

*Запропоновано підхід до побудови динамічної оптимізаційної моделі для оперативного регулювання прибуття на портовий термінал наземного виду транспорту, а також процесу перевантаження вантажу при заданному графіку прибуття на термінал суден. Підхід засновано на методах теорії управління запасами, а саме на узагальненій динамічній моделі Вагнера-Уайтіна. Розглянуто різні критерії оптимальності. Оптимізаційну задачу зведено до задачі лінійного програмування*

*Ключові слова: портовий термінал, оператор, потоки суден, вагонів, координація, оптимізація, графік подання вагонів, теорія запасів*

*Предложен подход к построению динамической оптимизационной модели для оперативного регулирования прибытия на портовый терминал наземного вида транспорта, а также процесса перегрузки груза при заданном графике прибытия на терминал судов. Подход основан на методах теории управления запасами, а именно на обобщенной динамической модели Вагнера-Уайтина. Рассмотрены разные критерии оптимальности. Оптимизационная задача свелась к задаче линейного программирования*

*Ключевые слова: портовый терминал, оператор, потоки судов, вагонов, координация, оптимизация, график подачи вагонов, теория запасов*

# РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА ПОРТОВОМ ТЕРМИНАЛЕ

Ю. Ю. Крук  
Аспирант\*

E-mail: imtp@gmail.com

М. Я. Постан

Доктор экономических наук,  
профессор, заведующий кафедрой\*

E-mail: postan@ukr.net

\*Кафедра «Менеджмент и маркетинг  
на морском транспорте»

Одесский национальный морской университет  
ул. Мечникова, 34, г. Одесса, Украина, 65029

## 1. Введение

Одной из основных проблем при организации смешанных перевозок внешнеторговых грузов, как известно, является обеспечение эффективного взаимодействия транспортных потоков смежных видов транспорта в транспортных узлах. При недостаточно четком взаимодействии может возникнуть ситуация, при которой возникает простой транспортных средств в ожидании смежного вида транспорта, из-за отсутствия груза на складе или свободной складской вместимости. Указанный простой может привести к нарушению договорных сроков доставки груза или графиков движения транспорта, что негативно влияет на качество работы транспортно-логистической цепи и конкурентные позиции оператора портового терминала. Хотя указанная проблема является классической для транспортной науки, однако в связи с использованием на транспорте идей логистики она требует своего переосмысления и дальнейшего теоретического исследования. Классические модели оптимизационных задач транспортного типа в матричной и сетевой постановках [1–4] являются статическими и поэтому

имеют ограниченную сферу применения в логистике, где существенен фактор времени. Кроме того, в логистике важную роль играет управление запасами товаров или грузов, образующимися в звеньях цепей поставок или пунктах перевалки грузов. В настоящее время исследования в области совместного моделирования и оптимизации планов взаимодействия разных видов транспорта в звеньях логистических цепей явно недостаточно, несмотря на большую распространенность такого рода процессов. Из этого следует актуальность проблемы, рассматриваемой в статье.

## 2. Анализ литературных источников и постановка проблемы исследования

Теоретическим исследованием проблемы совершенствования взаимодействия смежных видов транспорта в смешанных перевозках занимались многие ученые-транспортники, среди которых можно выделить работы [5–9]. Применение экономико-математических методов для исследования данной проблемы было начато в работах [5, 8, 9] и продолжено в [10]. В

[5, 6] для моделирования и оптимизации взаимодействия транспортных потоков использовались методы линейного программирования.

В работах [7–10] акцент исследования делался на учете неравномерности прибытия транспортных средств в пункт перевалки грузов и использовались вероятностные методы для построения и анализа соответствующей математической модели. Такой подход эффективен в основном для решения задач технологического проектирования, например, портовых перегрузочных комплексов (терминалов), поскольку при проектировании необходимо учитывать ожидаемые в перспективе условия их работы. Аналогичный подход, основанный на имитационном моделировании работы порта, предложен в работах [11, 12]. В статье [13] предложен подход к моделированию транспортной сети, в узлах которой происходит взаимодействие разных видов транспорта, который основан на методах теории графов. Однако при таком подходе затруднительно дать детальное описание технологических процессов, происходящих на портовом терминале, что снижает его практическую ценность. Качественное описание роли транспорта при формировании транспортно-логистических цепей в мультимодальных перевозках с акцентированием внимания на взаимодействии между субъектами хозяйствования рынка, т. е. грузовладельцами и перевозчиками, приведено в [14].

Что же касается оперативного управления взаимодействием транспортных потоков (например, при сменно-суточном планировании работы терминала), то результаты вышеприведенных работ здесь не могут считаться приемлемыми из-за их чрезмерной абстрактности. Например, они не позволяют описать динамику изменения уровня запаса груза на складе терминала, а также динамику колебания находящегося на терминале тоннажа транспортных средств, что важно для логистических приложений. С этой точки зрения здесь более удобными представляются методы, использующие теорию динамической оптимизации, близкую к теории управления запасами [15–17]. Последняя нашла широкое применение в логистике, где с ее помощью удается формализовать динамику пополнения и использования различных видов запасов, встречающихся в логистических системах. Следует отметить, что в направлении использования этого подхода для управления перевозками результатов пока еще относительно немного.

Близкими к рассматриваемой проблематике и в определенном смысле классическими могут считаться здесь работы по так называемой проблеме «узкого фронта», в основе которой лежит идея обработки транспортных средств в порту методом концентрации портовых ресурсов [6]. Однако теоретические результаты, полученные в этой области еще в 70-х гг. прошлого столетия, не получили своего дальнейшего развития в направлении учета динамики прибытия транспортных средств при разработке сменно-суточных планов. Учет такой динамики при построении соответствующих оптимизационных моделей позволил бы сделать процесс принятия решений диспетчерами терминала касательно распределения ресурсов и регулирования подвоза или вывоза груза наземным транспортом более гибким и эффективным.

### 3. Цель и задачи исследования

Цель данной работы состоит в построении и анализе динамической оптимизационной модели плана взаимодействия потоков транспортных средств на портовом терминале, использующей идеи теории управления запасами.

Для достижения указанной цели ставятся следующие задачи:

- формализация описания функционирования портового терминала как некоторой динамической многофазной системы управления запасами;
- определение параметров управления задачи оптимизации;
- нахождение условий, ограничивающих возможные значения этих параметров;
- определение возможных критериев оптимальности в данной модели;
- анализ возможности практической реализации оптимизационной модели.

### 4. Построение и анализ динамической модели оптимизации плана взаимодействия транспортных потоков

Предположим, что на портовый терминал груз заводится железнодорожными составами для последующей погрузки его на суда. Функционирование терминала рассматривается на горизонте планирования  $T$ . Согласно графику прибытия судов на терминал, в периоде  $t$ ,  $t=1,2,\dots,T$ , планируется прибытие судов под погрузку с суммарной чистой грузоподъемностью  $g_t$ . Груз на терминал прибывает на железнодорожных составах, из которых он выгружается на склад для хранения и последующей погрузки на суда. Введем следующие условные обозначения:  $x_t$  – количество груза, планируемого к заводу на терминал в конце периода  $t$  на железнодорожных составах;  $y_{1t}$  – количество груза, выгруженного из составов на склад в периоде  $t$ ;  $y_{2t}$  – количество груза, погруженного со склада на суда в периоде  $t$ ;  $I_t$  – количество груза, находящегося на складе в конце периода  $t$ ;  $L_{1t}$  – суммарное количество груза, находящегося на складах в ожидании выгрузки на склад, в конце периода  $t$ ;  $L_{2t}$  – суммарная чистая грузоподъемность судов, ожидающих погрузки, к концу периода  $t$ ;  $C$  – вместимость склада на терминале;  $q$  – начальное количество груза на складе.

Параметры  $x_t$ ,  $y_{1t}$ ,  $y_{2t}$  являются искомыми. Для их нахождения сформулируем оптимизационную задачу, воспользовавшись методами теории управления запасами, а именно: обобщением динамической модели оптимизации Вагнера-Уайтина управления запасами в деятельности снабженческой фирмы [15–17].

Динамика изменения количества груза на складе описывается следующим соотношением:

$$I_t = I_{t-1} + y_{1t} - y_{2t}, \quad t = 1, 2, \dots, T; I_0 = q. \quad (1)$$

Из (1) получаем

$$I_t = q + \sum_{i=1}^t (y_{1i} - y_{2i}), \quad t = 1, 2, \dots, T. \quad (2)$$

Динамика переменных  $L_{1t}$  и  $L_{2t}$  аналогичным образом описывается следующими соотношениями:

$$L_{1t} = L_{1,t-1} + x_t - y_{1t}, t = 1, 2, \dots, T;$$

$$L_{2t} = L_{2,t-1} + g_t - y_{2t}, t = 1, 2, \dots, T.$$

Отсюда находим

$$L_{1t} = q_1 + \sum_{i=1}^t (x_i - y_{1i}),$$

$$L_{2t} = q_2 + \sum_{i=1}^t (g_i - y_{2i}), t = 1, 2, \dots, T, \tag{3}$$

где  $L_{10} = q_1, L_{20} = q_2$ .

Поскольку для любого  $t$  должно соблюдаться условие  $I_t \leq C$ , то с учетом (2) имеем

$$\sum_{i=1}^t (y_{1i} - y_{2i}) \leq C - q, t = 1, 2, \dots, T. \tag{4}$$

С другой стороны, в периоде  $t$  не может быть погружено груза на суда со склада больше, чем его количество на складе в конце предыдущего периода, т. е.

$$y_{2t} \leq I_{t-1}, t = 1, 2, \dots, T,$$

или с учетом (2)

$$q + \sum_{i=1}^{t-1} y_{1i} \leq \sum_{i=1}^t y_{2i}, t = 1, 2, \dots, T. \tag{5}$$

Далее, аналогично, должны выполняться условия

$$y_{1t} \leq L_{1,t-1}, y_{2t} \leq L_{2,t-1}, t = 1, 2, \dots, T.$$

С учетом соотношений (3) отсюда следуют такие неравенства:

$$\sum_{i=1}^t y_{1i} \leq q_1 + \sum_{i=1}^{t-1} x_i,$$

$$\sum_{i=1}^t y_{2i} \leq q_2 + \sum_{i=1}^{t-1} g_i, t = 1, 2, \dots, T, \tag{6}$$

На параметры управления  $x_t, y_{1t}, y_{2t}$  следует также наложить условие неотрицательности:

$$x_t, y_{1t}, y_{2t} \geq 0, \forall t. \tag{7}$$

Отметим, что из ограничений (5) и (6) следует, что для их непротиворечивости должно выполняться условие  $q \leq q_2$ .

При решении различных задач по координации взаимодействия транспортных потоков в транспортных узлах обычно задают условия такой координации в той или иной форме. При допущениях и обозначениях, принятых выше, одним из указанных условий может быть, например, такое:

$$q_1 + \sum_{i=1}^T x_i = q_2 + \sum_{i=1}^T g_i. \tag{8}$$

Условие (8) отражает наличие баланса завезенного на терминал и вывезенного из него груза на горизонте планирования (с учетом начальных значений для груза в вагонах и чистых грузоподъемностей судов). Оно основано на предположении, что известны точные значения величин  $g_t$ , что не всегда имеет место. Чаще указанные величины являются приближенными, ожидаемыми оценками реальных значений чистых грузоподъемностей судов. В такой ситуации, если  $g_t$  считать случайными величинами с известными законами распределения, то равенство (8) можно заменить следующим менее жестким условием:

$$M[\sum_{t=1}^T (x_t - g_t) + q_1 - q_2] \rightarrow \min,$$

где  $M$  – символ математического ожидания.

Следует также отметить, что сформулированная задача оптимизации основана на предположении, что пропускная способность терминала определяется только конечностью вместимости склада. Иными словами, предполагается, что на терминале имеется такое количество средств механизации и докеров-механизаторов, которое достаточно, чтобы обеспечить выгрузку груза из вагонов и погрузку его на прибывающие в плановом периоде суда без дополнительных простоев в ожидании освобождения фронтов погрузки-выгрузки.

В качестве целевой функции рассматриваемой задачи возьмем суммарную прибыль портового оператора на горизонте планирования. Запишем явное выражение для этой прибыли, введя предварительно следующие условные обозначения:  $a_{1t}$  – ставка оплаты за выгрузку 1 т груза из вагонов на склад в периоде  $t$ ;  $a_{2t}$  – ставка оплаты за погрузку 1 т груза со склада на судно в периоде  $t$ ;  $c_t$  – стоимость хранения 1 т груза на складе терминала в периоде  $t$ ;  $e_{1t}$  – эксплуатационные расходы оператора при выгрузке 1 т груза из вагонов на склад в периоде  $t$ ;  $e_{2t}$  – эксплуатационные расходы оператора при погрузке 1 т груза со склада на судно;  $d_{1t}$  – стоимость простоя 1 т грузоподъемности железнодорожного состава в периоде  $t$ ;  $d_{2t}$  – стоимость простоя 1 т чистой грузоподъемности судна в периоде  $t$ .

В принятых обозначениях полная прибыль оператора на горизонте планирования составит ((2)):

$$P_o = \sum_{t=1}^T (p_{1t}y_{1t} + p_{2t}y_{2t} - c_t I_t) = \sum_{t=1}^T \{p_{1t}y_{1t} + p_{2t}y_{2t} - c_t [q + \sum_{i=1}^t (y_{1i} - y_{2i})]\}, \tag{9}$$

где  $p_{1t} = a_{1t} - e_{1t}; p_{2t} = a_{2t} - e_{2t}$ .

Таким образом, мы пришли к следующей задаче линейного программирования: минимизировать функцию (9) при условиях (4)–(8).

Поскольку портовый терминал представляет собой одно из звеньев транспортно-логистической цепи, то с логистической точки зрения представляет интерес оценка всех затрат, включая не только затраты оператора терминала, но и железной дороги и фрахтователя за простой транспортных средств. Эти затраты определяются следующими выражениями ((2), (3)):

$$C = \sum_{t=1}^T (e_{1t}y_{1t} + e_{2t}y_{2t} + c_t I_t + d_{1t}L_{1t} + d_{2t}L_{2t}) =$$

$$= \sum_{t=1}^T \{e_{1t}y_{1t} + e_{2t}y_{2t} + c_t [q + \sum_{i=1}^t (y_{1i} - y_{2i})] +$$

$$+ d_{1t} [q_1 + \sum_{i=1}^t (x_i - y_{1i})] + d_{2t} [q_2 + \sum_{i=1}^t (g_i - y_{2i})]\}.$$

Таблица 2

Результаты решения задачи оптимизации плана подачи вагонов под выгрузку и перегрузки груза

Условные обозначения	$g_1=15$ тыс. т $g_2=20$ тыс. т	$g_1=15$ тыс. т $g_2=30$ тыс. т	$g_1=15$ тыс. т $g_2=40$ тыс. т	$g_1=30$ тыс. т $g_2=50$ тыс. т
$x_1$	42	52	60	75
$x_2$	0	0	2	12
$y_{11}$	0	0	0	0
$y_{21}$	5	5	5	5
$y_{12}$	50	60	68	83
$y_{22}$	18	18	18	33
max P, тыс. ден. ед.	121,52	137,37	150,05	204,05

В данном случае возникает типичная для логистического менеджмента ситуация противоречия между коммерческими интересами грузополучателя или логистического оператора (минимизация выражения (10)) и отдельного звена в виде оператора портового терминала (максимизация выражения (9)).

В принципе можно сформулировать следующую бикритериальную задачу оптимизации: найти значения переменных  $x_t, y_{1t}, y_{2t}$ , удовлетворяющих условиям (4)–(8) и условиям неотрицательности, которые бы одновременно обеспечивали максимальное значение функции (9) и минимальное значение функции (10). Эту бикритериальную задачу линейного программирования можно решить известными методами решения такого рода задач, например, методом последовательных уступок или методом свертки критериев [10].

### 5. Численный пример

Рассмотрим численный пример для приведенной выше оптимизационной задачи, ограничившись случаем  $T=2$ . В данном случае имеем 6 искомым переменных  $x_1, x_2, y_{11}, y_{12}, y_{21}, y_{22}$ . Будем варьировать только параметры  $g_1, g_2$  (т. е. чистые грузоподъемности судов), оставив неизменными значения всех остальных исходных параметров (табл. 1). При этом воспользуемся пакетом программ Microsoft Excel. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 1

Исходные данные для расчета по оптимизационной задаче

Условное обозначение	Численное значение	Условное обозначение	Численное значение
C	50 тыс. т	$c_2$	0,015 тыс. ден. ед./т-сут.
q	5 тыс. т	$P_{11}$	1,0 ден. ед./т
$q_1$	1 тыс. т	$P_{12}$	1,2 ден. ед./т
$q_2$	8 тыс. т	$P_{21}$	1,6 ден. ед./т
$c_1$	0,012 тыс. ден. ед./т-сут.	$P_{22}$	2,0 ден. ед./т

Из табл. 2 видно, что оптимизационная модель дает вполне приемлемые с практической точки зрения результаты. В частности, как и следовало ожидать, с ростом суммарной чистой грузоподъемности судов соответственно возрастают и размеры вагонных подач груза в первом периоде, а также возрастает суммарная прибыль оператора терминала.

### 6. Выводы

В результате проведенных исследований:

1. Выполнено формальное описание работы портового терминала в виде трехфазной системы управления запасами с использованием обобщенной модели Вагнера-Уайтина из теории запасов. Это дало возможность более детально учесть технологические процессы, связанные с управлением потоком груза, проходящего через терминал.

2. С помощью такого формализованного представления портового терминала определены параметры входящих транспортных потоков. Из них заданными приняты грузоподъемности судов, прибывающих под погрузку в течение планового периода (что соответствует принятой в морском бизнесе практике), а искомыми – количество груза в вагонах, подаваемых на фронт выгрузки, а также количество выгруженного и погруженного груза в каждый период времени.

3. Используя указанные параметры управления, выведены основные балансовые уравнения и неравенства, описывающие динамику их изменения и служащими ограничениями задачи оптимизации.

4. Сформулированы два основных критерия оптимальности, наиболее подходящие для приложений: максимум прибыли оператора терминала и минимум суммарных расходов, связанных с перегрузочными операциями на заданном горизонте планирования. В итоге оптимизационная задача свелась к задаче линейного программирования специального вида, которая может быть решена с помощью пакета программ Microsoft Excel.

5. Приведенный выше подход для формализации процесса взаимодействия потока судов и железнодорожных составов, основанный на использовании методов теории управления запасами, дает возможность определить оптимальную стратегию портового оператора в части согласованного плана указанного взаимодействия. Достоинством данного подхода является возможность использования принципов адаптивного управления в постоянно изменяющейся производственной ситуации, характеризующейся числом

транспортных средств, находящихся в данный момент времени на терминале, уровней их загрузки и наличием груза на складе. Критерии оптимальности отражают в равной степени интересы оператора терминала и логистического оператора, поскольку простой как судов, так и железнодорожных составов необходимо всегда минимизировать. Разработанная модель вполне может использоваться при разработке сменно-суточных планов работы терминала на основе применения стандартного прикладных программ.

В дальнейших исследованиях по данной проблеме перспективным представляется рассмотрение:

а) возможности включения в оптимизационную модель распределения имеющихся на терминале производственных ресурсов (бригад докеров-механизаторов, перегрузочной техники) между судами и вагонами под обработкой;

б) ценовой конкуренции за грузопотоки между двумя и более портовыми операторами с использованием методов теории фирмы [18].

#### Литература

1. Меламед, И. И. Методы оптимизации в транспортном процессе [Текст] / И. И. Меламед // М.: ВИНТИ. Сер. Организация управления транспортом. – 1991. – № 10. – 164 с.
2. Steadie, S. M. Multimodal freight transportation planning: a literature review [Text] / S. M. Steadie, N. Dellaert, W. Nuijten, T. Woensel, R. Raoufi // European Journal of Operational Research. – 2014. – Vol. 233, Issue 1. – P. 1–15. doi: 10.1016/j.ejor.2013.06.055
3. Nossack, J. Operational planning problems in international freight transportation. Ser. 5 “European University Studies”. Vol. 3431 [Text] / J. Nossack. – Peter Lang Intl. Academic Publishers, Berlin, 2013. – 136 p.
4. Macharis, C. Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review [Text] / C. Macharis, Y. M. Bontekoning // European Journal of Operational Research. – 2004. – Vol. 153, Issue 2. – P. 1–34. doi: 10.1016/s0377-2217(03)00161-9
5. Резер, С. М. Взаимодействие транспортных систем [Текст] / С. М. Резер. – М.: Наука, 1985. – 246 с.
6. Магамадов, А. Р. Оптимизация оперативного планирования работы порта [Текст] / А. Р. Магамадов. – М.: Транспорт, 1979. – 184 с.
7. Милославская, С. В. Мультимодальные и интермодальные перевозки [Текст] / С. В. Милославская, К. И. Плужников. – М.: РосКонсульт, 2001. – 368 с.
8. 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.
9. 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. – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1985. – С. 55–60.
10. Постан, М. Я. Экономико-математические модели смешанных перевозок [Текст] / М. Я. Постан. – Одесса: Астропринт, 2006. – 376 с.
11. 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
12. 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.
13. Мурадян, А. О. Оптимизация процесса перевалки грузов в общетранспортных узлах [Текст] / А. О. Мурадян // Вісник НТУ «ХПИ». – 2014. – № 26 (1069). – С. 64–73.
14. Белецкий, Ю. В. Анализ системы взаимодействия различных видов транспорта на основе формирования транспортно-логистических цепей при мультимодальных перевозках [Текст] / Ю. В. Белецкий, Н. В. Мирошникова, А. В. Сергиенко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2015. – № 1 (218). – С. 210–212.
15. Постан, М. Я. Динамическая модель оптимального управления запасами товаров и их доставкой в деятельности логистической фирмы [Текст] / М. Я. Постан // Логистика: проблемы и решения. – 2009. – № 2. – С. 54–58.
16. Brandimarte, P. Introduction to distribution logistics [Text] / P. Brandimarte, G. Zotteri. – J. Wiley & Sons, Inc., NY, 2007. – 587 p.
17. Morozova, I. V. Dynamic Optimization Model for Planning of Integrated Logistical System Functioning [Text] / I. V. Morozova, M. Ya. Постан, S. N. Dashkovskiy // Lecture Notes in Logistics, 2014. – P. 291–300. doi: 10.1007/978-3-642-35966-8\_24
18. Постан, М. Я. Метод нахождения равновесного решения для портовых операторов в конкурентной среде типа олигополии [Текст] / М. Я. Постан, И. В. Савельева // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – Т. 4, № 2 (18). – С. 58–63. doi: 10.15587/2312-8372.2014.26296