportation planning: A literature review [Text]/ M. Steadie Seifi, N.P. Dellaert, W. Nuijten, et al.// Eur J Oper Res. – 2014. – Vol. 233. – Issue 1. – P. 1-15/.
- [21] Ursavas E. Optimal policies for the berth allocation problem under stochastic nature [Text] / E. Ursavas, Zhu S.X. // Eur. J. Oper Res. – 2016. – Vol. 255. – Issue 2. – P. 380-387.
- [22] Gaobo, L. The model of location for single allocation multimodal hub under capacity constraints [Text] / L. Gaobo, D. Hu, L. Su//Procedia-Social and Behavioral Sciences. – 2013. – 96. – P. 351-359.
- [23] Postan M. Ya. Modeling the influence of transport units movements irregularity on storage level of cargo at warehouse [Text] / M. Ya. Postan, Yu. V. Kurudzhi //Acta Systemica. – 2012. – Vol. XII, #1. – P. 31-36.
- [24] Clusters / Bogusz Wiśnicki, Tygran Dzhuguryan, Sylwia A Decision Support Model for Lean Supply Chain Management in City Multifloor Manufacturing Mielniczuk, Ihor Petrov, Liudmyla Davydenko // Sustainability. – 2024. – Vol. 16/ issue 20, 8801.https://doi.org/10.3390 /su16208801. On-line at https://www. mdpi.com/2071-1050/16/20/8801.
- [25] The Design of Sustainable City Multi-Floor Manufacturing Processes Under Uncertainty in Supply Chains / Tygran Dzhuguryan, Agnieszka Deja, Bogusz Wiśnicki, Zofia Józwiak // Sustainability. – Special Issue Sustainable Human Resource Management in Industry 4.0), 2020, 12(22), 439. https://doi.org/10.3390/ su12229439.
- [26] Green technologies in smart city multifloor manufacturing clusters: A framework for additive manufacturing management / Agnieszka Deja, Wojciech Ślęczka, Lyudmyla Dzhuguryan,

Tygran Dzhuguryan, Robert Ulewicz // Production engineering archives 2023, 29(4). Online at <https://pea-journal.eu>.

- [27] Shakhov A.V. Proektno-oryentyrovannoe upravlenye funktsyonyrovanyem remontopryhodnykh tekhnicheskyykh system [Tekst]/A.V. Shakhov, V.Y. Chymshyr. – Odessa: Fenyks, 2006. – 213 s.
- [28] Aleksandrovskaya N.Y. Rysko-oryentyrovannaya strategiya tekhnicheskogo obsluzhivaniya y remonta sudov [Tekst]/N.Y. Aleksandrovskaya, V.Y. Shakhov, A.V. Shakhov//Metody ta zasoby upravlinnia rozvytkom transportnykh system: Zb. nauk. prats ONMU. – 2011. – №17. – S. 7–17.
- [29] Postan, M.Ya. Method of Evaluation of Insurance Expediency of Stevedoring Companies Responsibility for Cargo Safety [Text] // M.Ya. Postan, O.O. Balobanov / Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. Methods and Algorithms in Navigation. A. Weintrit, T. Neumann (eds.). Boca Raton-London-New York-Leiden: CRC Press, 2011. - P. 33-36.
- [30] Balobanov A.O., Petrov Y.M., Postan M.Ia. Metod obosnovaniya tselesoobraznosti strakhovaniya ryska siurveyskoi kompanyy v portu // Visnyk ONMU. - Odesa: Vyd-vo ONMU. 2017. № 3(52). S. 163-172.
- [31] Postan, M.Ya. Method of Assessment of Insurance Expediency of Quay Structures damage Risks in Sea Ports [Text] / M.Ya. Postan, M.B. Poizner // Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. Maritime Transport and Shipping. A. Weintrit, T. Neumann (eds.). Boca Raton-London-New York-Leiden: CRC Press, 2013. - P. 123-127.
- [32] Brodetskyi H.L. Ekonomyko-matematicheskiye metody y modely v lohystyke: potoky sobytyi y systemy obsluzhivaniya [Tekst]/H.L. Brodetskyi. – Akademyia, 2011. – 272 s.
- [33] Postan, M.Ia. Ob odnom klasse smeshannykh markovskyykh protsessov y ykh pryomenenye v teoryi teletrafyka [Tekst]/M.Ia. Postan//Problemy peredachy ynformatsyy. –1992. – T.XXVIII, №3. – S. 40–53.
- [34] Postan M.Ya. Application of Markov Drift Processes to Logistical Systems Modeling [Text] / M.Ya. Postan// Proc. of First Intl. Conf. “Dynamics in Logistics”, 2007. Aug. 2007, Bremen: Springer-Verlag.– P. 443–455. (DOI:10/1007/978-3-540-76862-3).
- [35] Postan M.Ya. Optimization of Spare Parts Lot Size for Supply of Equipments Park [Text] /M.Ya. Postan, I.V. Morozova, L.V. Shyryaeva // Proc. of 2nd Intl. Conf. “Dynamics in Logistics” LDIC2009. – Springer, 2011.– P. 105–113. (DOI: 10.1007/978-3-642-11996-5_10).
- [36] Postan M.Ya. Application of Semi-Markov Drift Processes to Logistic Systems Modeling and Optimization [Text]/M.Ya. Postan//Proc. of 4th Intl. Conf. “Dynamics in Logistics” LDIC2014. – Berlin: Springer, 2016. – P. 227–237. (DOI: 10.1007/978-3-319-23512-7_22)
- [37] Postan M.Ya., Kushnir L.V. A method of determination of port terminal capacity under irregular cargo delivery and pickup / M.Ya. Postan, I.V. Kushnir // Eastern–European Journal of Enterprise Technologies. 2016. V.4, № 4/3 (82). P. 30–37. (DOI: 10.15587/ 1729 – 4061.2016.76285). Scopus.
- [38] Petrov Y.M. Model optymizatsyy upravleniya zapasamy na konsyhnatsyonnykh skladakh v cervysnykh erhatycheskyykh systemakh na morskoy transporte // Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii: naukovyi zhurnal. – Kherson: Khersonska derzhavna morskya akademiia, 2016. - № 2 (15). – S. 57-64.
- [39] Petrov I.M., Postan M.Ya. Construction and analysis of the model for stochastic optimization of inventory management at a ship repair yard / I.M. Petrov, M.Ya. Postan // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. No. 6/3 (96). P. 62-70. (DOI: 10.15587 / 1729-4061.2018.151922). Scopus.