

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОРСКОГО КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМИНАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ¹

Лемперт А. А.^{2а}, Жарков М. Л.^{3а},
Казаков А. Л.^{4аб}, Ву Х.З.^{5б}

(^а Институт динамики систем и теории управления имени
В.М. Матросова СО РАН, Иркутск)

(^б Иркутский национальный исследовательский
технический университет, Иркутск)

Статья посвящена проблеме моделирования и прогнозирования работы морского контейнерного терминала при учете неравномерности поступления грузов и влияния случайных факторов на продолжительность их обработки. Математическое описание системы строится в виде сети массового обслуживания (СеМО), узлы которой соответствуют структурным элементам терминала. Движение заявок между узлами происходит согласно заданной маршрутной матрице. Входящие транспортные потоки, прибывающие как с моря, так и с суши, моделируются с помощью пуассоновских потоков заявок, в том числе групповых. Построенная модель идентифицируется для морского контейнерного терминала, расположенного на севере Вьетнама и являющегося одним из крупнейших в Юго-Восточной Азии. Его математическая модель состоит из 14 узлов и включает два входящих потока, один из которых является неординарным. Маршрутная матрица строится на основе статистической обработки данных из открытых источников и натурных наблюдений, которые также используются для определения параметров входящих потоков. Предлагается и программно реализуется алгоритм имитации функционирования построенной СеМО. Выполняются сценарные расчеты для анализа текущей пропускной способности системы и прогноза ее работоспособности при увеличении объемов контейнерных потоков, в частности, при поступлении в терминал сверхбольших контейнеровозов.

Ключевые слова: математическое моделирование, теория массового обслуживания, имитационное моделирование, морской транспорт.

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект №24-21-00264.

² Анна Ананьевна Лемперт, к.ф.-м.н., в.н.с. (lempert@icc.ru).

³ Максим Леонидович Жарков, к.т.н., н.с. (zharkm@mail.ru).

⁴ Александр Леонидович Казаков, д.ф.-м.н., профессор, г.н.с. (kazakov@icc.ru).

⁵ Хоанг Занг Ву, аспирант (giangtrang14022016@gmail.com).

1. Введение

В настоящее время наблюдается быстрый рост контейнерных перевозок. Ожидается, что к 2029 году их рынок в стоимостном выражении достигнет 145,70 млрд долларов, что на 22% больше, чем в 2024 году [1]. До 80% подобных перевозок осуществляется морским транспортом, движение которого подвержено влиянию погодных и прочих труднопрогнозируемых условий. Вследствие увеличения грузопотоков и неравномерности их движения возникает потребность поиска эффективных стратегий управления портами, что подразумевает решение следующих основных задач: согласование подвода грузов и назначения причалов [2, 8], оценки допустимой загрузки системы [7], формирование парка перегрузочного оборудования [5], используемого при пиковых нагрузках. Последняя считается ключевой задачей при управлении портом [5, 7].

В настоящее время для описания логистических операций в морских контейнерных терминалах с учетом действия случайных факторов применяются сети Петри [5], вероятностно-статистические [7] и сетевые модели [27], а также теория массового обслуживания (ТМО) [16], которая еще с 80-х годов прошлого века считается одним из эффективных математических инструментов для решения проблем портовой логистики [17, 20].

Одной из первых значимых работ по применению ТМО для моделирования морских контейнерных терминалов, по-видимому, является [17]. В ней рассмотрена задача определения минимального необходимого количества причальных кранов, поэтому работа всего порта моделируется укрупненно, в виде одной системы массового обслуживания (СМО). При этом типовая структура морских терминалов включает три подсистемы и два маршрута движения контейнеров, поэтому, как показали дальнейшие исследования, более адекватным инструментом в данном случае являются сети массового обслуживания (СеМО), которые представляют собой совокупность конечного числа взаимосвязанных СМО [3, 10].

Пионерскими работами по применению СеМО в области портовой логистики являются [13] и [21], в которых моделиру-

ется перегрузка контейнеров со склада на судно и оптимизируется работа козловых кранов на складе. К настоящему времени опубликовано большое число работ по данной тематике, поэтому обсудим только наиболее релевантные из них. Так, в [24, 25] моделируется работа контейнерного склада, а в [18] – процесс перегрузки контейнеров с судна на железнодорожный транспорт. Статьи [15, 28, 29] посвящены применению нестационарных СеМО для учета суточных колебаний интенсивности поступления транспорта в порт. В работах [20, 22, 23] моделируются перевозки контейнеров на внутренних тягачах между причалом и складом, а в [26] – по всей территории морского терминала с учетом того, что число таких тягачей ограничено, при этом предполагается, что часть заявок (контейнеры) поступает из внешнего источника, а другая часть (тягачи) циркулирует внутри системы.

Отметим, что во всех рассмотренных выше работах моделируются отдельные подсистемы контейнерных терминалов или рассматривается только одно направление движения контейнеров. Однако для эффективного формирования парка перегрузочного оборудования в условиях роста контейнерных перевозок необходимо комплексное моделирование работы морских терминалов с учетом всех существующих подсистем, использования разных видов транспорта и наличия двух направлений движения материальных потоков внутри системы. Настоящее исследование посвящено решению этой актуальной проблемы.

У авторов есть опыт моделирования транспортных систем, имеющих в своем составе разные виды транспорта и подверженных влиянию случайных факторов. Так, в [6, 12] предложен подход к изучению работы наземных систем, базирующийся на использовании СеМО с несколькими неординарными потоками заявок, на основе которого построены модели мультимодального пересадочного узла [30], железнодорожной станции [11] и участков железнодорожной сети [4, 19]. В данном исследовании этот подход совершенствуется и применяется для сценарного анализа и прогнозирования работы принципиально нового объекта транспорта – морского контейнерного терминала.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 дано описание объекта исследования. В разделе 3 представлены ис-

пользованный математический аппарат и модель морского терминала в виде СеМО. В разделе 4 описаны алгоритм имитационного моделирования ее функционирования и его программная реализация, с помощью которой в разделе 5 выполнен вычислительный эксперимент. На основе результатов расчетов дана оценка текущей пропускной способности системы и построен прогноз ее работы в будущем.

2. Описание объекта исследования

Морской контейнерный терминал – комплекс, специализирующийся на временном хранении, обработке и перевалке контейнеров. Соответственно, он имеет две основные задачи: обеспечение эффективной погрузки/разгрузки транспорта; сглаживание несоответствия между поступлением и отправлением контейнеров.

Крупные морские терминалы подразделяются на порты-хабы и узловые порты. Первые предназначены для перевалки грузов между магистральными и фидерными судами для дальнейшей перевозки. В узловых портах (гейтвеях) стыкуются магистральные морские и внутренние водные маршруты, а также сухопутный транспорт. Типовая их схема включает три основные подсистемы: грузовой фронт для наземного транспорта; контейнерную площадку; причал с береговыми кранами. Контейнеры движутся в двух направлениях: судно – контейнерная площадка – наземный транспорт и обратно.

В данной работе мы рассмотрим Международный контейнерный терминал Хайфон (далее Терминал), который является узловым глубоководным морским портом и имеет типовую структуру. Он расположен в северном экономическом регионе Вьетнама, обслуживает 17 регулярных международных маршрутов. Главные направления: США (7), Китай (5) и Индия (3). По числу перегружаемых контейнеров в год Терминал занимает первое место в северной части Вьетнама и четвертое место среди всех систем страны. Общий вид Терминала и карта-схема ее расположения представлены на рис. 1.

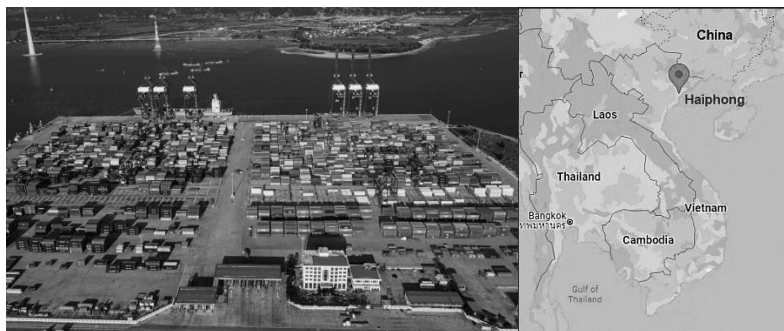


Рис. 1. Общий вид Терминала

2.1. КОНТЕЙНЕРНЫЕ ПОТОКИ

Терминал обрабатывает рефрижераторные, груженные и порожние контейнеры двух типов: 20-футовые и 40-футовые, которые прибывают на автомобильном и водном видах транспорта. Общепринятой единицей измерения их количества является TEU (twenty-foot equivalent unit), что соответствует одному 20-футовому контейнеру. В таблице 1 представлены статистические данные о количестве обработанных контейнеров в 2018–2023 гг., полученные из открытых источников (см. <https://hict.net.vn/thu-vien/Pages/thu-vien.aspx>).

Таблица 1. Количество обработанных контейнеров

Год	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Тыс. TEU	65	419	662	697	1181	1273
Прирост	—	545%	58%	5%	70%	7,8%

В среднем в Терминал поступает 10,3 контейнеровозов в неделю, вмещающих от 950 до 13000 TEU, при этом средний размер партии контейнеров составляет 1280 TEU. Контейнеры также прибывают в Терминал на внешних тягачах с интенсивностью 872 тягача в сутки. Два указанных транспортных потока независимы и обрабатываются в отдельных подсистемах.

2.2. СТРУКТУРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТЕРМИНАЛА

В Терминале имеются 9 основных структурных элементов, которые представлены на рис. 2.



Рис. 2. Функциональная схема

Целью моделирования является оценка пропускной способности объекта, поэтому опишем только те элементы, которые непосредственно участвуют в перевалке контейнеров.

Причалная зона (№ 1) включает два причала, на которых установлено по три береговых крана (№ 2). Средняя скорость погрузки/разгрузки каждого из них равна 30 контейнеров в час.

Контейнерная площадка (склад – № 3) вмещает 20160 TEU. На ней работают 24 козловых крана и два ричстакера, каждый из которых перегружает в среднем 50 контейнеров за час.

На пропускном пункте (ворота – № 8) действуют 9 въездных и 5 выездных полос, каждая из которых обслуживает в среднем 80 тягачей за час. Также перед воротами в терминал со стороны дороги имеется площадка, вмещающая до 9 тягачей.

Перевозка контейнеров между причалами и складом осуществляется с помощью 30 внутренних тягачей. Среднее время движения каждого составляет 5 минут, вместимость – 2 TEU. Перевозка контейнеров между воротами и складом выполняется внешними тягачами. На основе анализа спутниковых снимков установлено, что одновременно на территории может находиться

ся до 52 автомобилей. Их среднее время движения от ворот к складу составляет 4 минуты.

При описании Терминала необходимо также выделить якорную стоянку, которая находится в 34 км в Южно-Китайском море, так как именно там суда ожидают разрешения на швартовку. Время движения от стоянки до Терминала с учетом швартовки в среднем составляет 2,3 часа.

Таким образом, в Терминале имеется три крупные зоны: причальная зона, контейнерная площадка и ворота, а также якорная стоянка. Контейнеры доставляются двумя видами транспорта, которые независимы и обслуживаются в различных подсистемах.

3. Математическая модель

В данном разделе приводится структура модели морского контейнерного терминала и математический аппарат теории СеМО, необходимый для ее построения. Затем модель идентифицируется для выбранного транспортного объекта.

3.1. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ И СТРУКТУРНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ

Математическая модель работы морского контейнерного терминала строится в виде открытой сети массового обслуживания в два этапа. На первом описываются входящие потоки контейнеров, на втором – процесс их обслуживания в подсистемах и маршруты движения отдельных контейнеров внутри системы.

Первый этап. При описании технических систем с помощью ТМО моделью прибывающего материального потока является поток заявок, поступающих из внешнего мира и требующих обслуживания [3].

Для описания поступления внешних тягачей и контейнеровозов предлагается использовать простейшие потоки [23, 26], поскольку данные транспортные средства движутся независимо друг от друга (ординарность и отсутствие последствий), и на больших промежутках времени неравномерностью потоков можно пренебречь (стационарность). Как правило, тягачи привозят один контейнер за раз, поэтому порождаемый ими поток

контейнеров также является простейшим. Суда перевозят контейнеры партиями, поэтому здесь поток поступающих контейнеров моделируется неординарным пуассоновским потоком [16, 25]. Для идентификации параметров входящих потоков заявок используются результаты анализа статистических данных.

Второй этап. СеМО состоит из конечного множества S , содержащего $s \in \mathbb{N}$, $s \geq 2$, узлов [3, 10]. Узел $y \in S$ – система массового обслуживания, включающая $1 \leq n_y < \infty$ однородных каналов и $0 \leq m_y < \infty$ мест в очереди [3]. В узел поступает входящий поток заявок A_y . Время их обслуживания в каналах является случайной величиной с законом распределения B_y . В открытой системе внешний источник, как правило, считается дополнительным (фиктивным) узлом.

Прибывшие в морской терминал контейнеры проходят несколько этапов обработки в структурных элементах системы. Они выполняют различные функции, в частности разгрузку, погрузку, перевозку и хранение контейнеров. Тем не менее эти элементы имеют общие признаки: наличие технических устройств, обрабатывающих поток контейнеров, регулярное повторение однотипных операций, недетерминированное время их выполнения, наличие очереди перед устройствами. Можно видеть, что эти признаки удовлетворяют требованиям однофазной СМО, а так как элементы терминала взаимосвязаны, то они соответствуют узлам СеМО. Контейнерные потоки с суши и моря прибывают в разные подсистемы морского контейнерного терминала, поэтому в структуре СеМО будут присутствовать два и более фиктивных узла. Число узлов СеМО и фиктивных узлов, а также их параметры определяются на основе натурного обследования конкретного объекта.

С помощью символики Кендалла – Башарина [3, 4] узел представляется в следующем виде:

(1) $A_y / B_y / n_y / m_y$.

В данной нотации для указания конкретных потоков используются следующие обозначения: M – стационарный пуассоновский поток заявок, G – произвольный стационарный поток; $*$ – закон распределения промежутков времени между последовательным поступлением двух заявок неизвестен. Для неординар-

ных потоков применяются обозначения M^X и G^X , где X – закон распределения числа заявок в поступающей группе.

При групповом поступлении заявок используются различные дисциплины их принятия в узлы. Наиболее часто при описании транспортных систем [16, 19] применяется дисциплина «полный отказ»: если не хватает места хотя бы для одной заявки из группы, то теряется вся группа заявок. Для рассматриваемого объекта эта дисциплина означает, что суда и тягачи, получив отказ, уходят на внешнюю стоянку и ожидают там освобождения достаточного места в системе. Затем они вновь поступают в нее и рассматриваются как новая группа заявок на обслуживание.

Также необходимо определить дисциплину обслуживания очереди (при наличии) – алгоритма постановки в очередь при поступлении новых заявок и сдвигов при изменении числа заявок, а также предоставления обслуживания. Для большинства транспортных систем естественной является FIFO (First In, First Out), которая заключается в том, что из очереди выбирается заявка с наибольшим временем ожидания [10].

Маршрут движения заявок между узлами хранят в матрице вероятностей переходов (маршрутной матрице) P размера $(s + 1) \times (s + 1)$, элементы которой:

- $P_{y;u}$, $y, u \in S$ – вероятность того, что после завершения обслуживания в узле y заявка перейдет в узел u ;
- $P_{0;u}$ – вероятность поступления заявки из источника в узел u , $P_{0;0} = 0$, $P_{0;u} \geq 0$;
- $P_{y;0}$ – вероятность того, что заявка покинет СеМО сразу после завершения обслуживания в узле y .

Элементы маршрутной матрицы удовлетворяют условию

$$(2) \quad \sum_{u=0}^s P_{y;u} = 1 \quad \forall y \in S.$$

В ситуации, когда свободных мест в узле y не остается, а на вход продолжают поступать заявки из других узлов, применяются блокировки работы каналов. Это означает, что заявка остается в канале предыдущего узла, временно блокируя его работу, и ожидает освобождения места в узле y .

Целью моделирования является нахождение показателей эффективности СеМО, на основе которых можно сделать вывод о качестве функционирования моделируемой транспортной системы и построить прогноз ее работы при изменении объемов транспортных потоков в будущем.

Под состоянием СМО понимается число заявок, которые находятся в ней. Поскольку СеМО состоит из множества СМО, то будем рассматривать многомерное пространство состояний $(k_1, k_2, \dots, k_s)$, где $k_y = 0, 1, \dots, N_y$ – число заявок в узле y .

Определение показателей эффективности требует вычисления стационарных вероятностей состояний СеМО. Обозначим через $\pi(k_1, k_2, \dots, k_s)$ стационарную вероятность состояния $(k_1, k_2, \dots, k_s)$, тогда вероятности $\pi_y(k)$ того, что узел y содержит ровно $k_y = k$ заявок, вычисляются как

$$(3) \quad \pi_y(k) = \sum_{\substack{k_i=0, \\ i=1,2,\dots,s, i \neq y}}^{N_i} \{ \pi(k_1, k_2, \dots, k_s) | k_y = k \}$$

$$\text{при условии нормировки} \quad \sum_{\substack{k_i=0, \\ i=1,2,\dots,s}}^{N_i} \pi(k_1, k_2, \dots, k_s) = 1.$$

На основе стационарных вероятностей (3) рассчитываются показатели эффективности [10]:

- вероятность P_L отказа в обслуживании заявки;
- среднее время T_S пребывания заявки в СеМО и отдельно $\bar{t}_y$ в узле y ;
- суммарная продолжительность блокировки каналов $\bar{b}_y$;
- среднее количество $\bar{V}_y$ заявок в узле y :

$$\bar{V}_y = \sum_{k=1}^{N_y} k \pi_y(k);$$

- среднее число $\bar{K}_y$ работающих каналов в узле y :

$$\bar{K}_y = \sum_{k=1}^{m_y-1} k \pi_y(k) + \sum_{k=m_y}^{N_y} m_y \pi_y(k);$$

- средняя длина $\bar{L}_y$ очереди в узле y :

$$\bar{L}_y = \sum_{k=m_y+1}^{N_y} (k - m_y) \pi_y(k).$$

Найти стационарные вероятности аналитическими методами возможно лишь для наиболее простых типов СеМО (см. [3, 10]). В настоящее время общепринятой практикой для определения показателей эффективности СеМО является имитационное моделирование [14, 23, 25], которое дает возможность не только построить наглядные модели функционирования сложных систем с любой степенью детализации, но и реализовать различные виды вычислительных алгоритмов для обработки и анализа данных.

3.2. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПОТОКОВ

Тягачи перевозят два 20-футовых или один 40-футовый контейнер. При этом 75% контейнеров на судах являются 40-футовыми. Примем, что *одной заявкой* на обслуживание является 40-футовый контейнер. Их типы не учитываются. Таким образом, внешний тягач считается одной заявкой, а контейнеро-воз – группой заявок (см. выше).

Контейнерный поток, прибывающий на морском транспорте, моделируется неординарным пуассоновским потоком M_1 . На основе результатов анализа статистических данных (см. <https://hict.net.vn/thu-vien/Pages/thu-vien.aspx>) установлено, что размеры групп контейнеров подчиняются дискретному равномерному закону $U(a_{\min}, a_{\max})$. Вероятность появления группы размера i определяется по формуле

$$p_i = \frac{1}{a_{\max} - a_{\min} + 1},$$

где $a_{\min}$, $a_{\max}$ соответствуют наименьшей и наибольшей наблюдаемым партиям контейнеров.

Контейнерный поток, поступающий на наземном транспорте, моделируется простейшим потоком M_2 . Параметры входящих потоков заявок представлены в таблице 2. В ней: λ_i – интенсивность поступления групп заявок в час, V_i – закон распределение их размеров, $i = 1, 2$.

Таблица 2. Модели входящих контейнерных потоков

Поток	Вид транспорта	λ_i	V_i
M_1	Контейнеровоз	0,057	$U(320; 960)$
M_2	Внешний тягач	36,32	1

3.3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ

Работа элементов Терминала моделируется 14 узлами разных типов. Для их обозначения перед порядковым номером узла ставится один из следующих символов:

- O – источник входящего поток;
- a – многоканальная СМО с отказами и групповым обслуживанием заявок,
- b – многоканальная СМО с очередью,
- c – многоканальная СМО с отказами,
- d – одноканальная СМО с изменяющейся числом мест в очереди и групповым обслуживанием заявок.

Узлы O_0 и O_{13} – фиктивные узлы, источники входящих потоков M_1 и M_2 соответственно. Узел a_1 описывает работу якорной стоянки, в котором размер обслуживаемых групп соответствует максимальному числу прибывающих контейнеров на судах, а количество каналов равно среднему числу контейнеровозов, которые прибывают в систему за неделю.

При моделировании причальной зоны предполагается, что один (первый) причал предназначен для разгрузки контейнеровозов, а второй – для загрузки. Работа первого причала представляется узлом b_2 , в котором каналы описывают работу береговых кранов, а число мест в очереди соответствует максимальному размеру прибывающих партий контейнеров. Второй причал моделируется узлом d_3 . В нем канал – само судно, а число мест Y в очереди меняется динамически и становится равной размеру следующей обслуживаемой группы заявок Y в канале. СМО с такими характеристиками согласно [9] относится к классу систем, функционирующих в случайной среде.

Работа контейнерной площадки моделируется двумя узлами c_7 и b_8 , из которых первый отвечает за погрузку контейнеров на склад, а второй – за их хранение и выгрузку. Очередь узла b_8

соответствует вместимости склада. Аналогичным образом описывается работа ворот – узлы b_{11} и c_{12} .

Далее в таблице 3 представлено формальное описание этих узлов с помощью символики Кендалла – Башарина (1); T_y – закон распределения времени обслуживания, в часах; X_y – закон распределения размера обслуживаемой группы заявок в канале узла y .

Таблица 3. Описание структурных элементов Терминала

Узел	Элемент	Модель	T_y	X_y
a_1	Якорная стоянка	$M_1/G^X/10/0$	$N(2,3; 1,67)$	960
b_2	Причал для разгружаемых судов	$*/M/3/960$	$\exp(30)$	1
d_3	Причал для загрузкиемых судов	$*/M^X/1/X$	$\exp(0,057)$	$U(420; 960)$
c_4	Береговые краны	$*/M/3/0$	$\exp(30)$	1
c_5, c_6	Внутренние тягачи	$*/M/15/0$	$\exp(12)$	1
c_7	Козловые краны / ричстакеры	$*/M/13/0$	$\exp(50)$	1
b_8	Склад	$*/M/13/20160$	$\exp(50)$	1
c_9, c_{10}	Внешние тягачи	$*/M/26/0$	$\exp(15)$	1
b_{11}	Въездные ворота	$M_2/M/9/9$	$\exp(80)$	1
c_{12}	Выездные ворота	$*/M/5/0$	$\exp(80)$	1

Здесь $N(\mu; \sigma)$ – нормальное распределение, функция плотности вероятностей которого имеет вид

$$f_{\mu, \sigma}(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}};$$

$\exp(\lambda)$ – экспоненциальный закон распределения с функцией плотности вероятностей

$$f_{\lambda}(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t}, & t \geq 0, \\ 0, & t < 0. \end{cases}$$

Маршрутная матрица P имеет следующий вид:

	O_0	a_1	b_2	d_3	c_4	c_5	c_6	c_7	b_8	c_9	c_{10}	b_{11}	c_{12}	O_{13}
O_0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
b_2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
d_3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
c_4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
c_5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
c_6	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
c_7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
b_8	0	0	0	0	0	0	0,5	0	0	0	0,5	0	0	0
c_9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
c_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
b_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
c_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
O_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Переход заявки из узла y в узел x возможен только при $p_{y,x} > 0$. Сумма элементов одной строки удовлетворяет условию нормировки (2). На рис. 3 представлена схема СеМО в виде ориентированного графа.

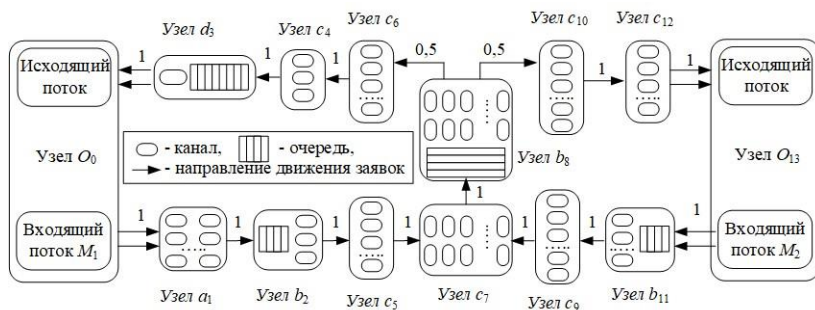


Рис. 3. Схема СеМО

Таким образом, математическая модель, описывающая работу Терминала, имеет вид СеМО с двумя входящими потоками и 14 узлами. Один входящий поток является простейшим и мо-

делирует поступление контейнеров на внешних тягачах, а второй – неординарным пуассоновским и моделирует прибытие контейнеров на судах. Узлы СеМО отличаются типом, числом каналов и вместимостью. Два из них являются фиктивными – источники потоков заявок, один – многоканальная СМО с отказами и групповым обслуживанием – отображает работу якорной стоянки, три – многоканальные с конечной очередью – функционирование причала для разгружаемых судов, склада и въездных ворот, семь – многоканальные СМО с отказами – работа причальных кранов, выездных ворот и движение внутренних и внешних тягачей внутри системы. Также имеется один узел – СМО с изменяющимся числом мест в очереди, который моделирует загрузку судна и его отправление из системы. Дисциплина принятия групп заявок – «полный отказ», дисциплина обслуживания очереди – FIFO.

4. Имитационная модель

Исследование построенной СеМО выполняется при помощи имитационной модели, которая основана на дискретно-событийном подходе к моделированию. Для ее программной реализации использовался язык программирования Object Pascal.

Пользователь задает в программе следующие параметры СеМО: количество входящих потоков и для каждого интенсивность поступления групп заявок и законы распределения их размеров; число узлов и для каждого длину очереди, число каналов, законы распределения размеров обслуживаемой группы заявок и времени их обслуживания, дисциплину принятия заявок и обслуживания очереди; маршрутную матрицу.

В программе отдельный входящий поток заявок имеет свой счетчик, который генерирует размеры групп заявок и промежутки времени между их поступлением по соответствующим параметрам. Единицей измерения модельного времени является один цикл T_c выполнения алгоритма имитации функционирования СеМО (см. рис. 4). Он обычно принимается равным одной минуте. Программа завершает работу после выполнения T_m циклов, число которых задает пользователь. Для получения ста-

ционарных показателей эффективности с точностью $\pm 0,01$ необходимо, чтобы $T_m \geq 50000$. Результаты работы программы выводятся в табличном и графическом видах и могут быть экспортированы в таблицы Excel.

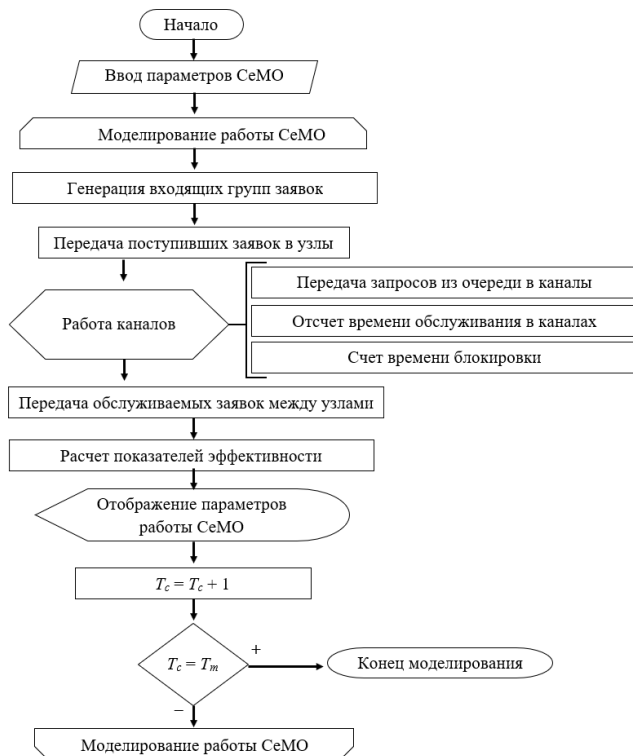


Рис. 4. Блок-схема алгоритма имитации функционирования СеМО

Алгоритм имитации функционирования СеМО имеет относительно низкую сложность, поэтому для его выполнения достаточно ресурсов персонального компьютера. Алгоритм выполняется параллельно в многопроцессорных системах. В этом случае реализующая его программа запускается отдельно на каждом процессоре. При этом для каждого процесса исполь-

зуется своя область оперативной памяти, в которую дублируются данные, внесенные пользователем.

Точность программы тестировалась на задачах трех типов с известными характеристиками: двух- и трехфазная СМО с блокировками и неординарным входящим потоком [30], открытая экспоненциальная СеМО с 6 узлами [14]. В результате сравнения расчетных показателей эффективности СМО и известных установлено, что максимальная относительная погрешность работы программы не превышает 4%. Поскольку в транспортных системах такая погрешность является вполне приемлемой, перейдем к вычислительным экспериментам.

5. Вычислительный эксперимент

С помощью программы выполнено три вычислительных эксперимента:

- Целью первого является анализ текущей загрузки Терминала.
- Во втором устанавливается максимальное число контейнеров, которое система способна обработать за год. Рассматриваются два наиболее показательных случая. В первом увеличиваются размеры партий контейнеров на судах, во втором – интенсивности поступления самих контейнеровозов.
- В третьем исследуется поведение Терминала при поступлении в него сверхбольших контейнеровозов.

Для каждого эксперимента проводилось по 10 пусков программы, виртуальное время каждого из которых – 365 дней. В начальный момент времени СеМО пуста. Усредненные результаты десяти пусков представлены далее в таблицах и на рисунках.

Дополнительно были проведены пуски в случае, когда в начальный момент времени в очереди Узла b_8 (склада) находилось $n_{b_8} / 2$ заявок. Оказалось, что полученные показатели эффективности незначительно отличаются от таковых для случая, когда в начальный момент времени система была пуста.

5.1. ЭКСПЕРИМЕНТ 1.

В таблице 4 приведены результаты численного исследования СеМО (см. п. 3). Далее V_y – общее число заявок, поступивших в узел y ; $\bar{V}_y$ – среднее число заявок, находящиеся в узле в сутки; $K_y = \bar{K}_y/m_y$ – коэффициент занятости каналов; L_y , $\bar{t}_y$, $\bar{b}_y$ и P_L означают то же, что и в п. 3.1.

Таблица 4. Результаты эксперимента 1

	V_y	$\bar{V}_y$	K_y	$\bar{L}_y$	$\bar{t}_y$ (ч)	$\bar{b}_y$ (ч)
Узел a_1	308325,6	844,2	0,020	–	3,87	719,0
Узел b_2	308148,6	836,2	0,406	198,73	5,67	61,6
Узел d_3	306535,4	843,7	0,812	534,55	32,17	–
Узел c_4	306532,4	839,8	0,841	–	0,07	11004,4
Узел c_5	307933,0	843,6	0,201	–	0,08	226,3
Узел c_6	306550,4	839,8	0,798	–	0,34	74696,6
Узел c_7	620156,4	1699,1	0,113	–	0,02	252,0
Узел b_8	620155,0	1678,8	0,768	3447,34	52,39	70659,7
Узел c_9	312229,0	855,4	0,092	–	0,07	488,0
Узел c_{10}	306227,4	839,0	0,092	–	0,07	19,2
Узел b_{11}	312229,0	855,4	0,052	0	0,01	165,2
Узел c_{12}	306226,6	839,0	0,093	–	0,01	–
Поступило		M_1	M_2	Отклонено	M_1	M_2
Групп		487	312868	Заявок	0	639
Заявок		308326	312868	P_L	0,00103	

Для проверки адекватности модели сравнивались следующие показатели: а) общее число прибывших $V_1 + V_{11}$ и отправленных $V_3 + V_{12}$ заявок из таблицы 4 с объемами импорта и экспорта контейнеров за 2023 год; б) соотношение прибывших V_1/V_{11} и отправленных V_3/V_{12} заявок с соответствующими соотношениями импортных и экспортных объемов контейнеров для разных видов транспорта. В результате наибольшая относительная погрешность составила 3,9%, а средняя – 2,3%.

Проанализируем представленные в таблице 5 результаты и интерпретируем их.

1. В среднем 639 (0,2%) заявок из потока M_2 получают отказ в Узле b_{11} (ворота). Однако он имеет низкую загрузку, так как $K_{11} = 0,052 < 1$. Поэтому заявки получают отказ из-за блокировки Узла c_9 , которая вызвана переполнением Узла b_8 (склад).

2. Средняя длина очереди в Узле b_8 равна $\bar{L}_8 = 3447,34$, что соответствует 17% от вместимости очереди. Следовательно, переполнение этого узла возникает только при пиковых нагрузках, которые появляются относительно редко.

3. Средняя продолжительность блокировки каналов Узла a_1 составляет $\bar{b}_1 / 487,2 = 1,48$ ч, что можно интерпретировать как среднее время ожидания на якорной стоянке.

Таким образом, Терминал эффективно справляется с нагрузкой, в частности, среднее время ожидания на якорной стоянке 1,48 ч и среднее время хранения контейнеров на складе $\bar{t}_8 = 52,39$ ч относительно малы. Наблюдаемое число непринятых контейнеров с внешних тягачей несущественно, так как на территории морского терминала возможно размещение до 1500 контейнеров вне склада.

5.2. ЭКСПЕРИМЕНТ 2

Случай 1. По сравнению с Экспериментом 1 увеличены на 10%, 20% и 30% следующие параметры модели:

- средний размер групп заявок из потока M_1 ;
- интенсивность поступления заявок из потока M_2 ;
- средний размер обслуживаемой группы заявок в Узле d_3 .

Изменение размера обслуживаемых групп в Узле d_3 происходит за счет того, что доставка и вывоз контейнеров в подавляющем большинстве случаев производится одними и теми же контейнеровозами. В таблице 5 и на рис. 5 представлены результаты моделирования.

Таблица 5. Результаты Эксперимента 2, случай 1

№	$M_1 + M_2$	V_L	P_L	T_s	$\bar{L}_8$
1. +10%	692167,9	1358,7	0,0020	79,0	4554,6
2. +20%	753467,9	6282,7	0,0083	108,1	7297,8
3. +30%	831316,6	24959,0	0,0330	161,0	12220,6

Здесь и далее V_L – число отклоненных заявок.

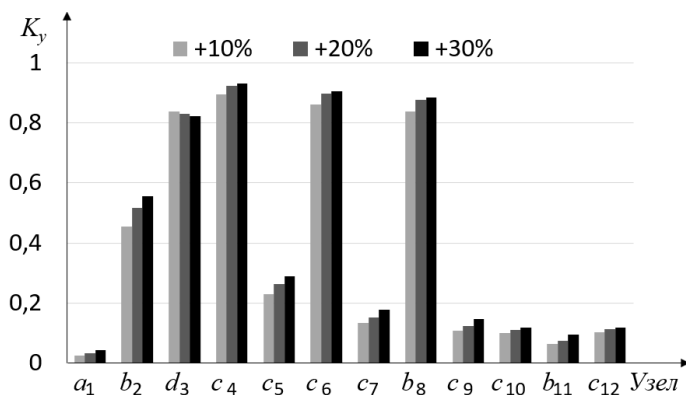


Рис. 5. Эксперимент 2, случай 1. Коэффициент использования каналов (K_y) в узлах

Случай 2. По сравнению с Экспериментом 1 интенсивности поступления заявок в обоих потоках и интенсивность обслуживания в Узле d_3 увеличены на 10%, 20% и 30%. Увеличение интенсивности обслуживания обусловлено ростом числа судов, прибывающих и, следовательно, отправляющихся из Терминала за год. Полученные результаты представлены в таблице 6 и на рис. 6.

Таблица 6. Результаты Эксперимента 2, случай 2

№	$M_1 + M_2$	V_L	P_L	T_S	$\bar{L}_8$
1. +10%	695999,6	2224,9	0,0032	96,6	6035,1
2. +20%	760171,6	7483,1	0,0099	107,1	7444,9
3. +30%	826456,9	11567,1	0,0140	120,3	9361,8

Интерпретируем результаты Экспериментов 2. Из таблиц 5 и 6 видно, что при увеличении объемов потоков контейнеров на 30% (строки №3) система в обоих случаях перестает справляться с нагрузкой. Так, число непринятых контейнеров за год в среднем по двум экспериментам составляет 17552 (1,06%), что является критическим. При увеличении нагрузки на 20% в среднем 6883 (0,46%) контейнеров не будут обслужены. По мнению экспертов, в течение года такое число контейнеров возможно

разместить вне склада и обработать их в периоды низкой нагрузки на систему.

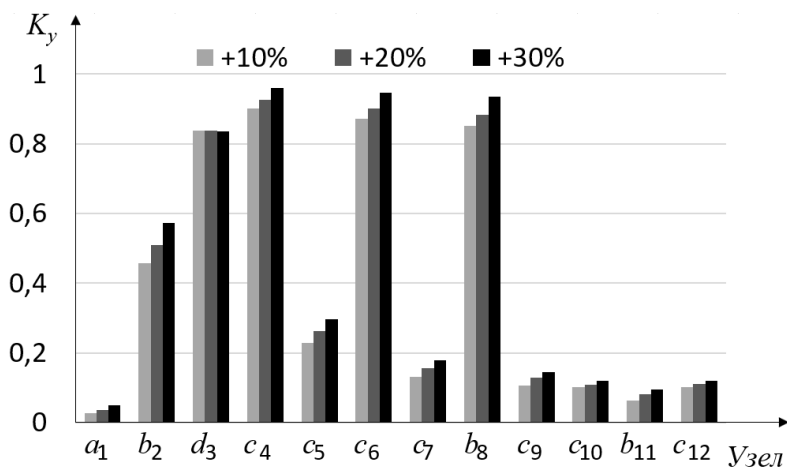


Рис. 6. Эксперимент 2, случай 2. Коэффициент использования каналов (K_y) в узлах

Таким образом, объемы перегружаемых контейнеров могут быть увеличены до 1,45–1,5 млн TEU в год, что на 20% больше показателя 2023 года. Однако это потребует четкой и бесперебойной работы Терминала, в частности, своевременного прибытия и отправления контейнеровозов.

Далее рассмотрим рис. 5 и 6. Наибольшее значение коэффициента занятости каналов (K_y) наблюдается в Узлах c_4 (береговые краны), c_6 и b_8 . При этом Узлы c_6 и b_8 имеют наибольшую продолжительность блокировки, которая учитывается при расчете K_y . Следовательно, наблюдаемые значения K_6 и K_8 обусловлены высокой загрузкой Узла c_4 . Поэтому ограничивающим элементом следует считать береговые краны и можно обоснованно предполагать, что их числа будет недостаточно при поступлении сверхбольших контейнеровозов в будущем.

Рассмотрим работу Терминала при увеличении числа береговых кранов до 8 и поступлении в него сверхбольших контейнеровозов, которые прибывают А) раз в полтора месяца (см. <https://hict.net.vn/en/about/Pages/history.aspx>) и Б) раз в месяц.

Примем, что такой контейнеровоз привозит в Терминал в среднем 5000 контейнеров [26].

5.3. ЭКСПЕРИМЕНТ 3

По сравнению с Экспериментом 1 были внесены следующие изменения в модель:

1. Добавлен новый поток заявок M_3 , который описывает поступление сверхбольших контейнеровозов. Размер групп заявок имеет распределение $U(4500; 5500)$, интенсивность поступления $\lambda_A = 0,0009$ и $\lambda_B = 0,0014$ групп заявок в час.

2. Число каналов в Узлах b_2 и c_4 увеличено до четырех. Также в Узле b_2 максимальная длина очереди составляет 5500 мест.

3. В Узле d_3 средний размер обслуживаемой группы заявок увеличен на 16% и соответствует среднему размеру прибывающих групп заявок из потоков M_1 и M_3 . Интенсивность обслуживания также увеличена на λ_A и λ_B . Эти изменения являются следствием того, что общее число отправляемых из Терминала судов возрастает из-за новых маршрутов сверхбольших контейнеровозов, которые при этом вмещают большее количество контейнеров, чем другие суда. Результаты моделирования представлены в таблице 7.

Таблица 7. Результаты Эксперимента 3

№	$M_1 + M_2 + M_3$	V_L	P_L	T_S	$\bar{L}_8$
1. $+\lambda_A$	679155,7	1278,2	0,0019	68,8	3531,2
2. $+\lambda_B$	693532,2	3136,7	0,0045	73,7	3884,5

Можно видеть, что при поступлении одного сверхбольшого контейнеровоза в месяц (строка №2 таблицы 7) за год в среднем не будет принято 3136,7 (0,45%) контейнеров, которые поступают с внешних тягачей. Данное значение не оказывает существенного влияния на работу системы из-за возможности разместить контейнеры непосредственно на территории морского терминала и обработать их при освобождении ресурсов системы. Дальнейшее увеличение интенсивности прибытия таких контейнеровозов труднореализуемо, так как Терминал будет способен эффективно работать только при отсутствии пиковых нагрузок. В частности, при поступлении сверхбольших контей-

неровозов раз в три недели необходимо, чтобы склад был загружен не более чем на 40–45% непосредственно перед поступлением такого судна. Этого можно добиться за счет принудительного ожидания на якорной стоянке, что приведет и к увеличению финансовых потерь из-за простоя судов.

5.4. ВЫВОД О РАБОТЕ СИСТЕМЫ

Таким образом, Терминал в настоящее время имеет запас пропускной способности, который позволит перегрузить до 1,5 млн TEU в год. Однако для эффективной разгрузки и погрузки сверхбольших контейнеровозов необходима его модернизация, в первую очередь – увеличение числа береговых кранов с 6 до 8. Также потребуется увеличить и количество внутренних тягачей для обеспечения бесперебойной работы этих кранов, как минимум до 40 шт. [22, 23]. В результате система будет способна эффективно обрабатывать текущий транспортный поток, а также прибытие сверхбольших контейнеровозов в среднем раз в месяц.

6. Заключение

В статье предложена математическая модель морского контейнерного терминала, которая представляет собой сеть массового обслуживания с неординарными входящими потоками. За счет применения аппарата теории массового обслуживания достигается высокая адаптивность математического описания, что позволяет применить его для анализа текущего состояния и прогнозирования работы различных морских терминалов в относительно короткие сроки, а также оценить эффективность проектов по их модернизации.

Построенная модель идентифицирована для международного контейнерного терминала, который обладает типовой конфигурацией и является одним из крупнейших в Юго-Восточной Азии. Для определения показателей эффективности работы объекта предложен алгоритм имитации функционирования СеМО, реализованный в виде программы, которая не предполагает использования высокопроизводительного оборудования при вы-

полнении расчетов и может выполняться в параллельном режиме на многопроцессорных компьютерах.

На основе результатов численного моделирования удалось не только оценить текущую и максимальную допустимую загрузку системы, но и спрогнозировать работу морского терминала при поступлении в него сверхбольших контейнеровозов. В результате сформулированы обоснованные рекомендации по увеличению парка перегрузочного оборудования.

Дальнейшие исследования в данном направлении могут быть направлены на развитие предлагаемого подхода, в частности, за счет учета нестационарности поступления транспорта в систему. Также интересным видится адаптация и применение представленного инструментария для моделирования других типов морских терминалов: угольных, нефтеналивных и зерновых.

Литература

1. *Анализ размера и доли рынка контейнерных перевозок - тенденции роста и прогнозы (2024–2029 гг.)* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/global-container-shipping-market>.
2. АЛЕКСАНДРОВ А.Э., ЯКУШЕВ Н.В. *Стохастическая постановка динамической транспортной задачи с задержками с учетом случайного разброса времени доставки и времени потребления* // Управление большими системами. – 2006. – №12–13. – С. 5–14.
3. БАШАРИН Г.П., БОЧАРОВ П.П., КОГАН Я.А. *Анализ очередей в вычислительных сетях. Теория и методы расчета*. – М.: Наука, 1989. – 336 с.
4. БЫЧКОВ И.В., КАЗАКОВ А.Л., ЖАРКОВ М.Л. *Формирование предложений по увеличению пропускной способности Улан-Баторской железной дороги с применением теории массового обслуживания* // Вычислительные технологии. – 2023. – Том 28, №6. – С. 17–36. – DOI: 10.25743/ICT.2023.28.6.003.
5. ЗУБ И.В., ЕЖОВ Ю.Е., СТЕНИН Н.Н. *Модель выбора портового перегрузочного оборудования на основе моделирова-*

- ния технологической линии порта // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2020. – №12. – С. 1016–1028. – DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1016-1028.
6. КАЗАКОВ А.Л., МАСЛОВ А.М. *Построение модели неравномерного транспортного потока на примере железнодорожной грузовой станции* // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2009. – №3. – С. 27–32.
 7. КУПЦОВ Н.В., КУЗНЕЦОВ А.Л., ШАТИЛИН А.В. *Разработка модели вероятностной оценки пропускной способности морского грузового фронта экспортного угольного терминала* // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2020. – Т.12, №1. – С. 17–34. – DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-17-34.
 8. МОРОЗОВ Н.Ю., ГРИШИН Е.М., ПРАВДИВЕЦ Н.А. и др. *Оптимизация пунктов перевалки "морской порт – железная дорога"* // Управление большими системами: сборник трудов. – 2022. – №99. – С. 135–156. – DOI: 10.25728/ubs.2022.99.6.
 9. ПОЛИН Е.П. МОИСЕЕВА С.П., МОИСЕЕВ А.Н. *Применение отрицательного биномиального распределения для аппроксимации стационарного распределения числа заявок в СМО с входящим МАР-потокм, интенсивность которого зависит от состояния системы* // Управление большими системами: сборник трудов. – 2024. – №108. – С. 40–56.
 10. BOLCH G., GREINER S., DE MEET H. et al. *Queueing Networks and Markov Chains: Modeling and Performance Evaluation with Computer Science Applications*. – NY.: John Wiley & Sons, 1998. – 726 p.
 11. BYCHKOV I., KAZAKOV A., LEMPERT A. et al. *Modeling of railway stations based on queuing networks* // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11(5). – P. 2425. – DOI: 10.3390/app11052425.
 12. BYCHKOV I.V., KAZAKOV A.L., LEMPERT A.A. et al. *An intelligent management system for the development of a regional transport logistics infrastructure* // Automation and Remote

- Control. – 2016. – Vol. 77. – P. 332–343. – DOI: 10.1134/S0005117916020090.
13. CANONACO P., LEGATO P., MAZZA R.M. et al. *A queuing network model for the management of berth crane operations* // Computers & Operations Research. – 2008. – Vol. 35. – P. 2432–2446. – DOI: 10.1016/j.cor.2006.12.001.
 14. CHEE-HOCK NG, BOON-HEE S. *Queueing Modelling Fundamentals With Applications in Communication Networks*. – Chichester: John Wiley & Sons, 2008. – 294 p.
 15. CHEN G., GOVINDAN K., GOLIAS M.M. *Reducing truck emissions at container terminals in a low carbon economy: proposal of a queueing-based bi-objective model for optimizing truck arrival pattern* // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. – 2013. – Vol. 55. – P. 3–22. – DOI: 10.1016/j.tre.2013.03.008.
 16. DRAGOVIĆ B., PARK N.-K., ZRNIĆ N.D. et al. *Mathematical Models of Multiserver Queuing System for Dynamic Performance Evaluation in Port* // Mathematical Problems in Engineering. – 2012. – Vol. 2012. – P. 19. – DOI: 10.1155/2012/710834.
 17. EDMOND E.D., MAGGS R.P. *How useful are queue models in port investment decisions for container berths?* // Journal of the Operational Research Society. – 1978. – Vol. 29, No. 8. – P. 741–750.
 18. BABELI K., HESS S., HESS M. *Capacity utilization of the container terminal as multiphase service system* // European Transport / Trasporti Europei. – 2022. – Vol. 86, No. 4. – P. 1–15.
 19. KAZAKOV A., LEMPERT A., ZHARKOV M. *An approach to railway network sections modeling based on queuing networks* // Journal of Rail Transport Planning & Management. – 2023. – Vol. 27. – P. 100404. – DOI: 10.1016/j.jrtpm.2023.100404.
 20. KOZAN E. *Comparison of analytical and simulation planning models of seaport container terminals* // Transportation Planning and Technology. – 1997. – Vol. 20. – P. 235–248. – DOI: 10.1080/03081069708717591.
 21. LEGATO P., CANONACO P., MAZZA R.M. *Yard Crane Management by Simulation and Optimisation* // Maritime Economics & Logistics. – 2009. – Vol. 11. – P. 36–57. – DOI: 10.1057/mel.2008.23.

22. LEGATO P., MAZZA R.M. *Queueing analysis for operations modeling in port logistics* // Maritime Business Review. – 2020. – Vol. 5. – P. 67–83. – DOI: 10.1108/MABR-09-2019-0035.
23. LEGATO P., MAZZA R.M. *Queueing networks for supporting container storage and retrieval* // Maritime Business Review. – 2023. – Vol. 8. – P. 301–317. – DOI: 10.1108/MABR-01-2023-0009.
24. RAJ G., ROY D., DE KOSTER R. et al. *Stochastic modeling of integrated order fulfillment processes with delivery time promise: Order picking, batching, and last-mile delivery* // European Journal of Operational Research. – 2024. – Vol. 316. – P. 1114–1128. – DOI: 10.1016/j.ejor.2024.03.003.
25. ROY D., DE KOSTER R. *Optimal Stack Layout Configurations at Automated Container Terminals Using Queueing Network Models* // In: Böse J.W. (eds) Handbook of Terminal Planning. Operations Research / Computer Science Interfaces Series. – Cham: Springer, 2020. – DOI: 10.1007/978-3-030-39990-0_19.
26. ROY D., VAN OMMEREN J.-K., DE KOSTER R. et al. *Modeling landside container terminal queues: Exact analysis and approximations* // Transportation Research Part B: Methodological. – 2022. – Vol. 162. – P. 73–102. – DOI: 10.1016/j.trb.2022.05.012.
27. ROŽIĆ T., IVANKOVIĆ B., BAJOR I. et al. *A Network-Based Model for Optimization of Container Location Assignment at Inland Terminals* // Appl. Sci. – 2022. – Vol. 12. – P. 5833. – DOI: 10.3390/app12125833.
28. ZHANG X., ZENG Q., CHEN W. *Optimization model for truck appointment in container terminals* // Procedia – Social and Behavioral Sciences. – 2013. – Vol. 96. – P. 1938–1947. – DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.08.219.
29. ZHANG X., ZENG Q., YANG Z. *Optimization of truck appointments in container terminals* // Marit. Econ. Logist. – 2019. – Vol. 21. – P. 125–145. – DOI: 10.1057/s41278-018-0105-0.
30. ZHARKOV M.L., KAZAKOV A.L., LEMPERT A.A. *Transient process modeling in micrologistic transport systems* // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 629. – P. 012023. – DOI: 10.1088/1755-1315/629/1/012023.

MODELING OF A SEA CONTAINER TERMINAL USING A QUEUING NETWORK

Anna Lempert, Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Cand.Sc. (lempert@icc.ru).

Maxim Zharkov, Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Cand.Sc. (zharkm@mail.ru).

Alexander Kazakov, Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of RAS, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Doctor of Science, professor (kazakov@icc.ru).

Giang Vu, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, graduate student (giangtrang14022016@gmail.com).

Abstract: The article focuses on the problem of modeling and forecasting the operation of a sea container terminal under the unevenness of cargo arrival and the influence of random factors on the service duration. The mathematical model takes the form of a queuing network (QN), whose nodes simulate the operation of the terminal structural elements. The movement of requests between nodes occurs according to a given route matrix. To describe transport flows arriving from sea and land, we use both ordinary and batch Poisson flows of requests. The constructed model is identified for a sea container terminal in the north of Vietnam – one of the largest in Southeast Asia. The model consists of 14 nodes and includes two incoming Poisson flows, one of which is batch. The route matrix and the parameters of incoming flows are determined by statistical processing of data from open sources and field observations. The mathematical model is implemented, and scenario simulation is performed. Based on the results obtained, we conclude the current capacity of the system and forecast its performance with an increase in the volume of container flows, in particular, with the arrival of ultra-large container vessels in the future.

Keywords: mathematical modeling, queuing network, simulation model, sea transport.

УДК 519.872

ББК 22.18

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии М.И. Гераськиным.*

Поступила в редакцию 11.07.2024.

Опубликована 30.11.2024.