

УДК 658. 286: 519.286

А.В. Гуцул, М.Я. Постан

МЕТОД ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ СОЗДАНИЯ ПОРТОВОГО ТЕРМИНАЛА НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ЗАПАСОВ

В статье предложен метод оценки экономической целесообразности создания или реконструкции портового терминала, основанный на теории массового обслуживания и теории запасов. Портовый терминал при этом рассматривается как некоторая многоканальная обслуживающая система, в которую поступает пуассоновский поток судов для выгрузки однородного груза. Выгружаемый с постоянной интенсивностью груз поступает на склад, откуда он вывозится наземным видом транспорта с постоянной интенсивностью. Для случая установившегося режима работы терминала выведена формула для срока окупаемости проекта при заданных инвестициях. Детально рассмотрены случаи одного и двух причалов, для которых выведена формула для среднего уровня запаса груза на складе. Выведены необходимые условия существования установившегося режима работы терминала. Предложенный в статье подход применим для решения аналогичной задачи в случае других типов перегрузочных комплексов.

Ключевые слова: портовый терминал, поток судов, выгрузка груза, склад, срок окупаемости.

У статті запропонований метод оцінки економічної доцільності створення або реконструкції портового терміналу, заснований на теорії масового обслуговування і теорії запасів. Портовий термінал при цьому розглядається як деяка багатоканальна обслуговуюча система, в яку поступає пуассоновський потік суден для вивантаження однорідного вантажу.

Вивантажуваний з постійною інтенсивністю вантаж поступає на склад, звідки він вивозиться наземним видом транс-

порту з постійною інтенсивністю. Для випадку встановленого режиму роботи терміналу, виведена формула для терміну окупності проекту при заданих інвестиціях. Детально розглянуті випадки одного і двох причалів, для яких виведена формула для середнього рівня запасу вантажу на складі. Виведені необхідні умови існування режиму роботи терміналу, що встановився. Запропонований в статті підхід застосовний для вирішення аналогічного завдання у разі інших типів перевантажувальних комплексів.

Ключові слова: портовий термінал, потік суден, вивантаження вантажу, склад, період окупності.

The article describes the method of economical substantiation of port's terminal creation or reconstruction, based on the queueing theory and storage theory. A port terminal is described as a multi-channel queueing system with the Poisson input of ships arriving the port for unloading of uniform cargo. Cargo is unloading with constant rate and comes at the warehouse, from where it is taken out by the surface type of transport with constant rate.

Description of functioning of the port terminal in the terms of these theories gives foundation to solve scientifically the following important tasks, such as:

1) to estimate quantitatively some indicators that characterize the efficiency of the service of vehicles (their average queue length to the docks, the level of use of different types of production capacities of the port, the average waiting time of transport, the beginning of treatment and time of loading / unloading;

2) to estimate the costs and the economic results of the activity of the port operator for a certain period.

A solution of these two problems should be made coordinated, because the value of economic indicators is directly dependent on the indicators, which are reflecting the efficiency of operation of the terminal.

For the case of the steady-state regime of terminal functioning a formula was derived for the term of recoupment of project at the specified investments. The cases of one and two berths are considered in details for that a formula for the mean storage level at the warehouse was derived. The necessary condition of existence of the steady-state regime of terminal functioning was derived. Proposed in the article approach may be used for the decision of analogical task in case of other types of points of transshipment.

Keywords: point of transshipment, the Poisson flow of ships, multi-channel, queueing system, surface transport, warehouse, steady-state regime, storage level.

Постановка проблемы. Главная функция морских портов при организации обработки судов состоит в максимальном сокращении времени грузовых и вспомогательных операций. Одним из главных условий организации обработки судов в оптимальном режиме является максимальное совмещение этих операций. Порты обязаны обеспечить высокое качество проведения работ по обработке судна, используя всевозможные способы, а сокращение времени обработки судна позволяет повысить его провозную способность, то есть увеличить грузопоток. Сократить время обслуживания судна можно с помощью привлечения дополнительной перегрузочной техники, т.е. создания (реконструкция) портового терминала.

Обзор последних исследований и публикаций. Хорошо известно [1; 2], что при технико-экономическом обосновании создания или реконструкции портовых терминалов (портовых перегрузочных комплексов) широко используются методы таких теорий, как теория массового обслуживания и теория запасов. Чтобы одновременно решить техническую и экономическую задачи необходимо исходить из некоторой целевой функции, в качестве которой, выбирается максимальное значение чистого денежного потока, получаемого от эксплуатации проектируемого терминала в перспективе [3]. Данный подход детально описан в публикации [4].

Постановка задачи. Описание функционирования портового терминала в терминах указанных теорий позволяет научно обоснованно решить практически важные задачи, как например:

а) оценить количественно ряд показателей, характеризующих эффективность обслуживания транспортных средств (их средние длины очередей к причалам, степень использования разных видов производственных мощностей порта, средние времена ожидания транспорта, начала обработки и время их погрузки/выгрузки и др.);

б) оценить затраты и экономические результаты деятельности портового оператора за определенный период.

Отметим, что решение этих двух задач должно производиться согласовано, поскольку значение экономических показателей непосредственно зависит от показателей, отражающих эффективность эксплуатации терминала. Последние же зависят от технико-эксплуатационных параметров терминала: длины причального фронта, глубин причалов, интенсивности производства погрузочно-разгрузочных работ, вместимости складов, пропускной способности припортовой железнодорожной станции и др. Перечисленные параметры являются управляемыми переменными и должны определяться исходя из минимального или максимального значения некоторой целевой функции. В качестве последней, в практике технологического проектирования портов, в настоящее время, выбирается максимальное значение чистого денежного потока (Net Present Value – NPV), получаемого от эксплуатации проектируемого терминала в перспективе [3].

Основной материал исследования. Целью работы является построение методики экономического обоснования создания (развития) портового терминала в терминах указанных выше теорий, а также с учетом метода NPV.

Будем считать, что терминал состоит из n взаимозаменяемых причалов для выгрузки однородного груза из судов. По-

ток судов с грузом будем описывать математической моделью процесса Пуассона с интенсивностью λ .

Это означает, что вероятность прибытия на терминал k судов в интервале времени $(0, t)$ равна

$$p_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, k=0,1,2,\dots$$

Альтернативным определением пуассоновского потока событий является следующее [1; 2]: в таком потоке интервалы времени между соседними прибытиями судов – взаимно независимые случайные величины, распределенные по показательному закону с одним и тем же параметром λ . Если обозначить через τ длину произвольного интервала между соседними судозаходами, то вышесказанное означает, что

$$P\{\tau \leq t\} = 1 - e^{-\lambda t}, t \geq 0.$$

Допущение о пуассоновском потоке судов в порте оправдано следующими соображениями:

а) многочисленными статистическими проверками реальных потоков судов, пребывающих в крупные морские порты разных стран мира [1; 4];

б) пуассоновский поток создает самый неблагоприятный режим для работы системы массового обслуживания, поскольку является моделью совершенно случайного, т.е. слабо предсказуемого случайного потока: иными словами, используя эту модель, мы создаем определенный резерв пропускной способности каналов обслуживания (т.е. терминала) на случай неравномерного прибытия судов.

Чистые грузоподъемности судов $\gamma_1, \gamma_2, \dots$ также считаем взаимно независимыми случайными величинами, подчиненными одному и тому же закону распределения $G(x)$.

Весь выгружаемый из произвольного судна груз с интенсивностью W поступает на склад, вместимость которого будем, для простоты, считать достаточно большой (т.е. будем пренебрегать возможностью дополнительного простоя суда под выгрузкой из-за отсутствия свободной складской вместимости). Из склада груз вывозится равномерно с постоянной интенсивностью $U < Wn$ (например, железнодорожным транспортом).

В силу сделанных допущений время выгрузки любого судна есть случайная величина с функцией распределения

$$B(t) = P\{\gamma_1 / W \leq t\} = G(Wt).$$

Число мест для ожидания судов в очереди считается неограниченным. Таким образом процессы поступления и выгрузки (обслуживания) судов образуют n -канальную систему массового обслуживания типа $M/G/n$ с ожиданием.

Из теории массового обслуживания известно [1; 2], что такого рода система исследована аналитическими методами только некоторых частных случаях, а именно:

а) $n = 1$, т.е. в случае одного канала обслуживания;

б) $G(x) = 1 - e^{-x/g}, x \geq 0$,

где g – средняя загрузка судна (в этом случае $B(t) = 1 - e^{-\mu t}, t \geq 0$, где $1/\mu$ – средняя длительность выгрузки судна, $\mu = W/g$);

в) $G(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \geq g \\ 0, & \text{если } 0 < x < g \end{cases}$,

т.е. в случае постоянной чистой грузоподъемности всех судов, равной g .

В дальнейшем мы будем использовать известные результаты для системы $M/G/n$, относящиеся только к случаям а) и б).

Согласно сделанным выше предложениям мы фактически пришли к необходимости изучения даже более общей, чем обслуживающей системы $M/G/n$, а именно двухфазной, которой являются причалы вместе с судами (под обработкой и в очереди), а второй – склад для хранения груза (см. рисунок).

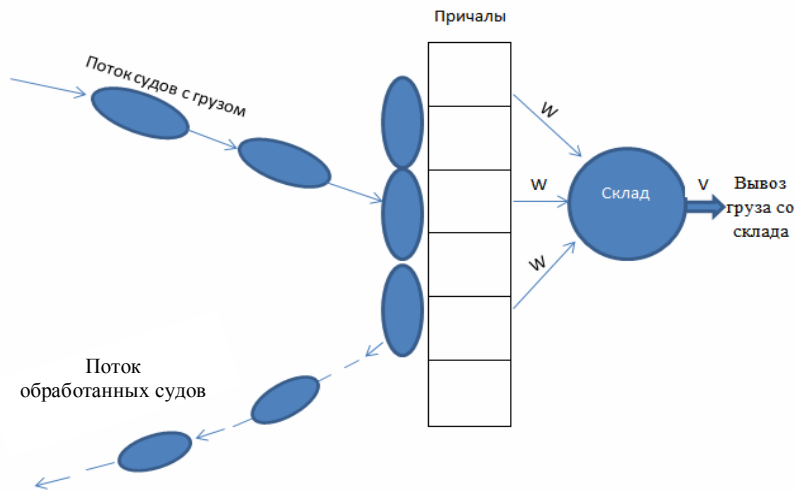


Рис. Схема двуфазной
транспортно-складской обслуживающей системы

Будем рассматривать работу описанной транспортно-складской системы в установившемся (или статистически равновесном) режиме. Это означает, что в таком режиме средние числа поступивших и обработанных в единицу времени судов совпадают между собой, а также среднее количество груза, поступающего в единицу времени на склад, равно среднему количеству вывозимого со склада груза в единицу времени. Отметим, что время вхождения реальных технических и производственных систем в установившийся режим обычно очень мало по сравнению со сроком окупаемости объекта.

Обозначим через $Q(t)$ количество груза, находящегося на складе в момент времени t . В [4] показано, что предельное распределение случайного процесса $Q(t)$ существует при условии

$$\lambda g_1 < U, g_1 = \int_0^{\infty} x dG(x) < \infty.$$

При этом предельное среднее значение количества груза на складе (т.е. математическое ожидание) определяется по следующим формулам [2]:

а) $n = 1$, $G(x)$ – произвольная функция распределения –

$$MQ = \frac{\lambda g_2}{2} \left(\frac{1}{U - \lambda g_1} - \frac{1}{W - \lambda g_1} \right), \quad (1)$$

где $g_2 = \int_0^{\infty} x^2 dG(x)$;

б) $n = 2$, $G(x) = 1 - e^{-x/g}$ – если $U \leq W$ (2)

$$MQ = g\rho \left[\frac{1}{1-\rho} - \frac{\beta}{1-(\frac{\rho\beta}{2})^2} \right],$$

если $W < U < 2W$, (3)

$$MQ = g\rho \left[\frac{1}{1-\rho} - \frac{\beta}{1-(\frac{\rho\beta}{2})^2} \right] + \frac{g}{1-z_0},$$

где $\rho = \frac{\lambda g}{U} < 1, \beta = U/W; z_0$ – единственный отрицательный корень кубического уравнения

$$z^3 + \frac{\rho+2-\beta}{\rho(\beta-1)} z^2 - \frac{z}{\rho(\beta-1)} - \frac{1}{\rho^2(\beta-1)} = 0.$$

Оценим теперь среднее значение финансового результата от эксплуатации портового терминала. Для этого введем ряд обозначений:

$\Pi(t)$ – размер прибыли портового оператора от эксплуатации терминала в момент времени t ;

$D(t)$ – суммарный доход, получаемый в интервале времени $(0, t]$ за выполнение погрузочно-разгрузочных операций и за хранение груза, причем

$$D(t) = a_1 \sum_{i=1}^{\omega(t)} \gamma_i + a_2 U \int_0^t I(Q(\tau) > 0) d\tau + d_{xp} \int_0^t Q(\tau) d\tau, \quad (4)$$

где a_1 – тарифная ставка за выгрузку 1 т груза из судна на склад;

a_2 – тарифная ставка за отгрузку 1 т груза со склада;

$w(t)$ – число обработанных судов, за выгрузку которых в интервале времени $(0, t]$ судовладельцем (фрахтователем), была перечислена оплата на расчетный счет оператора;

$I(A)$ – индикатор события A , т.е. $I(A) = 1$, если событие A наступает, $I(A) = 0$ в противном случае;

$R(t)$ – суммарные расходы в интервале $(0, t]$, связанные с эксплуатацией терминала, причем

$$R(t) = rt + r_{xp} \int_0^t Q(\tau) d\tau, \quad (5)$$

где r – постоянные суточные эксплуатационные расходы по терминалу;

r_{xp} – суточные расходы по хранению 1 т груза на складе.

С учетом принятых обозначений и формул (4), (5) можно записать

$$\Pi(t) = \Pi(0) + (D(t) - R(t))(1 - f) = \Pi(0) + [a_1 \sum_{i=1}^{\omega(t)} \gamma_i + a_2 U \int_0^t I(Q(\tau) > 0) d\tau + p_{xp} \int_0^t Q(\tau) d\tau - rt](1 - f), t \geq 0, \quad (6)$$

где $p_{xp} = d_{xp} - r_{xp}$;

f – ставка налога на прибыль.

Отметим, что поскольку $\Pi(t)$ является случайным процессом, то его можно считать процессом финансового риска

портового оператора. Под риском здесь понимается возможность принятия $\Pi(t)$, например, отрицательных значений.

Математическое ожидание величины $\Pi(t)$ равно

$$\begin{aligned} \text{МП}(t) = \text{МП}(0) + [a_1 M\omega(t)g + a_2 U \int_0^t P\{Q(\tau) > 0\} d\tau + \\ + p_{xp} \int_0^t MQ(\tau) d\tau - rt](1 - f), t \geq 0, \end{aligned}$$

а его производная –

$$(MQ(t))' = [a_1 g(M\omega(t))' + a_2 U P\{Q(t) > 0\} + p_{xp} MQ(t) - r](1 - f). \quad (7)$$

Поскольку наша двухфазная транспортно-складская система работает в установившемся режиме, то $[1; 4]$

$$M\omega(t) = \lambda t,$$

$$P\{Q(t) > 0\} = \lambda g / U, \text{ при } n = 1,$$

$$P\{Q(t) > 0\} = \lambda g / U, \text{ при } n = 2, U \leq W, \quad (8)$$

$$P\{Q(t) > 0\} = \frac{\lambda g}{U} - \frac{1 - \rho}{(\beta - 1)(1 - z_0)}, \text{ при } n = 2, W < U < 2W.$$

Поэтому, с учетом ставки дисконта δ , из (7), (8) найдем среднее значение прибыли для периода окупаемости T

$$\int_0^T e^{-\delta t} (MQ(t))' dt = \frac{1 - e^{-\delta T}}{\delta} [\lambda g(a_1 + a_2) + p_{xp} MQ - r](1 - f), \quad (9)$$

для $n = 1$ или $n = 2, U \leq W$

$$\int_0^T e^{-\delta t} (MQ(t))' dt = \frac{1 - e^{-\delta T}}{\delta} [\lambda g(a_1 + a_2) + p_{xp} MQ - r - \quad (10)$$

$$- a_1 \frac{1 - \rho}{(\beta - 1)(1 - z_0)}](1 - f), \text{ для } n = 2, W < U < 2W.$$

В формулах (9), (10) выражение для MQ определяется по формулам (1), (2) и (3).

Проект создания (или реконструкции) терминала окупится в среднем за период T , если правые части равенств (9), (10) будут равны стоимости проекта терминала I_0 . Следовательно,

ожидаемый срок окупаемости составит

$$T = -\frac{1}{\delta} \ln \left\{ 1 - \frac{I_0 \delta}{[\lambda g_1(a_1 + a_2) + p_{xp} MQ - r](1-f)} \right\},$$

если $n = 1$ или $n = 2$, $U < W$, (11)

$$T = -\frac{1}{\delta} \ln \left\{ 1 - \frac{I_0 \delta}{[\lambda g_1(a_1 + a_2) + p_{xp} MQ - r - a_1 \frac{1-\rho}{(\beta-1)(1-z_0)}](1-f)} \right\},$$

если $n = 2$, $W < U < 2W$. (12)

Отметим, что формулы (11), (12) имеют смысл только при выполнении условия

$$I_0 \delta < (1-f)[\lambda g(a_1 + a_2) + p_{xp} MQ - r - a_1 \frac{1-\rho}{(\beta-1)(1-z_0)}].$$

Рассмотрим числовой пример, иллюстрирующий приведенную выше методику для случая $n = 1$. Примем следующие значения исходных данных, входящих в правую часть формулы (11)

$$\begin{aligned} \lambda &= 0,1 \text{ суд./сут.}; \quad g_1 = 15 \text{ тыс.т}; \\ g_2 &= 225 \text{ тыс.т}^2; \quad U = 3 \text{ тыс.т/сут.}; \\ a_1 &= a_2 = 10 \text{ ден. ед./т}; \\ p_{xp} &= 0,05 \text{ ден. ед./сут.}; \quad f = 0,25; \\ r &= 5 \text{ тыс. ден. ед./сут.}; \quad \delta = 0,15 \text{ 1/год}; \\ I_0 &= 25 \text{ млн. ден. ед.} \end{aligned}$$

Согласно этим исходным данным годовой грузооборот терминала равен

$$365 \lambda g_1 = 547,5 \text{ тыс. т.}$$

При этом среднее количество хранящегося на складе груза, согласно формуле (1), составит

$$MQ = \frac{0,1 \cdot 225}{2} \left(\frac{1}{3-1,5} - \frac{1}{4-1,5} \right) = 3 \text{ тыс.т}$$

Формула (11) дает следующие значения для ожидаемого срока окупаемости

$$T = -\frac{1}{0,15} \ln \left\{ 1 - \frac{0,15 \cdot 25000}{[1,5 \cdot 20 + 0,05 \cdot 3 - 5](1-0,25) \cdot 365} \right\} = 5,24 \text{ года.}$$

Аналогично можно рассчитать ожидаемый срок окупаемости для случая $n = 2$.

Вывод. Таким образом, применяя теорию массового обслуживания и теорию запасов, научно было обосновано создание (развитие) портового терминала, при этом также учитывалось значение чистого денежного потока получаемого от эксплуатации проектируемого объекта. Были решены основные экономические задачи, отражающие эффективность его эксплуатации. Также была приведена численная иллюстрация, в которой были рассчитаны такие основные показатели как годовой грузооборот, количество хранящегося груза и ожидаемый срок окупаемости проекта.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Воевудский Е.Н. Стохастические модели в проектировании и управлении деятельностью портов / Е.Н. Воевудский, М.Я. Постан. – М.: Транспорт, 1987. – 318 с.

2. *Постан М.Я. Экономико-математические модели смешанных перевозок. – Одесса: Астропринт, 2006. – 376 с.*
3. *Лапкин И.А. Управление проектами: Текст лекций. – Одесса: ОНМУ, 2002. – 131с.*
4. *Постан М.Я. Об одном методическом подходе к экономическому обоснованию создания портового терминала // Логистика: проблемы и решения. – 2009. – № 6. – С. 56-60.*

REFERENCES

1. *Voevudskij E.N. Stohasticheskie modeli v proektirovanii i upravlenii dejatel'nost'ju portov / E.N. Voevudskij, M.Ya. Postan. –M.: Transport, 1987. – 318 s. [in Russian].*
2. *Postan M.Ya. Ekonomiko-matematicheskie modeli smeshannyh perevozok. – Odessa: Astroprint, 2006. – 376 p. [in Russian].*
3. *Lapkina I.A. Upravlenie proektami: Teksty lektzij. – Odessa: ONMU, 2002. – 131p. [in Russian].*
4. *Postan M.Ya. Ob odnom metodicheskom podhode k ekonomicheskomu obosnovaniju sozdaniya portovogo terminala // Logistika: problemy i resheniya, 2009. – № 6. – P.56-60. [in Russian].*

Стаття надійшла до редакції 09.12.2015

Рецензенти:

доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри
«Економічна теорія та кібернетики» Одеського національного
морського університету **Г.С. Махуренко**

доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри
«Морські перевезення» Національного університету «Одеська
морська академія» **Л.Л. Ніколаєва**