

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
MATHEMATICAL MODELING

Научная статья
УДК 519.872
doi: 10.17223/19988605/72/1

**Моделирование работы универсального морского порта
на основе управляемой сети массового обслуживания**

Хоанг Занг Ву¹, Максим Леонидович Жарков², Александр Леонидович Казаков³

^{1,3} Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

^{2,3} Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова
Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

¹ giangtrang14022016@gmail.com

² zharkm@mail.ru

³ kazakov@icc.ru

Аннотация. Разрабатывается методика моделирования процесса перевалки в универсальных морских портах. Модели имеют вид управляемых сетей массового обслуживания, в которые поступает несколько неординарных входящих потоков заявок, описывающих прибытие грузов на наземном и морском транспорте. Подсистемы порта моделируются разными типами систем массового обслуживания, в том числе управляемыми, допускающими регулирование параметров. В результате в модели учитываются влияние случайных факторов на работу порта и вариативность технологии перегрузки в его подсистемах. Для апробации методики выбран универсальный морской порт Куангнинь, Вьетнам. На основе результатов численного исследования его модели сделаны выводы о текущей пропускной способности объекта и построен прогноз эффективности его работы при увеличении грузопотоков.

Ключевые слова: теория массового обслуживания; универсальный порт; моделирование.

Благодарности: Исследования выполнены в рамках госзадания Минобрнауки России по проекту «Теоретические основы, методы и высокопроизводительные алгоритмы непрерывной и дискретной оптимизации для поддержки междисциплинарных научных исследований», № 121041300065-9.

Для цитирования: Ву Хоанг Занг, Жарков М.Л., Казаков А.Л. Моделирование работы универсального морского порта на основе управляемой сети массового обслуживания // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2025. № 72. С. 4–15. doi: 10.17223/19988605/72/1

Original article
doi: 10.17223/19988605/72/1

**Modeling the operation of a universal seaport
using a controlled queueing network**

Vu Giang Hoang¹, Maxim L. Zharkov², Alexander L. Kazakov³

^{1,3} Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

^{2,3} Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

¹ giangtrang14022016@gmail.com

² zharkm@mail.ru

³ kazakov@icc.ru

Abstract. The article focuses on developing a methodology to model the transshipment process in universal sea-ports. The proposed models have the form of a controlled queuing network, which receives multiple incoming flows of requests representing the arrival of goods via both land and sea transport. We employ different types of queueing systems, including controlled systems that adjust operational parameters based on predefined rules, to model the various subsystems of the port. This approach allows the model to account for the impact of random factors on port operations, as well as changes in transshipment technology across subsystems. To validate the methodology, we apply it to the universal seaport of Quang Ninh, Vietnam. A numerical analysis of the port's model provides insights into its current throughput capacity and forecasts operational efficiency under increased cargo flows.

Keywords: queueing theory; universal seaport; mathematical modeling.

Acknowledgments: The research was funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, the project "Theoretical foundations, methods and high-performance algorithms for continuous and discrete optimization to support interdisciplinary research" (No. 121041300065-9).

For citation: Vu Giang Hoang, Zharkov, M.L., Kazakov, A.L. (2025) Modeling the operation of a universal seaport using a controlled queueing network. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 72. pp. 4–15. doi: 10.17223/19988605/72/1

Введение

Морские порты являются ключевым элементом для организации мультимодальных международных грузоперевозок, так как от их эффективности зависят объемы и скорость доставки грузов [1]. С середины 2024 г. наблюдаются признаки перегрузки крупных портов в различных регионах мира из-за роста товаропотоков, а также сбоев в работе, которые, в частности, вызваны затрудненным судоходством в Красном море и Панамском канале [2]. В этой связи актуальной остается задача оценки пропускной способности портов и ее своевременного повышения при росте грузопотоков. Традиционно подобные задачи решаются с использованием методов математического и компьютерного моделирования, а также сценарного анализа.

Основная ценность моделирования заключается в оптимизации технологических процессов за счет рационального распределения ресурсов (погрузочно-разгрузочной техники, складских мощностей, транспортных потоков), что приводит к минимизации времени обработки судов и снижению простоев. С точки зрения экономической эффективности данный подход позволяет идентифицировать узкие места в эксплуатационной деятельности, что способствует сокращению издержек и улучшению финансового планирования. Кроме того, моделирование обеспечивает прогнозирование пропускной способности порта в условиях изменяющегося грузопотока или внешних факторов (например, погодных или политических), возникновения сбоев в работе порта (задержки судов, аварии и т.п.), а также служит инструментом оценки эффективности инновационных решений (автоматизация терминалов, расширение причальных линий, внедрение цифровых технологий) до их физической реализации, что снижает инвестиционные риски и повышает общую надежность портовой инфраструктуры. Ключевыми показателями, характеризующими пропускную способность системы, являются среднее время ожидания судов на якорной стоянке, степень загрузки портового оборудования, доля грузов, обслуженных без задержек. Для их оценки, как правило, применяются модели, в которых учитываются особенности массового поступления и обслуживания товаров, т.е. теории массового обслуживания (ТМО) [3].

Простейшие системы массового обслуживания (СМО) впервые были применены около 50 лет назад для описания причалов и складов в морских портах [4]. В настоящее время для учета их сложной структуры обычно используются сети массового обслуживания (СеМО) [3], которые представляют собой набор связанных между собой СМО (узлов), что позволяет отобразить разные параметры работы подсистем порта и несколько маршрутов движения грузов между ними, включая кольцевые. В [5–7] СеМО используются для выбора рациональной конфигурации порта и его подсистем. В [8] представлена

модель перевозки контейнеров между причалом и складской площадкой, в [9] исследован процесс передачи товаров с морского транспорта на сухопутный, в [10] на основе СеМО построена модель транспортной сети, включающей несколько портов, и изучено влияние перегрузки некоторых из них на работу всей сети. В [11] с помощью СеМО с ВММАР-потокм исследован морской угольный терминал.

В указанных выше и других аналогичных работах используются стационарные модели, которые не позволяют учесть изменение режима функционирования подсистем порта во времени и погрузочно-разгрузочного оборудования в зависимости от типа прибывающего товара, что принципиально для универсальных морских портов [1]. В этой связи нами начат цикл работ, посвященных применению для моделирования портов нестационарных СеМО. В [12] проведен анализ эффективности перегрузки в морском контейнерном терминале, в [13] – обработки однотипных грузов в универсальном морском порту.

В данной статье представленный подход [12, 13] усовершенствован, и на его основе разработана методика моделирования универсального морского порта, обрабатывающего два и более типов товаров. В отличие от [12, 13] в ней используется управляемая СеМО, в которой возможно изменение параметров работы узлов по определенным правилам [14]. В частности, допустимы колебания интенсивности входящих потоков заявок и числа работающих каналов в узлах в зависимости от времени, выбор альтернативного маршрута движения заявок внутри СеМО. В качестве объекта апробации методики был выбран универсальный морской порт Куангнинь, Вьетнам. Структура этого порта включает типовые элементы, поэтому он является подходящим примером для демонстрации возможностей методики.

1. Методика математического моделирования работы универсального морского порта

Под универсальным морским портом понимается механизированный комплекс, предназначенный для перегрузки различного количественного сочетания генеральных, навалочных, насыпных и лесных грузов, поступающих с морских и речных (барж) судов, автомобильного и железнодорожного транспорта. Такие порты оснащены несколькими причалами и специализированной техникой для работы с разнообразными грузами, двумя и более складами для их временного хранения, грузовым фронтом для наземного транспорта, а в акватории имеется якорная стоянка для судов. Грузы между причалом и складами перевозятся на внутренних грузовиках [1].

Ранее был предложен подход моделирования морских портов на основе нестационарных СеМО [12, 13]. В данной статье для описания универсального морского порта используется более сложная разновидность таких СеМО. В ее узлах число работающих каналов меняется в зависимости от времени (смены), а вероятности переходов заявок между узлами могут меняться динамически в зависимости от загруженности самих узлов. Опишем применяемый аппарат более подробно.

Математический аппарат. Под СеМО понимается совокупность конечного числа S ($S \geq 2$) взаимосвязанных между собой СМО (узлов). В открытую систему заявки поступают из D внешних источников, которые, как правило, считаются фиктивными (дополнительными) узлами. Тогда маршруты движения заявок внутри системы хранятся в маршрутной матрице P размера $(S + D) \times (S + D)$. Ее элементы $P_{i,j} \geq 0$ – вероятности перехода заявки из узла i в узел j , при этом $P_{i,i} = 0$, $\sum_{j=1}^{S+D} P_{i,j} = 1$, $i = \overline{1, S+D}$. Если j – фиктивный узел, то заявка покидает СеМО.

Управляемые СеМО имеют две отличительные особенности. Первая – часть узлов относится к классическим (стационарным) СМО [4]. Для их формального описания применяется символика Кендалла–Башарина, в которой узел $i \in S$ представляется в виде:

$$A_i / B_i^X / y_i / z_i, \quad (1)$$

где A_i – входящий поток заявок; B_i и X_i – законы распределения времени обслуживания и размера обслуживаемых групп заявок в каналах; y_i – число каналов; z_i – вместимость очереди. Если параметры входящего потока в узел i неизвестны, то на первой позиции в (1) ставится символ «*».

Другая часть узлов относится к управляемым СМО [14–16], в которых допустима регулировка по определенным правилам: (а) интенсивности поступления и обслуживания заявок в каналах; (б) числа работающих каналов; (в) вместимости очереди. Для описания таких узлов в (1) применяются:

- в случае (а) $A_i(t)$ и $B_i(t)$ – параметры потока заявок, и их обслуживания зависят от времени;
- в случае (б) $u_i(n_i)$, где u_i и n_i – минимальное и максимальное число работающих каналов;
- в случае (в) $z_i(X)$ – вместимость очереди меняется динамически и становится равной размеру поступающей или обслуживаемой группы заявок в узле.

Вторая отличительная особенность управляемых СеМО заключается в том, что значения P_{ij} могут меняться при наступлении заданных событий, тогда как в стационарных СеМО они неизменны. В частности, если свободного места в узле j недостаточно для принятия заявок с узла i , то выбирается доступный альтернативный маршрут. Если его нет или он недоступен, то происходит временная блокировки каналов узла i до тех пор, пока в узле j не освободится достаточно места.

Методика моделирования. Модель в виде управляемой СеМО строится в три этапа: описание входящих грузопотоков, моделирование процесса их обслуживания в подсистемах порта и учет различных маршрутов движения грузов внутри системы.

Описание входящих грузопотоков. Грузы прибывают в порт на разных типах транспорта, которые считаются источниками грузопотоков. Их модели в ТМО – входящие потоки заявок на обслуживание. Под заявкой понимается единица измерения массы груза, как правило, тонна.

Баржи движутся независимо друг от друга (отсутствие последействия). Среднее их число в сутки известно и не меняется (стационарность). Следовательно, входящие потоки барж можно описать стационарным Пуассоновским (простейшим – M_i) потоком заявок. В нем промежутки времени между поступлением заявок описываются экспоненциальным распределением $\exp(\lambda)$, где λ – интенсивность. В отличие от барж среднее число прибывающих автомобилей в порт в течение суток может существенно меняться в зависимости от смены. Поэтому для описания их поступления используем нестационарный Пуассоновский поток ($M_i(t)$).

Протяженность морских маршрутов и влияние большого числа факторов приводят к тому, что время поступления судна в порт не может быть точно определено. В этой связи, согласно Центральной предельной теореме, время между поступлением судов можно принять случайной величиной, которая подчиняется нормальному распределению $N(\mu; \sigma)$, где μ – математическое ожидание, σ – среднеквадратическое отклонение. Такой поток заявок обозначим далее через G_i .

Транспортные средства имеют существенный разброс по вместимости, а размеры партий груза в них далеко не всегда заранее известны получателю. Следовательно, все представленные потоки будут неординарными, а размеры групп – случайными величинами. Для их описания используется дискретное равномерное распределение $U(a; b)$, где a и b – наименьшая и наибольшая партии грузов.

Обработка грузов в подсистемах моделируются узлами СеМО разных типов:

- $A_i^X / B_i^X / y_i / 0$ – многоканальные СМО с отказами применяются для моделирования: работы якорной и автомобильной стоянок, где транспортные средства ожидают разрешения на вход в порт; движения грузовиков через ворота; перевозки грузов на внутренних грузовиках. В этих подсистемах парковочное место или само транспортное средство выполняет роль обслуживающего устройства.

- $*/ B_i^X / y_i / z_i$ – многоканальные СМО с ограниченной вместимостью очереди используются для описания работы складов и причалов. Здесь каналами является погрузочное оборудование, а очередь – доступная площадь для размещения груза.

- $A_i^X / B_i^Y / y_i / z_i(X)$ – многоканальные СМО с меняющейся вместимостью очереди описывают процесс разгрузки судна на причалах. Каналы соответствуют оборудованию на них, а очередь – размеру прибывающей на судне партии груза.

- $*/ B_i^X / 1 / z_i(X)$ – одноканальные СМО с меняющейся вместимостью очереди моделируют процесс погрузки товара на судно и отправление его из системы. Каналом является судоходный канал, очередь – размер отправляемой на судне партии груза.

- $*/ B_i^X / u_i(n_i) / 0$ – СМО с отказами и меняющимся числом работающих каналов применяются для описания движения внешних грузовиков между воротами и складами. Каналы описывают работу грузовиков, число которых равно u_i в дневную и n_i в ночную смену.

Грузы перевозятся на транспорте и перегружаются партиями, поэтому во всех узлах допустимо групповое обслуживание заявок. Из очереди заявки выбираются согласно дисциплине FCFS (First Come, First Served), т.е. в порядке поступления.

Описание движения грузов. Для описания процесса принятия транспорта в порт применяется дисциплина полного отказа: если в узле число свободных мест меньше, чем размер прибывающей группы заявок, то они получают отказ в обслуживании и покидают систему. Принятые заявки движутся по системе в соответствии с заданными маршрутами, хранящимися в маршрутной матрице.

2. Предметное описание и математическая модель объекта исследования

Описание объекта. Порт Куангнинь (далее – Порт) расположен в ключевом экономическом районе на севере Вьетнама. Порт обрабатывает корма для животных, древесную щепу, строительные материалы, руду, металлолом и контейнеры. Основную долю экспортных грузов составляет древесная щепа, а импортных грузов – корма для животных (95% общего грузооборота). Они доставляются в Порт тремя видами транспорта. На морских судах поступают корма для животных. Согласно данным за первые 6 месяцев 2024 г., в среднем прибывает 3 судна в неделю. Древесная щепа поступает по внутренним водным путям на баржах и автомобильным транспортом на грузовиках. В среднем ежедневно прибывает 6 барж и 125 грузовиков, из которых в дневную смену (с 6:00 до 18:00) поступает 50 грузовиков с щепой, а в ночную – 75.

В 46 км от порта Куангнинь в море находится якорная стоянка на 6 мест. Также в 600 м от Порта расположена якорная стоянка для барж, вмещающая до 20 единиц. Среднее время движения от стоянок до порта с учетом швартовки составляет 3 ч для судов и 20 мин для барж.

В самом порту имеется три зоны: причальная, складская и пропускной пункт, которые представлены на рис. 1. Причальная зона включает четыре причала (№ 1, 2, 3, 4). Причал № 1 оборудован двумя береговыми кранами для разгрузки древесной щепы с барж, а причал № 2 – тремя береговыми кранами и предназначен для перегрузки животных кормов с морских судов. Причал № 4 оборудован тремя конвейерными системами для транспортировки щепы в складские отсеки судна. Причал № 3 используется как для экспорта древесной щепы, так и для импорта кормов для животных, поэтому он оснащен тремя береговыми кранами и тремя конвейерными системами.

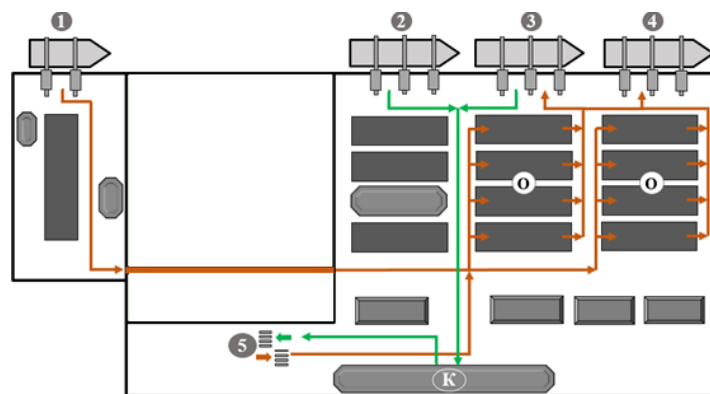


Рис. 1. Схема порта Куангнинь
Fig. 1. Scheme of Quang Ninh port

На территории Порта расположено два типа складов: 6 крытых складов для хранения кормов для животных «К» (см. рис. 1), которые вмещают 90 тыс. т груза; 8 открытых складов «О» (см. рис. 1) вместимостью 240 тыс. т для древесной щепы. На обоих типах складов действует по 6 экскаваторов (грузовой фронт). На пропускном пункте (ворота 5 на рис. 1) имеется 2 въездных и 2 выездных полосы. Также перед воротами со стороны дороги расположена стоянка на 25 мест.

Перевозка товаров между причалами и складами осуществляется с помощью внутренних грузовиков: корма для животных перевозятся 20 грузовиками; древесная щепа – 30 грузовиками, из которых

10 обслуживают только причал № 1. Вывоз груза из Порта происходит следующим образом: в дневную смену в среднем прибывает 18 внешних грузовиков в час, а в вечернюю – 27 в час.

Математическая модель. Порт Куангнинь ранее рассматривался авторами в [13], однако исследовался только процесс перегрузки экспортных товаров. Из-за этого не была изучена работа причалов № 2 и № 3 и крытых складов. Далее представлена модель порта Куангнинь с учетом перегрузки как экспортных, так и импортных грузов в системе, а также особенностей функционирования причала № 3.

Описание входящих грузопотоков. В модели предполагается, что одной заявкой на обслуживание является одна тонна груза. В Порт прибывает три вида транспорта, следовательно, имеется три грузопотока. Для описания потока древесной щепы с барж применяется простейший поток (M_1), а с грузовиков – неординарный Пуассоновский поток ($M_2(t)$). Входящий поток кормов для животных моделируется неординарным потоком, в котором промежутки времени между поступлением групп заявок подчинены нормальному распределению. Параметры этих потоков представлены в табл. 1.

Таблица 1

Модели входящих грузовых потоков

Поток	Вид транспорта	Распределение интервалов времени	Распределение размеров групп
M_1	Баржи	$\exp(0,25)$	$U(800; 1\ 000)$
$M_2(t)$	Грузовики	$\exp(4,17)$ с 6:00 до 18:00 и $\exp(6,25)$ с 18:00 до 6:00	$U(30; 35)$
G_1	Морские суда	$N(56; 20)$	$U(30\ 000; 42\ 150)$

Описание работы подсистем. Для описания работы якорных и автомобильной стоянок, ворот и движения внутренних грузовиков, привоза товара на внешних грузовиках применяется 9 многоканальных СМО с отказами (Узлы 1, 3–6, 8, 13, 16 и 19). Функционирование складов моделируется двумя многоканальными СМО с конечными очередями (Узлы 7 и 17). Работа внешних грузовиков, которые вывозят товар из Порта, описывается СМО с переменным числом работающих каналов (Узел 18), их число зависит от смены.

Процесс разгрузки барж и судов на причалах № 1 и № 2 соответственно описывается двумя многоканальными СМО с изменяющейся вместимостью очереди (Узлы 2 и 15). На причале № 4 происходят загрузка судов и отправление их из системы. Для моделирования его работы используется два узла: Узел 9 – многоканальная СМО с конечной очередью – отображает работу конвейерных систем; Узел 10 – одноканальная СМО с изменяющейся вместимостью очереди – судоходного канала. На причале № 3 происходят разгрузка, погрузка судна и его отправление из системы, поэтому применяется три узла (Узлы 11, 12 и 14), аналогичных Узлам 9, 10 и 15.

Таблица 2

Модели работы элементов Порта

Узел	Элемент	Модель	T_i (часы)	X_i (тонны)
1	Якорная стоянка для барж	$M_1^X/G^X/20/0$	$N(0,33; 0,08)$	1 000
2	Причал № 1 для разгружаемых барж	$*/M^X/2/X_1$	$\exp(18,2)$	$U(13; 15)$
3	Внутренние грузовики А	$*/M^X/10/0$	$\exp(5)$	15
4	Автомобильная стоянка	$M_2(t)^X/M^X/25/0$	$\exp(240)$	35
5	Ворота въезда	$*/M^X/2/0$	$\exp(60)$	35
6	Внешние грузовики А	$*/M^X/10/0$	$\exp(12)$	35
7	Открытые склады	$*/M^X/6/240000$	$\exp(21,4)$	$U(13; 15)$
8	Внутренние грузовики Б	$*/M^X/20/0$	$\exp(10)$	15
9 & 11	Конвейерные системы причалов № 4 и № 3	$*/M^X/3/90$	$\exp(60)$	$U(3; 4)$
10	Причал № 4 для исходящих судов	$*/G^X/1/X_{10}$	$N(192; 20)$	$U(35\ 000; 44\ 000)$
12	Причал № 3 для исходящих судов	$*/G^X/1/X_{12}$	$N(192; 20)$	$U(35\ 000; 44\ 000)$
13	Якорная стоянка для судов	$G_1^X/G^X/6/0$	$N(3; 0,5)$	50 000
14 & 15	Береговые краны причалов № 3 и № 2	$*/M^X/3/X_{13}$	$\exp(24)$	$U(13; 15)$
16	Внутренние грузовики В	$*/M^X/20/0$	$\exp(4)$	15
17	Крытые склады	$*/M^X/6/90000$	$\exp(12,5)$	$U(32; 35)$
18	Внешние грузовики Б	$*/M^X/18(27)/0$	$\exp(1)$	35
19	Ворота выезда	$*/M^X/2/0$	$\exp(60)$	35

Таким образом, работа подсистем Порты описывается СеМО с 19 узлами, формальное описание которых в терминах ТМО представлено в табл. 2, где: T_i – распределение времени обслуживания; X_i – распределение размера обслуживаемой группы заявок в канале.

Описание маршрутов движения грузов. Обработка импортных и экспортных товаров в Порту осуществляются отдельными подсистемами. Однако многоцелевой причал № 3 используется для экспорта или импорта, когда причалы № 2 или № 4 заняты. При этом на причале № 3 одновременно обрабатывается только один вид товаров, и импорт имеет приоритет. Для учета этих особенностей в модели, во-первых, маршруты движения заявок могут меняться. Заявки после обслуживания в Узле 8 следуют в Узел 9 и, только если он занят, направляются в Узел 11. Аналогично заявки движутся между Узлами 13, 15 и 14. Во-вторых, между Узлами 11 и 14 имеется связь: если в Узел 14 поступает заявка, то работа Узла 11 блокируется до тех пор, пока Узел 14 не опустеет.

В модели имеется три входящих потока заявок, поэтому к 19 узлам необходимо добавить еще три фиктивных (O_1, O_2, O_3). Следовательно, маршрутная матрица P будет иметь размер 22×22 . Ее элементы определяются как относительные частоты – отношения размера потока грузов, поступающих в отдельную подсистему, к общему объему грузов в одном направлении. Она сильно разрежена и неинформативна, поэтому элементы $P_{i,j} > 0$ представлены в виде весов на рис. 2.

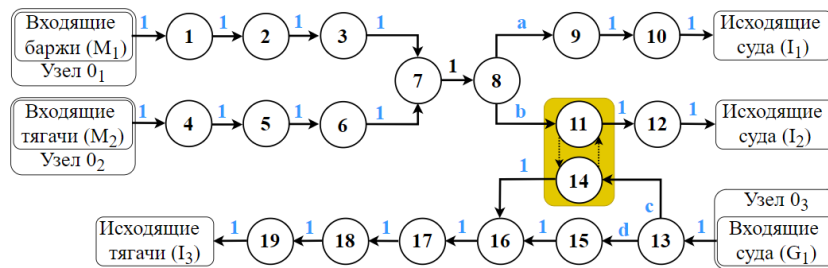


Рис. 2. Схема СеМО работы Порты
Fig. 2. Scheme of the Port's operation

Здесь переменные a, b, c и d принимают значения в зависимости от заполненности Узлов 9 и 15:

$$(a; b) = \begin{cases} (1; 0), E_9(t) \leq F_9(t), \\ (0; 1), E_9(t) > F_9(t), \end{cases} \quad \text{и} \quad (c; d) = \begin{cases} (1; 0), E_{15}(t) > F_{15}(t), \\ (0; 1), E_{15}(t) \leq F_{15}(t), \end{cases} \quad (2)$$

где $E_i(t), F_i(t)$ – размер поступающей группы заявок и число свободных мест в очереди Узла i в момент времени t соответственно.

Таким образом, математическая модель работы порта Куангнинь имеет вид открытой СеМО с тремя неординарными входящими потоками и 22 узлами. Два потока заявок описывают прибытие товаров на баржах и грузовиках, а один – на морских судах. Узлы СеМО отличаются типом, числом каналов и вместимостью очереди. Три из них фиктивные – источники потоков заявок, 13 узлов – стационарные СМО, 6 узлов – управляемые СМО.

3. Вычислительный эксперимент

Получаемая управляемая СеМО слишком сложна для аналитического исследования, поэтому для определения показателей ее эффективности применяется имитационная модель, основанная на дискретно-событийном подходе моделирования и методе Монте-Карло [12]. Она реализована в виде программы, которая предназначена для определения показателей эффективности СеМО различной структуры и сложности, в том числе с наличием управляемых СМО. Программа способна моделировать системы, в которых имеется до 100 узлов и до 50 групповых входящих потоков заявок с учетом изменения их параметров со временем.

С помощью программы выполнено два вычислительных эксперимента. Целью первого была оценка текущей загрузки Порты, а второго – определение максимальной допустимой нагрузки и узких

мест в структуре объекта. Для каждого эксперимента проведено по 10 пусков программы. Виртуальное время моделирования каждого составило 365 дней. Усредненные результаты пусков представлены далее в таблицах и на рисунках, где используются следующие обозначения: m_1 , m_2 и g_1 – общее число групп заявок, поступивших из потоков M_1 , M_2 и G_1 соответственно; K_i – коэффициент использования каналов в узле i ; L_i – средняя длина очереди; b_i – суммарная продолжительность (в часах) блокировки работы всех каналов в узле i ; P_L – вероятность отказа.

Эксперимент 1. В табл. 3–5 и на рис. 3 приведены результаты исследования модели.

Таблица 3

Результаты эксперимента 1

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
K_i	0,015	0,468	0,324	0,001	0,045	0,044	0,564	0,527	0,855	0,993	
L_i	–	199,3	–	–	–	–	4999,4	–	63,3	29776,2	
b_i	1 906,7	344,5	-	1,5	–	–	15 840,1	63 242,2	13 313,7	–	
Узел	11	12	13	14	15	16	17	18	19	P_L	
K_i	0,519	0,908	0,012	0,120	0,612	0,569	0,866	0,866	0,164		
L_i	37,8	24 094,2	–	2 295,4	11 043,1	–	13 461,0	–	–	0	
b_i	5 296,4	–	152,1	1 004,6	1 458,1	177,8	32 068,9	68,5	–		
m_1	2192,4	M_1 (заявок)	1 973 873,8	m_2	45 589,9	M_2 (заявок)	1 481 579,2	g_1	155,2	G_1 (заявок)	5 597 974,8

Представленные в табл. 3 данные используем для проверки адекватности полученной модели, а затем для анализа работы Порта. При проверке сравнивались следующие показатели:

а) m_1 , m_2 и g_1 с количеством прибывших барж (q), внешних грузовиков (e) и морских судов (r) за год соответственно; б) доля заявок, прибывших из каждого потока $m_i^* = m_i / (m_1 + m_2 + g_1)$, $i = \overline{1,3}$, с соответствующими соотношениями объемов грузов с барж (q^*), внешних грузовиков (e^*) и морских судов (r^*); в) средняя длина очереди в Узле 17 (L_{17}) со средним фактическим объемом груза в крытых складах (L^*). Результат проверки представлен в табл. 4. При этом наибольшая относительная погрешность (Δ) составила 0,6%, а средняя 0,4%.

Таблица 4

Результаты проверки адекватности модели

m_1	2 192,4	m_2	45 589,9	g_1	155,2	m_1^*	0,217	m_2^*	0,163	g_1^*	0,620	L_{17}	13 461
q	2 190,0	e	45 670,0	r	156,0	q^*	0,218	e^*	0,164	r^*	0,618	L^*	13 500
Δ (%)	0,1	Δ (%)	0,1	Δ (%)	0,5	Δ (%)	0,5	Δ (%)	0,6	Δ (%)	0,3	Δ (%)	0,3

Теперь проанализируем представленные в табл. 3 результаты. Средняя продолжительность блокировки каналов Узла 1 составляет $b_1 / 2192,4 = 0,87$ ч, что можно интерпретировать как среднее время ожидания отдельной баржи на якорной стоянке, а среднее время ожидания морского судна (Узел 13) – $b_{13} / 155,2 = 0,98$ ч. Согласно регламенту принятия судов в Порту, время ожидания баржи не должно превышать 5, а судна – 10 ч. В противном случае Порт будет оплачивать штраф за простой транспорта. Расчетные значения времени ожидания на якорных стоянках относительно малы, следовательно, Порт эффективно справляется с текущим уровнем работы. Средняя длина очереди в Узле 17 равна $L_{17} = 13 461$, что соответствует заполнению крытых складов на 14,96%. Таким образом, Порт работает в штатном режиме, а его загрузка относительно невелика. Теперь рассмотрим работу порта в течение суток. Наиболее существенные колебания коэффициента использования каналов (K_i , табл. 5), составляющие до 21,5% от среднесуточного значения, наблюдаются в Узле 19 (ворота). Однако его абсолютное значение относительно низкое: $K_{19} < 0,2$, поэтому выездные ворота не препятствуют транспортировке грузов.

На рис 3, а представлено изменение интенсивности поступления потока M_2 (внешних грузовиков) и его влияние на среднюю длину очереди Узла 7 (открытых складов), а на рис 3, б – число

работающих каналов в Узле 18 в зависимости от времени суток и средняя длина очереди Узла 17 (крытых складов). Интерпретируем эти результаты: для открытых складов максимальное отклонение заполненности от среднесуточного значения составляет 2,8%, а для крытых – 5,5%. Следовательно, на складах должен быть запас свободного места в 3 и 6% соответственно, что позволит бесперебойно принимать грузы с судов и барж и нивелировать суточные колебания работы грузовиков.

Таблица 5

Эксперимент 1 – Коэффициент использования каналов в узлах (K_i) по сменам

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
6 ⁰⁰ –18 ⁰⁰	0,016	0,476	0,329	0,001	0,036	0,035	0,520	0,481	0,836	0,992	0,495	0,907	0,011	0,097	0,615	0,558	0,854	0,855	0,127
18 ⁰⁰ –6 ⁰⁰	0,015	0,468	0,324	0,001	0,053	0,052	0,552	0,511	0,860	0,993	0,517	0,908	0,011	0,099	0,619	0,563	0,856	0,854	0,197

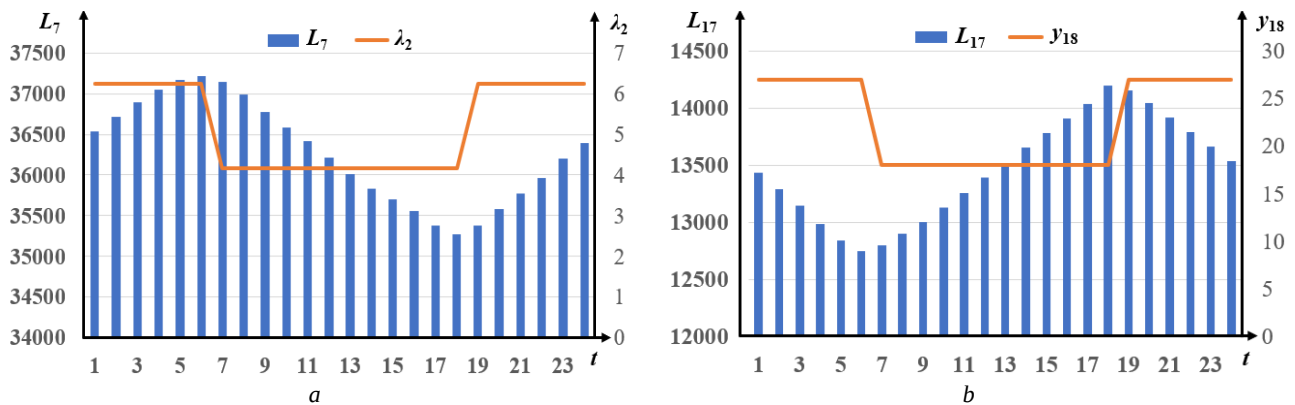


Рис. 3. Эксперимент 1 – Колебание средней длины очереди в Узлах 7 (a) и 17 (b) по часам
Fig. 3. Experiment 1 – Fluctuations in the average queue length in Nodes 7 (a) and 17 (b) by hours

На больших промежутках времени колебания интенсивности поступления и отправления грузов на внешних грузовиках не оказывают существенного влияния на работу системы в целом. Следовательно, далее во время исследования работы Порты при росте грузопотоков достаточно рассмотрения стационарных результатов моделирования.

Эксперимент 2 – прогнозирование работы Порты при увеличении числа прибывающих транспортных средств с грузом. По сравнению с экспериментом 1 интенсивности потоков M_1 и M_2 увеличим с 10 до 80%, а промежуток времени между поступлением заявок в G_1 уменьшим на 10–40%. Также увеличим соответствующим образом интенсивности обслуживания в Узлах 10, 12 и 18 для сохранения баланса между числом прибывающих и отправляющихся групп заявок (транспортных средств). Результаты экспериментов представлены в табл. 6, где: w_1 и w_{13} – средние продолжительности ожидания барж и судов на якорных стоянках соответственно.

Таблица 6

Результаты эксперимента 2

G_1 (%)	M_1, M_2 (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
0	w_1	0,87	1,11	1,30	1,61	1,88	2,55	3,13	4,62	5,52
	w_{13}	0,98	1,31	1,68	1,86	2,07	2,34	2,86	3,10	3,36
10	w_1	0,89	1,07	1,33	1,63	1,91	2,51	2,99	4,51	5,89
	w_{13}	1,81	2,67	2,87	3,16	3,45	3,66	4,05	4,60	5,39
20	w_1	0,92	1,07	1,25	1,57	1,94	2,46	2,99	4,64	5,74
	w_{13}	3,13	3,79	4,24	4,78	5,29	5,85	6,55	7,85	8,79
30	w_1	0,86	1,12	1,33	1,66	1,88	2,50	3,09	4,60	5,75
	w_{13}	7,38	7,71	8,97	9,34	10,57	11,89	13,39	14,67	16,28
40	w_1	0,84	1,11	1,24	1,54	1,95	2,57	3,13	4,55	5,42
	w_{13}	16,23	18,44	19,78	21,24	23,16	24,31	28,90	31,39	35,51

Далее рассмотрим работу Порта вначале при увеличении объемов экспорта и импорта по отдельности, а затем их общий рост.

1. При увеличении интенсивности потоков M_1 и M_2 (экспорт древесной щепы) на 80% число необслуженных заявок из потока M_1 в среднем составляет 994,9 за год, т.е. вероятность отказа становится ненулевой, а $w_1 = 5,52 > 5$ ч (см. табл. 5). Это означает, что Порт перегружен и в моменты пиковой нагрузки не способен вовремя принимать поступающие баржи с грузом.

2. При увеличении интенсивности потока G_1 (корма для животных) на 40% среднее время ожидания судна на якорной стоянке составляет $w_{13} = 16,23 > 10$ ч. Также наблюдается увеличение времени хранения товара на складах до $t_7 = 51,06$ ч, т.е. более двух суток, что недопустимо, так как за данное время корма для животных могут быть испорчены из-за высокой влажности.

3. При увеличении объемов экспорта на 70% и импорта на 30% среднее время ожидания барж составляет $w_1 = 4,60 < 5$ ч, однако для судов $w_{13} = 14,67 > 10$ ч, что недопустимо. Оба этих параметра удовлетворяют требованиям при росте объемов экспорта на 70% и импорта на 20%. Такие значения можно рассматривать в качестве максимальной допустимой нагрузки на систему.

Таким образом, в настоящее время порт Куангнинь имеет запас пропускной способности, который с текущими параметрами работы позволит перегрузить по отношению к уровню 2024 г.: 1) на 70% больше грузов при увеличении только объема экспорта; 2) на 30% больше грузов при увеличении объема импорта; 3) на 70% больше экспортных и на 20% больше импортных грузов при росте обоих грузопотоков. В третьем случае Порт будет перегружать максимально допустимый объем груза, который составляет 12,7 млн т в год.

Узкими местами системы соответственно являются: в случае 1 – береговые краны причала № 1; в случае 2 – береговые краны причала № 2 и внешние грузовики, вывозящие корма для животных; в случае 3 – конвейерные системы и береговые краны на причалах № 2, 3 и 4. Именно из-за недостаточной пропускной способности этих устройств происходит значительный рост времени простоя барж и судов на якорных стоянках. Для устранения этих узких мест, а также повышения эффективности работы всей системы предлагается увеличить скорость обработки грузов конвейерных систем и береговых кранов на 5%. Это потребует относительно небольших финансовых затрат и позволит обработать на 80% больше экспортных и на 30% больше импортных грузов по отношению к уровню 2024 г., т.е. 13,5 млн т в год.

Заключение

В статье предложена методика математического моделирования универсального морского порта, в котором происходит смена технологии погрузки / разгрузки судов в зависимости от типа обрабатываемого товара. Ее отличие от ранее разработанного подхода моделирования транспортных систем заключается в применении управляемой сети массового обслуживания, что позволяет учесть в получаемых моделях возможность выбора альтернативного маршрута движения груза при перегрузке подсистем порта и изменение параметров их работы, которые зависят от смены. С помощью данного математического аппарата возможно в относительно короткие сроки построить модели различных портов, в частности с существенно отличающимся числом причалов и количественным сочетанием разных типов грузов.

Методика апробирована на примере универсального морского порта Куангнинь, который является одним из крупнейших во Вьетнаме. По результатам численного исследования полученной СеМО определены текущая и максимальная загрузки объекта, а также выявлены узкие места в его структуре и даны рекомендации по повышению пропускной способности, что показывает эффективность предложенного модельного подхода.

Перспективным направлением дальнейших исследований является развитие предложенного подхода для описания многопрофильных портовых комплексов, в структуру которых включены различные специализированные терминалы. Последнее, в частности, актуально для Сахалина, где планируется строительство нового портового комплекса на восточном побережье.

Список источников

1. Ботвинов В.Ф. Устройство и оборудование морского порта. М. : РУТ (МИИТ), 2012. 128 с.
2. 2024 Review of maritime transport : United Nations conference on trade and development. URL: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2024_en.pdf (accessed: 15.05.2025).
3. Вишневецкий В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М. : Техносфера, 2003. 512 с.
4. 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. V. 29 (8). P. 741–750. doi: 10.1057/jors.1978.162
5. Roy D., De Koster R. Optimal stack layout configurations at automated container terminals using queuing network models // *Handbook of Terminal Planning* / J.W. Böse (ed.). Springer-Verlag, 2020. P. 437–461. doi: 10.1007/978-3-030-39990-0_19
6. Zhang X., Li H., Wu M. Optimization of resource allocation in automated container terminals // *Sustainability*. 2022. V. 14 (24). Art. 16869. doi: 10.3390/su142416869
7. Roy D., De Koster R., Bekker R. Modeling and Design of Container Terminal Operations // *Operations Research*. 2020. V. 68 (3). P. 686–715. doi: 10.1287/opre.2019.1920
8. Legato P., Mazza R.M. Queueing analysis for operations modeling in port logistics // *Maritime Business Review*. 2020. V. 5 (1). P. 67–83. doi:10.1108/MABR-09-2019-0035
9. Babeli K., Hess S., Hess M. Capacity utilization of the container terminal as multiphase service system // *European Transport*. 2022. V. 86 (4). P. 1–15.
10. Guo S., Wang H., Wang S. Network disruptions and ripple effects: queueing model, simulation, and data analysis of port congestion // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. V. 11 (9). Art. 1745. doi: 10.3390/jmse11091745
11. Kazakov A., Lempert A., Zharkov M. Modeling of a coal transshipment complex based on a queueing network // *Applied Sciences*. 2024. V. 14 (16). Art. 6970. doi: 10.3390/app14166970
12. Лемперт А.А., Жарков М.Л., Казаков А.Л., Ву Х.З. Моделирование морского контейнерного терминала с использованием сети массового обслуживания // *Управление большими системами*. 2024. № 112. С. 310–337.
13. Ву Х.З. Исследование универсального морского порта во Вьетнаме с использованием сети массового обслуживания // *System Analysis & Mathematical Modeling*. 2025. Т. 7, № 1. С. 72–83.
14. Назаров А.А. Управляемые системы массового обслуживания. Томск : Том. гос. ун-т, 1984. 234 с.
15. Полин Е.П., Монсеева С.П., Рожкова С.В. Асимптотический анализ неоднородной системы массового обслуживания $M|M|\infty$ в марковской случайной среде // *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2019. № 47. С. 75–83. doi: 10.17223/19988605/47/9
16. Цициашвили Г.И., Харченко Ю.А. Управляемые системы массового обслуживания со стационарным равномерным распределением // *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2024. № 68. С. 59–65. doi: 10.17223/19988605/68/6

References

1. Botvinov, V.F. (2012) *Ustroystvo i oborudovanie morskogo porta* [Seaport structure and equipment]. Moscow: RUT (MIIT).
2. UNO. (2024) *2024 Review of maritime transport: United Nations conference on trade and development*. [Online] Available from: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2024_en.pdf (Accessed: 15th May 2025).
3. Vishnevsky, V.M. (2003) *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya komp'yuternykh setey* [Theoretical foundations of computer network design]. Moscow: Technosphaera.
4. Edmond, E.D. & Maggs, R.P. (1978) How useful are queue models in port investment decisions for container berths? *Journal of the Operational Research Society*. 29(8). pp. 741–750. DOI: 10.1057/jors.1978.162
5. Roy, D. & De Koster, R. (2020) Optimal stack layout configurations at automated container terminals using queuing network models. In: Böse, J.W. (ed) *Handbook of Terminal Planning*. Springer-Verlag. pp. 437–461. DOI: 10.1007/978-3-030-39990-0_19
6. Zhang, X., Li, H. & Wu, M. (2022) Optimization of resource allocation in automated container terminals. *Sustainability*. 14(24). pp. 16869. DOI: 10.3390/su142416869.
7. Roy, D., De Koster, R. & Bekker, R. (2020) Modeling and Design of Container Terminal Operations. *Operations Research*. 68(3). pp. 686–715. DOI:10.1287/opre.2019.1920
8. Legato, P. & Mazza, R.M. (2020) Queueing analysis for operations modeling in port logistics. *Maritime Business Review*. 5(1). pp. 67–83. DOI:10.1108/MABR-09-2019-0035
9. Babeli, K., Hess, S. & Hess, M. (2022) Capacity utilization of the container terminal as multiphase service system. *European Transport*. 86(4). pp. 1–15.
10. Guo, S., Wang, H. & Wang, S. (2023) Network disruptions and ripple effects: queueing model, simulation, and data analysis of port congestion. *Journal of Marine Science and Engineering*. 11(9). pp. 1745. DOI: 10.3390/jmse11091745
11. Kazakov, A., Lempert, A. & Zharkov, M. (2024) Modeling of a coal transshipment complex based on a queueing network. *Applied Sciences*. 14(16). pp. 6970. DOI: 10.3390/app14166970
12. Lempert, A.A., Zharkov, M.L., Kazakov, A.L. & Vu, H.G. (2024) Modeling of a sea container terminal using a queueing network. *Upravlenie bol'shimi sistemami – Large-scale Systems Control*. 112. pp. 310–337.
13. Vu, H.G. (2024) A study on universal seaport in Vietnam using queueing network. *System Analysis & Mathematical Modeling*. 7(1). pp. 72–83.

14. Nazarov, A.A. (1984) *Upravlyayemye sistemy massovogo obsluzhivaniya* [Controlled Queuing Systems]. Tomsk: TSU.
15. Polin, E.P., Moiseeva, S.P. & Rozhkova, S.V. (2019) Asimptotic analysis of heterogeneous queuing system $M|M|_{\infty}$ in a Markov random environment. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 47. pp. 75–83. DOI: 10.17223/19988605/47/9
16. Tsitsiashvili, G.Sh. & Kharchenko, Yu.N. (2024) Controlled queuing systems with a stationary uniform distribution. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 68. pp. 59–65. DOI: 10.17223/19988605/68/6

Информация об авторах:

Казаков Александр Леонидович – профессор, профессор РАН, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук (Иркутск, Россия); профессор Института информационных технологий и анализа данных Иркутского национального исследовательского технического университета (Иркутск, Россия). E-mail: kazakov@icc.ru

Жарков Максим Леонидович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук (Иркутск, Россия). E-mail: zharkm@mail.ru

Ву Хоанг Занг – аспирант Института информационных технологий и анализа данных Иркутского национального исследовательского технического университета (Иркутск, Россия). E-mail: giangtrang14022016@gmail.com

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Kazakov Alexander L. (Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation; Professor, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation). E-mail: kazakov@icc.ru

Zharkov Maxim L. (Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation). E-mail: zharkm@mail.ru

Vu Giang Hoang (Post-Graduate Student, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation). E-mail: giangtrang14022016@gmail.com

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию 11.06.2025; принята к публикации 02.09.2025

Received 11.06.2025; accepted for publication 02.09.2025