

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОРСКОГО КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМИНАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Лемперт А.А.¹, Жарков М.Л.²

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

Казаков А.Л.³

*(Институт динамики систем и теории управления имени
В.М. Матросова СО РАН, Иркутский национальный
исследовательский технический университет, Иркутск)*

Ву Х.З.⁴

*(Иркутский национальный исследовательский
технический университет, Иркутск)*

В статье решается задача комплексного моделирования работы морских контейнерных терминалов при воздействии случайных факторов, из-за чего происходит неравномерное поступление транспорта и неопределенность в продолжительности его обслуживания. Математическое описание имеет вид сети массового обслуживания (СеМО), узлы которой имитируют работу структурных элементов морского терминала, таких как якорная стоянка, береговые краны, склад и ворота для наземного транспорта. Для моделирования входящих транспортных потоков, прибывающих с моря и суши, применяются как ординарные, так и групповые пуассоновские потоки заявок. Объектом исследования выбран крупнейший морской контейнерный терминал на севере Вьетнама. Модель его работы имеет вид СеМО с 12 узлами и двумя входящими пуассоновскими потоками, один из которых является неординарным. Математическая модель программно реализована, выполнены имитационные сценарные расчеты. На основе полученных результатов сделаны выводы о текущей пропускной способности системы и получен прогноз ее производительности при увеличении объемов контейнерных потоков, в частности, при поступлении сверхбольших контейнеровозов в будущем.

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

¹ Анна Ананьевна Лемперт, к.ф.-м.н., в.н.с. (lempert@icc.ru)

² Максим Леонидович Жарков, к.т.н., н.с. (zharkm@mail.ru)

³ Александр Леонидович Казаков, д.ф.-м.н., профессор РАН (kazakov@icc.ru).

⁴ Хоанг Занг Ву, аспирант (giangtrang14022016@gmail.com).

1. Введение

В настоящее время происходит увеличение объемов контейнерных перевозок и ожидается, что к 2029 году этот показатель в стоимостном выражении достигнет 145,70 млрд долларов, что на 22% больше, чем в 2024 году [1]. До 80% таких перевозок осуществляется морским транспортом [1], движение которого подвержено влиянию погоды и других труднопредсказуемых факторов. В результате, рост числа судов и неравномерное их поступление создает ряд эксплуатационных проблем в портах, в частности, необходимость решения задач согласования подвода грузов и назначения причалов [2, 8], оценки допустимой загрузки системы [7], а также формирование парка перегрузочного оборудования [5], требуемого при пиковых нагрузках. Последнее считается ключевой задачей при управлении портом [5, 7].

В настоящее время для описания логистических операций в морских контейнерных терминалах с учетом воздействия на них случайных факторов применяются сети Петри [5], вероятностно-статистические [7] и сетевые модели [24], а также методы теории массового обслуживания (ТМО) [14]. Последние еще с 80-х годов считаются одним из наиболее подходящих инструментов в портовой логистике [15, 18].

Одной из первых значимых работ по применению ТМО в области планирования морских контейнерных терминалов, по-видимому, является [15]. В ней системы массового обслуживания (СМО) используются для моделирования причальной зоны порта. Однако типовая структура морских терминалов включает три подсистемы с различными параметрами работы и два маршрута движения контейнеров. В этом случае для адекватного описания работы таких объектов используются сети массового обслуживания (СеМО), которые представляют собой совокупность конечного числа взаимосвязанных СМО [4].

Одними из ранних работ по применению СеМО в области портовой логистики являются [12] и [19], в которых моделируется перегрузка контейнеров со склада на судно и оптимизируется работа козловых кранов на складе. К настоящему времени в научной литературе имеется большое

число публикаций по данной тематике, поэтому приведем наиболее интересные на наш взгляд. Так, в [22] изучается эффективность различных конфигураций склада, а в [16] – процесс перегрузки контейнеров с судна на железнодорожный транспорт. Работы [13, 25] посвящены применению нестационарных СеМО для учета суточных колебаний интенсивности поступления транспорта в порт. В работах [18, 20, 21] моделируются перевозки контейнеров на внутренних тягачах между причалом и складом, а в [23] – по всей территории морского терминала при учете того, что число таких тягачей ограничено. В этих моделях часть заявок (контейнеры) поступает из внешнего источника, а другая часть (тягачи) циркулирует внутри системы.

При анализе литературы нам не удалось найти работ по комплексному моделированию морских терминалов при учете всех существующих подсистем, наличия разных видов транспорта и двух направлений движения материальных потоков внутри системы, что необходимо для эффективного формирования парка перегрузочного оборудования в условиях роста контейнерных перевозок. Настоящее исследование посвящено решению этой актуальной задачи.

Ранее нами были исследованы транспортные системы, подверженные влиянию случайных факторов, и предложен подход к моделированию их работы [6, 11], основанный на использовании СеМО с несколькими неординарными потоками заявок. С его помощью были построены модели мультимодального транспортно-пересадочного узла [26], железнодорожной станции [10] и участков железнодорожной сети [3, 17].

В данном исследовании предложенный подход расширяется и применяется для анализа и прогнозирования работы нового класса объектов – морских контейнерных терминалов. Статья организована следующим образом. В разделе 2 представлено описание объекта исследования, в разделе 3 – подхода и математической модели морского терминала в виде СеМО. В разделе 4 выполняется численное исследование построенной модели. На основе результатов расчетов оценивается текущая

пропускная способность системы и строится 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 (гейтвейх) 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 контейнерный терминал *Haiphong International Container Terminal* (далее Терминал), который является узловым глубоководным морским портом и имеет типовую структуру. Терминал 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 системы и карта-схема ее расположения представлены на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид

2.1. КОНТЕЙНЕРНЫЕ ПОТОКИ

Терминал обрабатывает рефрижераторные, груженые и порожние контейнеры двух размеров: 20-футовые и 40-футовые, которые прибывают на автомобильном и водном видах транспорта. Общепринятой единицей их измерения являются TEU (twenty-foot equivalent unit), что соответствует одному 20-футовому контейнеру, тогда 2 TEU – 40-футовому контейнеру. В таблице 1 представлено количество обработанных контейнеров в 2018-2023 гг., полученное 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 в сутки. Эти транспортные потоки независимы друг от друга и обрабатываются в отдельных подсистемах.

2.2. СТРУКТУРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТЕРМИНАЛА

В Терминале имеются 9 основных структурных элементов, которые представлены на рис. 2. Целью моделирования является оценка пропускной способности объекта, поэтому опишем только те элементы, которые непосредственно участвуют в перевалке контейнеров.



Рис. 2. Функциональная схема

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 22 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 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 на ней суда ожидают разрешения на швартовку. Время движения от стоянки до Терминала с учетом швартовки составляет 2,3 часа в среднем.

Таким образом, в Терминале имеется три крупные зоны: причальная зона, контейнерная площадка и ворота, а также якорная стоянка. Контейнеры поступают на двух типах транспорта, которые прибывают независимо друг от друга и обслуживаются в различных подсистемах.

3. Математическая модель

3.1. ОБЩИЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ РАБОТЫ МОРСКИХ КОНТЕЙНЕРНЫХ ТЕРМИНАЛОВ

Математическое описание морского терминала строится в виде открытой сети массового обслуживания. Она представляет собой совокупность конечного числа S СМО (далее – узлов), заявки между которыми следуют по заданному маршруту. В открытую СеМО заявки поступают из внешней среды, которая, как правило, считается дополнительным (фиктивным) узлом с индексом 0. Тогда маршрут заявки хранится в маршрутной матрице P размера $(S + 1) \times (S + 1)$, элемент которой P_{ij} – вероятность перехода заявки из узла i в узел j , $i, j = \overline{0, S}$ [4].

Модель строится в два этапа. На первом выполняется описание входящих потоков контейнеров, на втором – процесса их обслуживания в отдельных подсистемах и маршрутов движения внутри системы.

Первый этап моделирования. Внешние тягачи не имеют расписания и прибывают в морской терминал, как правило, независимо друг от друга. Традиционной моделью для описания их поступления является простейший поток [21, 23]. На движение контейнеровозов влияет множество факторов, в особенности, погода. Их прибытие, как правило, моделируется пуассоновским

потоком [13, 14, 20]. Кроме того, суда перевозят контейнеры партиями, поэтому этот поток будет неординарным [14, 22]. Интенсивности поступления и закон распределения размеров групп заявок определяются по результатам анализа статистических данных для конкретного объекта.

Второй этап моделирования. Работа подсистем в зависимости от их типа имитируется одной и более узлами СеМО, число которых равно числу направлений движения грузов (один или два). Законы распределения размера обслуживаемой группы заявок и времени ее обслуживания в узле определяются на основе результатов статистической обработки данных.

Во всех узлах применяются дисциплина полного отказа принятия групп заявок (complete rejection) и FIFO для обслуживания очереди (при наличии) [4]. Для описания передвижения заявок между узлами используется маршрутная матрица, которая строится на основе структуры выбранного объекта. Для предотвращения потерь заявок при их переходе между узлами применяются временные блокировки работы каналов до тех пор, пока в следующем узле не освободится достаточное количество мест.

3.2. ОПИСАНИЕ ВХОДЯЩИХ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПОТОКОВ

Тягачи, как правило, перевозят два 20-футовых или один 40-футовый контейнер. При этом 75% контейнеров на судах являются 40-футовыми. Поэтому примем, что *одной заявкой* на обслуживание является 40-футовый контейнер. Их типы не учитываются.

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 размер группы контейнеров подчиняется дискретному равномерному распределению $U(a; b)$. Параметры a и b 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 –

интенсивность поступления групп заявок в час, V – распределение их размеров.

Таблица 2. Модели входящих контейнерных потоков

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

3.2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ

Работа Терминала моделируется СеМО с 14 узлами, из которых два фиктивные – источники независимых входящих потоков заявок. Узлы 1-4 имитируют работу якорной стоянки и причальной зоны, Узлы 5-8 – внутренних тягачей и контейнерной площадки, а Узлы 9-12 описывают движение внешних тягачей внутри системы и через его ворота. Формальное описание узлов в терминах ТМО представлено в Таблице 3, где: T_i – распределение времени обслуживания, параметры которого указаны в часах; X_i – распределение размера обслуживаемой группы заявок в канале узла i .

Таблица 3. Модели работы структурных элементов

Узел	Элемент	Модель	T_i	X_i
1	Якорная стоянка	$M_1/G^X/10/0$	$N(2,3; 1,67)$	2000
2	Причал для разгружаемых судов	$*/M/3/960$	$\exp(30)$	1
3	Причал для загружаемых судов	$*/M^X/1/X$	$\exp(0,057)$	$U(420; 1060)$
4	Береговые краны для загружаемых судов	$*/M/3/0$	$\exp(30)$	1
5&6	Внутренние тягачи	$*/M/15/0$	$\exp(12)$	1
7	Козловые краны / ричстакеры	$*/M/13/0$	$\exp(50)$	1
8	Склад	$*/M/13/20160$	$\exp(50)$	1
9&10	Внешние тягачи	$*/M/26/0$	$\exp(15)$	1
11	Въездные ворота	$M_1/M/9/9$	$\exp(80)$	1
12	Выездные ворота	$*/M/5/0$	$\exp(80)$	1

Маршрутная матрица P имеет размер 14×14 . Она сильно разрежена и неинформативна, поэтому приведем только ненулевые вероятности переходов между узлами:

$$P_{13;1} = P_{1;2} = P_{2;5} = P_{5;7} = P_{7;8} = P_{0;11} = P_{11;9} = P_{9;7} = 1;$$

$$P_{6;4} = P_{4;3} = P_{3;0} = P_{10;12} = P_{12;13} = 1;$$

$$P_{8;6} = P_{6;10} = 0,5.$$

На рис. 3 представлена схема СеМО в виде графа.

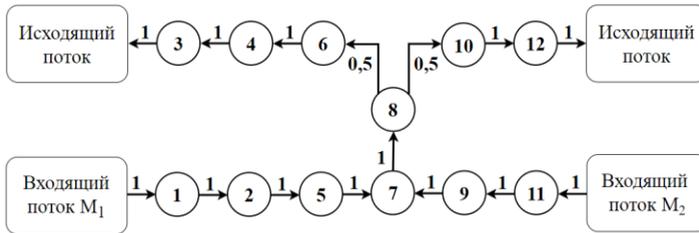


Рис. 3. Схема СеМО

Далее приводится развернутое описание процесса моделирования структурных элементов Терминала в виде узлов СеМО.

- Якорная стоянка моделируется одной СМО типа $*/G^X/m_1/0$, где X – размер обслуживаемой группы, m_1 равно среднему числу контейнеровозов, которые прибывают в систему за неделю. Время обслуживания в этой СМО, является случайной величиной, которая подчиняется нормальному распределению $N(\mu; \sigma)$ [20]. Его математическое ожидание μ соответствует среднему времени движения, а среднеквадратическое отклонение – $\sigma = (\max - \min)/6$, где \min и \max – минимальное и максимальное наблюдаемые значения.

В остальных подсистемах выполняются, как правило, непродолжительные (до 4 мин.) технические операции. Для их описания применяется экспоненциальное распределение $\exp(\lambda)$, где λ – интенсивность [14].

- При моделировании причальной зоны предполагается, что имеется два причала, из которых один (первый) предназначен для разгрузки контейнеровозов, а второй – для загрузки. Работа

первого причала имитируется СМО типа $*/M/m_2/n_2$, в которой m_2 – число береговых кранов, n_2 – максимальный размер прибывающих партий контейнеров.

Второй причал моделируется двумя СМО, из которых одна – $*/M/m_3/0$ – имитирует работу m_3 береговых кранов, а вторая – $*/M^Y/1/Y$ – отправление загруженного корабля со второго причала. Число мест Y в ее очереди меняется динамически и становится равной размеру следующей обслуживаемой группе заявок Y в канале. СМО с такими характеристиками относится к классу систем, функционирующих в случайной среде [9].

- Внутренние тьяги, как правило, поровну распределяются между двумя причалами. Их работа моделируется двумя СМО типа $*/M/m_i/0$, $i = \overline{5,6}$, где каналы $m_5 = m_6$ – собственно тьяги. Аналогичным образом имитируется перевозка контейнеров от ворот к складу и обратно ($*/M/m_i/0$, $i = \overline{9,10}$).

- Работа контейнерной площадки моделируется двумя СМО: $*/M/m_7/0$ и $*/M/m_8/n_8$. В них $m_7 + m_8$ – общее число козловых кранов и ричстакеров, n_8 – вместимость склада.

- Для описания ворот также используются две СМО: $*/M/m_{11}/n_{11}$ и $*/M/m_{12}/0$. Здесь m_{11} – число полос на выезд, n_{11} – вместимость площадки, m_{12} – число полос на въезд.

4. Вычислительный эксперимент

4.1. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ

Исследование построенной СеМО выполняется при помощи имитационной модели, которая основана на дискретно-событийном подходе к моделированию и программно реализована на языке программирования Object Pascal. Программа позволяет определить стационарные показатели эффективности для СеМО, в которой имеется до 100 узлов и столько же независимых неординарных потоков заявок.

С помощью программы выполнены четыре вычислительных эксперимента:

- Целью первого является анализ текущей загрузки Терминала.
- Во втором и третьем устанавливается максимальное число контейнеров, которое система способна обработать за год.

- В четвертом эксперименте исследуется поведение Терминала при поступлении в него сверхбольших контейнеровозов.

Для каждого эксперимента проводилось по 10 пусков программы. Виртуальное время одного пуска – 365 дней. В начальный момент времени СеМО пуста. Усредненные результаты представлены далее в таблицах и на рисунках. Дополнительно были проведены пуски в случае, когда очередь Узла 8 (склада) заполнена на половину в начале моделирования. Полученные результаты незначительно отличаются от результатов, когда система пуста.

4.2. ЭКСПЕРИМЕНТ 1.

В таблице 4 приведены результаты численного исследования СеМО (см. п. 3), где: V_i – число поступивших в узел i заявок; K_i – коэффициент занятости каналов обслуживанием; L_i – средняя длина очереди; t_i – среднее время (в часах) пребывания отдельной заявки в узле i ; b_i – суммарная продолжительность (в часах) блокировки каналов; P_L – вероятность отказа.

Таблица 4. Результаты эксперимента 1

	V_i	K_i	L_i	t_i (ч.)	b_i (ч.)
Узел 1	308325,6	0,020	-	3,87	718,95
Узел 2	308148,6	0,406	198,73	5,67	61,63
Узел 3	306535,4	0,812	534,55	32,17	-
Узел 4	306532,4	0,841	-	0,07	11004,44
Узел 5	307933,0	0,201	-	0,08	226,33
Узел 6	306550,4	0,798	-	0,34	74696,64
Узел 7	620156,4	0,113	-	0,02	251,95
Узел 8	620155,0	0,768	3447,34	52,39	70659,70
Узел 9	312229,0	0,092	-	0,07	487,97
Узел 10	306227,4	0,092	-	0,07	19,15
Узел 11	312229,0	0,052	0	0,01	165,17
Узел 12	306226,6	0,093	-	0,01	-
Поступило	M_1	M_2	Отклонено	M_1	M_2
Групп	487,2	312867,6	Заявок	0	638,6
Заявок	308325,6	312867,6	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; в) 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 перенесем их на объект исследования:

- 1) В среднем 638,6 заявок из потока M_2 получают отказ в Узле 11 (ворота). Однако он имеет низкую загрузку, так как $K_{11} = 0,052 < 1$. Поэтому, заявки получают отказ из-за блокировки Узла 11, которая вызвана переполнением Узла 8.
- 2) Средняя длина очереди в Узле 8 (склад) имеет относительно небольшое значение $L_8 = 3447,34$ (17% от вместимости очереди). Следовательно, переполнение этого узла возникает только при пиковых нагрузках, которые появляются относительно редко.
- 3) Средняя продолжительность блокировки каналов Узла 1 составляет $b_1 / 487,2 = 1,48$ часов, 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 часов) и среднее время хранения контейнеров на складе ($t_8 = 52,39$ ч.) относительно малы. Наблюдаемое число непринятых контейнеров с внешних тягачей несущественно, так как на территории морского терминала возможно размещение до 1500 контейнеров вне склада.

Далее оценивается максимальная допустимая загрузка контейнерного терминала. Рассматриваются два наиболее показательных случая: увеличиваются размеры прибывающих партий контейнеров на судах (Эксперименте 2) и интенсивности поступления контейнеровозов (Эксперимент 3).

4.3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ 2 И 3

Эксперимент 2. По сравнению с Экспериментом 1 были внесены следующие изменения в модель. Во-первых, средний размер групп заявок в M_1 (контейнеровозы) и интенсивность поступления заявок в M_2 (внешние тягачи) увеличены на 10%,

20% и 30%. Во-вторых, на такие же значения увеличен средний размер обслуживаемой группы заявок в Узле 3, чтобы сохранить соотношение поступающих и отправляющихся заявок из СеМО в единицу времени. В Таблице 5 и на рис. 4 представлены результаты моделирования, где V_L – число отклоненных заявок.

Таблица 5. Результаты Эксперимента 2

№	$M_1 + M_2$	V_L	P_L	$T_{СМО}$	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

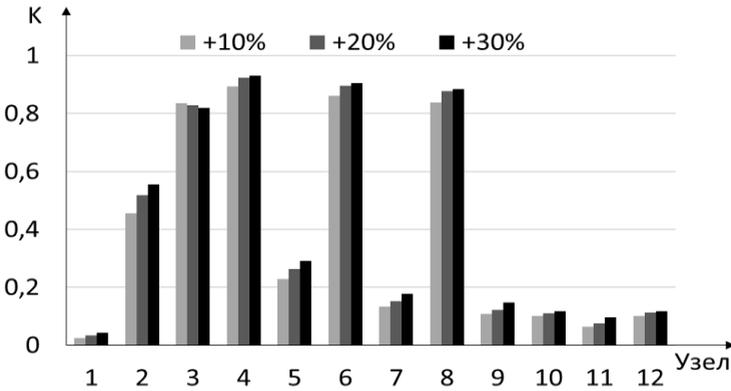


Рис. 4. Эксперимент 2. Коэффициент использования каналов (K_i) в узлах

Эксперимент 3. По сравнению с Экспериментом 1 интенсивности поступления заявок в обоих потоках и интенсивность обслуживания в Узле 3 увеличены на 10%, 20% и 30%. Полученные результаты представлены в Таблице 6 и рис. 5.

Таблица 6. Результаты Эксперимента 3

№	$M_1 + M_2$	V_L	P_L	$T_{СМО}$	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

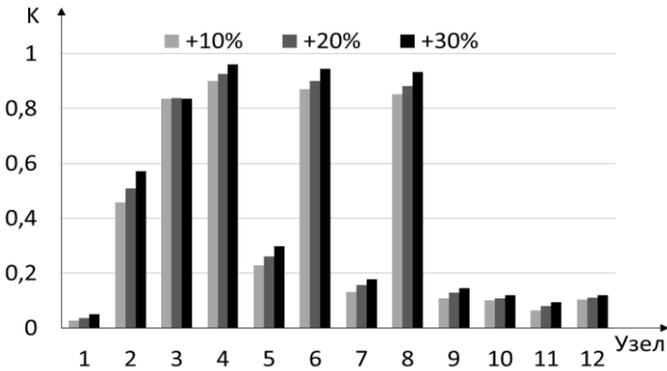


Рис. 5. Эксперимента 3. Коэффициент использования каналов (K_i) в узлах

Интерпретируем результаты Экспериментов 2 и 3. Рассмотрим представленные в Таблицах 5 и 6 данные. 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, что является критическим. При увеличении нагрузки на 20% в среднем 6883 контейнеров не будут обслужены. По мнению экспертов, такое число контейнеров возможно разместить вне склада в течение года. Таким образом, объем перегружаемых контейнеров в Терминале может быть увеличен до 1,45-1,5 TEU в год (+20% от значения 2023 года), однако это потребует бесперебойной его работы.

Далее рассмотрим рис. 4 и 5. Наибольшее значение коэффициента занятости каналов (K_i) наблюдается в Узле 4 (береговые краны), Узле 6 (внутренние тягачи) и Узле 8 (склад). Однако из них наибольшую продолжительность блокировки имеют Узлы 6 и 8, которая учитывается при расчете K_i . Следовательно, наблюдаемые значения K_6 и K_8 обусловлены высокой загрузкой Узла 4. Поэтому ограничивающим элементом следует считать береговые краны и можно обоснованно предполагать, что их числа будет недостаточно при поступлении сверхбольших контейнеров 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. При этом примем, что они привозят в среднем 5000 контейнеров [23], а увозят партию, которая соответствует среднему числу перевозимых контейнеров на других судах.

4.4. ЭКСПЕРИМЕНТ 4

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

- 1) Добавлен новый поток заявок M_3 , в котором размер групп 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 2 и 4 увеличено до четырех. Также в Узле 2 максимальная длина очереди составляет 5500 мест.
 - 3) В Узле 3 средний размер обслуживаемой группы заявок увеличен на 16%, а интенсивность обслуживания – на λ_A и λ_B . Это необходимо чтобы сохранить соотношение поступающих и отправляющихся из СеМО заявок при введении потока M_3 .
- Результаты моделирования представлены в Таблице 7.

Таблица 7. Результаты Эксперимента 4

№	$M_1 + M_2 + M_3$	V_L	P_L	$T_{СМО}$	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 контейнера с внешних тягачей. Данное значение не оказывает существенного влияния на работу системы из-за возможности разместить контейнеры непосредственно на территории морского терминала. Дальнейшее увеличение интенсивности прибытия таких контейнеровозов труднореализуемо, так как Терминал будет способен эффективно работать только при отсутствии пиковых нагрузок. В частности, при поступлении сверхбольших контейнеровозов 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.

4.5. 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. [20, 21]. В результате, система будет способна эффективно обрабатывать текущий транспортный поток, а также прибытие сверхбольших контейнеровозов в среднем раз в месяц.

5. Заключение

В статье представлен подход к моделированию морского контейнерного терминала, основанный на использовании сетей массового обслуживания с неординарными входящими потоками. Получаемые таким образом модели являются высокоадаптивными, что позволяет применить их для описания и прогнозирования работы различных морских терминалов в относительно короткие сроки, а также оценить эффективность проектов модернизации системы.

В рамках реализации подхода построена комплексная модель международного контейнерного терминала, который обладает типовой конфигурацией и является крупнейшим на севере Вьетнама. На основе результатов ее численного исследования удалось не только оценить текущую и максимальную допустимую загрузку системы, но и спрогнозировать работу морского терминала при поступлении в него сверхбольших контейнеровозов. Как итог, были представлены 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.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-21-00264).

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: сборник трудов. – 2006. – № 12-13. – С. 5-14.
3. 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.
4. ВИШНЕВСКИЙ В.М. *Теоретические основы проектирования компьютерных сетей*. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
5. ЗУБ И.В., ЕЖОВ Ю.Е., СТЕНИН Н.Н. *Модель выбора портового перегрузочного оборудования на основе моделирования технологической линии порта* // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2020. – №12(6). – 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(23). – 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., КОРОВКИН Д.М., ТЮЛЕНЕВ И.Д. *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-поток, интенсивность которого зависит от состояния системы* // Управление большими системами: сборник трудов. – 2024. – № 108. – С. 40-56.
 10. BYCHKOV I., KAZAKOV A., LEMPERT A., ZHARKOV M. *Modeling of railway stations based on queuing networks* // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11. – P. 2425. DOI: 10.3390/app11052425
 11. BYCHKOV I.V., KAZAKOV A.L., LEMPERT A.A., BUKHAROV D.S., STOLBOV A.B. *An intelligent management system for the development of a regional transport logistics infrastructure* // Autom. Remote Control. – 2016. – Vol. 77. – P. 332–343. DOI: 10.1134/S0005117916020090
 12. CANONACO P. LEGATO P., MAZZA R.M., MUSMANNO R. *A queuing network model for the management of berth crane operations* // Computers & Operations Research. – 2008. – Vol. 35 (8). – P. 2432–2446. DOI: 10.1016/j.cor.2006.12.001
 13. 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
14. DRAGOVIĆ B., PARK N.-K., ZRNIĆ N.D., MEŠTROVIĆ R. *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
 15. 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.
 16. KARLA B., SVJETLANA H., MIRANO H. *Capacity utilization of the container terminal as multiphase service system* // *European Transport / Trasporti Europei*. – 2022. – Vol. 86, No. 4.
 17. 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
 18. KOZAN E. *Comparison of analytical and simulation planning models of seaport container terminals* // *Transportation Planning and Technology*. – 1997. – Vol. 20(3). P. 235–248. DOI: 10.1080/03081069708717591
 19. LEGATO P., CANONACO P., MAZZA R.M. *Yard Crane Management by Simulation and Optimisation* // *Maritime Economics & Logistics*. – 2009. – Vol. 11(1). – P. 36–57. DOI: 10.1057/mel.2008.23
 20. LEGATO P., MAZZA R.M. *Queueing analysis for operations modeling in port logistics* // *Maritime Business Review*. – 2020. – Vol. 5 (1). – P. 67–83. DOI: 10.1108/MABR-09-2019-0035
 21. LEGATO P., MAZZA R.M. *Queueing networks for supporting container storage and retrieval* // *Maritime Business Review*. – 2023. – Vol. 8(4). – P. 301–317. DOI: 10.1108/MABR-01-2023-0009
 22. ROY D., DE KOSTER R. *Optimal Stack Layout Configurations at Automated Container Terminals Using Queuing 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
23. ROY D., VAN OMMEREN J.-K., DE KOSTER R., GHAREHGOZLI A. *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
 24. ROŽIĆ T., IVANKOVIĆ B., BAJOR I., STARČEVIĆ M. A *Network-Based Model for Optimization of Container Location Assignment at Inland Terminals* // Appl. Sci. – 2022. – Vol. 12. – P. 5833. DOI: 10.3390/app12125833
 25. 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
 26. 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 complex modelling of the operation of a sea container terminal under the influence of random factors, which causes an uneven transport flow and service duration uncertainty. The mathematical model takes the form of a queuing network (QN), whose nodes simulate the operation of the structural elements of the sea terminal, such as anchorage, shore cranes, a warehouse, and gates for land transport. To describe transport flows arriving from sea and land, we use both ordinary and batch Poisson flows of requests. The object of the study is the largest sea container terminal in the north of Vietnam. The model of its operation has the form of a QN with 12 nodes and 2 incoming Poisson flows, one of which is batch. 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: container terminal, mathematical modeling, queuing network, simulation model, numerical experiment.

УДК 519.872

ББК 22.18

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии ...заполняется редактором...*

*Поступила в редакцию ...заполняется редактором...
Опубликована ...заполняется редактором...*