

MODELING THE OPTIMAL SEAPORT CONFIGURATION**A. V. Vasin, D. S. Zakharov, L. V. Annenkov**Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

Ports play one of the most important roles in the whole transport system, being a complex technological multi-link system designed to change the type of transport in the shortest possible time and at the best prices. Several different configurations of the seaport terminal for ships service (handling operations) are compared in the paper. As an example, data on the schedule of ship calls to the seaport "St. Petersburg" are used. To simulate and analyze the optimality of various port terminal configurations, the following models of queuing systems are used: single-channel with failures, multichannel with failures and multichannel with a limited queue length. The flow of vessels arriving at the port is considered as an incoming flow of applications, as serving channels. The existing works on this topic are analyzed in the paper.

For a large port, such as the St. Petersburg seaport, the service probability is calculated, thereby confirming the inexpediency of choosing a single-channel queuing system, and at given input data, the best option is identified namely a multi-channel queuing system. In addition, the calculations to estimate the required number of service channels (for the given statistics on the St. Petersburg seaport terminal operation) are made and the average waiting time of a vessel in the terminal queue is calculated. The software calculations are performed using the Maple mathematical package. The algorithms for calculating the required number of channels in two cases (with failures and with a limited queue length) of multi-channel queuing systems are presented in the paper.

Keywords: queuing system, seaport, ship call schedule, seaport terminal, service channels, terminal queue

For citation:

Vasin, Andrei V., Dmitrii S. Zakharov, and Leonid V. Annenkov. "Modeling the optimal seaport configuration." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.4 (2019): 662–669. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-662-669.

УДК 519.872.6**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ МОРСКОГО ПОРТА****А. В. Васин, Д. С. Захаров, Л. В. Анненков**ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Отмечается, что в транспортной системе порт играет одну из важнейших ролей, являясь сложной технологически многозвенной системой, предназначенной для смены вида транспорта в кратчайшие сроки и по оптимальным ценам. Сравниваются несколько различных конфигураций терминала морского порта для обслуживания (оказания погрузочно-разгрузочных работ) судов. В качестве примера используются данные о графике судозаходов в морской порт «Санкт-Петербург». Для моделирования и анализа оптимальности различных конфигураций терминала порта использовались следующие модели систем массового обслуживания: одноканальная с отказами, многоканальная с отказами и многоканальная с ограниченной длиной очереди. В качестве входящего потока заявок в представленной работе рассматривается поток приходящих в порт судов в качестве обслуживающих каналов. Выполнен анализ существующих на эту тему работ. Для большого порта, такого, как морской порт «Санкт-Петербург» была вычислена вероятность обслуживания, тем самым подтверждена нецелесообразность выбора одноканальной системы массового обслуживания, а при заданных входных данных был выявлен оптимальный вариант – многоканальная система массового обслуживания с очередью. Кроме того, в работе выполнены вычисления для оценки необходимого количества каналов обслуживания (для приведенной статистики работы терминала морского порта «Санкт-Петербург») и вычислено среднее время ожидания судна в очереди терминала. Программные вычисления были выполнены с помощью математического пакета Maple. В работе представлены алгоритмы для вычисления необходимого количества каналов в двух случаях: с отказами и с ограниченной длиной очереди многоканальных систем массового обслуживания.

Ключевые слова: система массового обслуживания, морской порт, график судозаходов, терминал морского порта, каналы обслуживания, очередь терминала

Для цитирования:

Васин А. В. Моделирование оптимальной конфигурации морского порта / А. В. Васин, Д. С. Захаров, Л. В. Анненков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 662–669. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-662-669.

Введение (Introduction)

Существует большой класс транспортных систем, работу которых сложно изучить аналитическими способами, но которые легко поддаются изучению с помощью использования методов статистического моделирования. К таким системам можно отнести морской порт, представив его в виде системы массового обслуживания (СМО).

В транспортной системе порты занимают одно из важных мест как сложные технологически многозвенные подсистемы, предназначенные для смены вида транспорта в кратчайшие сроки и по конкурентным ценам. В таких транспортных подсистемах, как правило, всегда имеют место непроизводительные простои судов и груза [1]. Существует ряд работ, таких, например, как [2] и [3], в которых авторы в процессе рассмотрения различных моделей пытаются определить, какая из конфигураций порта является наиболее оптимальной в той или иной ситуации. Все модели СМО формируются из небольшого набора элементов: канал, источник заявок, очередь, заявка, дисциплина обслуживания, что позволяет имитировать эти задачи типовым образом.

Как отмечается в работе [4], зачастую в деятельности по обслуживанию портов существует дисбаланс, обусловленный многими факторами, такими как количество погрузочно-разгрузочного оборудования, расположение обслуживающего персонала и масштаб погрузочно-разгрузочных работ. Например, если количество машин будет недооценено, это приведет к тому, что товар не будет разгружен вовремя, а это уже влечет за собой финансовые потери. И если будет слишком много погрузочно-разгрузочного оборудования, то это приведет к ненужной трате финансовых и материальных ресурсов.

Для работы портов характерным является поток входных заявок от судов, поступающих в порт на производство погрузочно-разгрузочных работ (ПРР). В соответствии с этими заявками суда могут ставиться для производства ПРР на один из нескольких причалов порта, образующих причальный фронт. Эксплуатационная деятельность порта, связанная с обработкой судов, может условно (схематично) рассматриваться как функционирование локальной СМО, предназначенной для обслуживания транспортных судов по случайно возникающим запросам [5].

В случае моделирования работы морского порта в качестве основных рассматриваются следующие характеристики:

- количество судозаходов в день;
- среднее время обслуживания суда;
- среднее время ожидания обслуживания;
- необходимое количество мест для ожидания;
- необходимое количество мест для обслуживания.

Актуальной задачей является поиск оптимальных вариантов использования ресурсов транспортных систем, таких как порт. В данной статье рассматривается один из подобных вариантов с применением теории СМО.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В статье использованы следующие обозначения, наиболее часто применяемые в работах как [6]–[8]:

- λ — интенсивность входящего потока заявок (судов);
- μ — интенсивность обслуживания заявок (судов);

t — время обслуживания;

t_1 — среднее время пребывания заявки в очереди (при наличии очереди);

p_0 — вероятность того, что все каналы свободны;

ρ — приведенная интенсивность, нагрузка СМО;

P_{obs} — вероятность обслуживания;

n — количество каналов;

m — длина очереди;

$L_{оч}$ — среднее число заявок в очереди.

Рассмотрим работу морского порта на основе графика судозаходов в порт «Санкт-Петербург». В таблице приведен фрагмент данных источника [9], откуда видно, что среднее время обслуживания составляет 52 ч, а количество судозаходов в день — 12.

График судозаходов в порт «Санкт-Петербург»

№ п/п.	Название	Время захода	Время выхода
1	«Меркс Джафна»	02.04.2019 04:22	04.04.2019 11:19
2	«Энни»	02.04.2019 04:30	03.04.2019 23:44
3	«Сормовский-53»	02.04.2019 04:50	03.04.2019 11:31
4	«Финнсан»	02.04.2019 08:12	03.04.2019 01:00
5	«Несс»	02.04.2019 08:14	04.04.2019 23:12
6	«Солонг»	02.04.2019 08:46	02.04.2019 20:52
7	«Газпромнефть Зюйд-Ист»	02.04.2019 09:09	05.04.2019 19:59
8	«Леди Нора»	02.04.2019 09:15	05.04.2019 11:14
9	«Русич-11»	02.04.2019 11:33	05.04.2019 22:44
10	«Газпромнефть Зюйд»	02.04.2019 15:00	03.04.2019 10:37
11	«Василий Шукшин»	02.04.2019 19:25	05.04.2019 21:55
12	«Пола Анатолия»	02.04.2019 19:50	21:31

На рис. 1 представлена гистограмма, отражающая среднее время нахождения одного судна в порту «Санкт-Петербург». На ней статистика приведена по месяцам. Время обслуживания зависит от следующих факторов: размер судна и сложность выполнения погрузочно-разгрузочных работ, количество приходящих в порт единиц техники и, как следствие, время ожидания обслуживания. Кроме того, навигация не прекращается круглый год и зимой, в ледовых условиях, проводка судов осуществляется ледоколами, что также увеличивает время обслуживания.

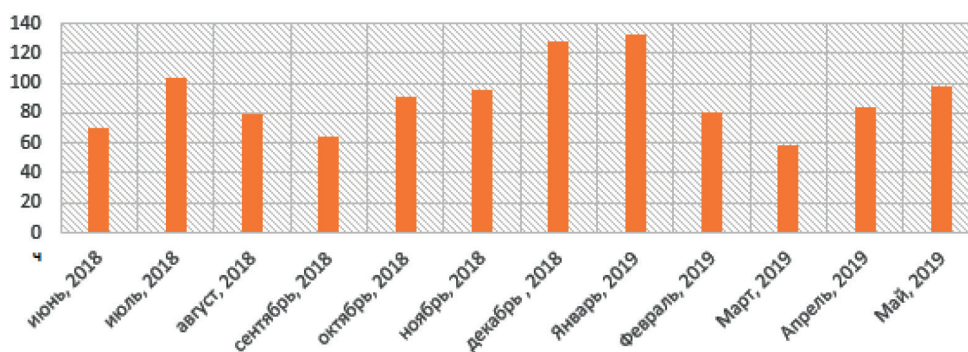


Рис. 1. Среднее время обслуживания одного танкера в часах (июнь 2018 г. – май 2019 г.)

Технологический процесс обслуживания судна включает ряд событий:

1. Погрузочно-разгрузочные работы.
2. Дополнительные операции у причала (крепление груза, перешвартовка и др.).
3. Необходимый интервал времени между подходами судов.

Вначале следует рассчитать вероятность обслуживания судов в простейшем случае — одноканальная СМО с отказами. Для этого необходимо воспользоваться следующими формулами:

$$\mu = \frac{1}{t}; \quad (1)$$

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}; \quad (2)$$

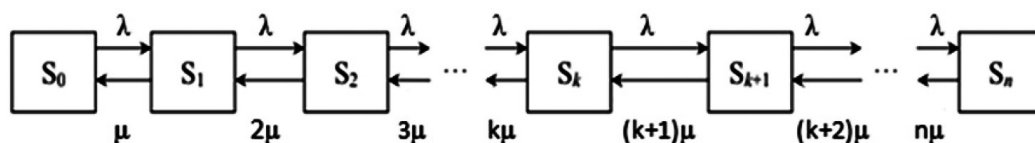
$$p = \frac{1}{1 + \rho}. \quad (3)$$

Для многоканальных СМО рассмотрим два случая:

- многоканальные СМО с отказами,
- многоканальные СМО с ограниченной очередью.

На рис. 2 приведены графы соответствующих систем. В каждом из представленных типов систем в качестве потока входящих заявок λ выступают прибывающие в порт суда, интенсивность обслуживания заявки (судна) равна μ . Состояние S_0 означает, что все каналы свободны, состояние S_k — обслуживанием заявок заняты k каналов, состояние S_n — все каналы заняты. Состояние S_{n+1} в первом случае будет означать отказ, во втором — начало очереди. Для системы с ограниченной очередью отказы начинаются в случае занятости всех мест в очереди.

а)



б)

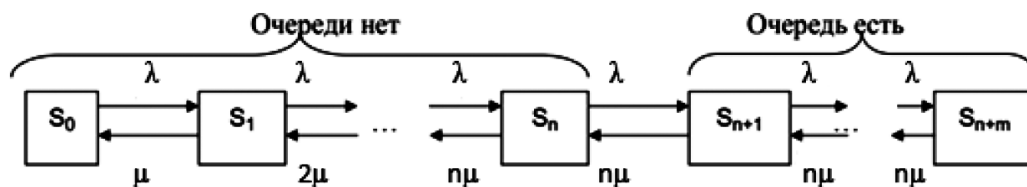


Рис. 2. Многоканальные СМО: а — с отказами; б — с ограниченной очередью

Необходимо рассчитать оптимальное число обслуживающих каналов в порту для случаев с наличием / отсутствием мест ожидания. Схемы таких моделей приведены на рис. 3.

Расчет вероятности обслуживания для случая многоканальной СМО с отказами выполняется по следующим формулам:

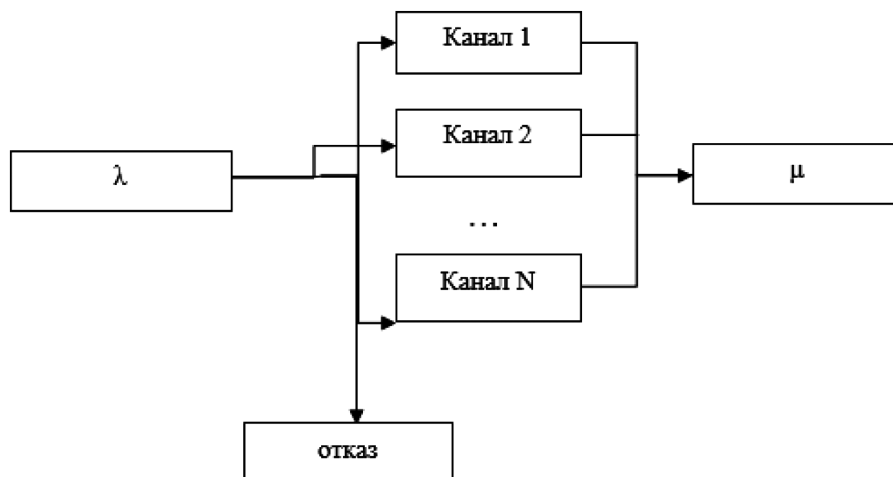
$$p_0 = \left(\sum_{i=1}^n \frac{\rho^i}{i!} + 1 \right)^{-1}; \quad (4)$$

$$P_{\text{obs}} = 1 - \frac{\rho^n}{n!} p_0. \quad (5)$$

Расчет вероятности обслуживания для случая многоканальной СМО с очередью выполняется согласно приведенной формуле:

$$P_{\text{obs}} = 1 - \frac{\rho^{n+m}}{n!n^m} p_0. \quad (6)$$

а)



б)

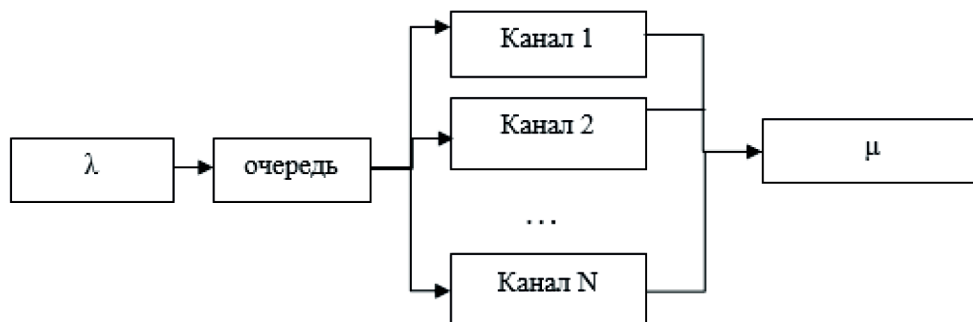


Рис. 3. Схема многоканальной СМО с отказами (а), с очередью (б)

Поиск оптимального количества каналов для обоих случаев выполнен в системе Maple, аналогично представленным в работе [10] вычислениям:

while Pobs<0.99 do;

p0:=evalf($\left(\sum_{i=1}^n \frac{\rho^i}{i!} + 1\right)^{-1}$):

Pobs:=evalf($1 - \frac{\rho^n}{n!} \cdot p_0$):

n:=n+1: od:

n;

Аналогично для случая с очередью:

while Pobs<0.99 do

p0:=evalf($\left(\sum_{i=1}^n \frac{\rho^i}{i!} + 1\right)^{-1}$):

Pobs:=evalf($1 - \frac{\rho^{n+m}}{n!n^m} \cdot p_0$):

n:=n+1: od:

n.

Среднее число заявок в очереди определяется по следующей формуле:

$$L_{\text{оч}} = M(m) = \left(\sum_{i=1}^m i p_{n+i} \right)^{-1}. \quad (7)$$

Среднее время пребывания заявки в очереди находится по следующей формуле:

$$t_l = \frac{L_{\text{оч}}}{\lambda}. \quad (8)$$

Результаты (Results)

При рассмотрении одноканальной СМО получим вероятность обслуживания $p = 0,037$. Очевидно, что в данном случае большая часть заявок не будет обслужена. Для того, чтобы обеспечить обслуживание всех судов в случае СМО с отказами, требуется не менее 73 каналов. На рис. 4 показан график, отображающий среднее время нахождения заявок в очереди в соответствии с ранее приведенными данными о времени обслуживания одного судна при фиксированном количестве судозаходов в месяц.

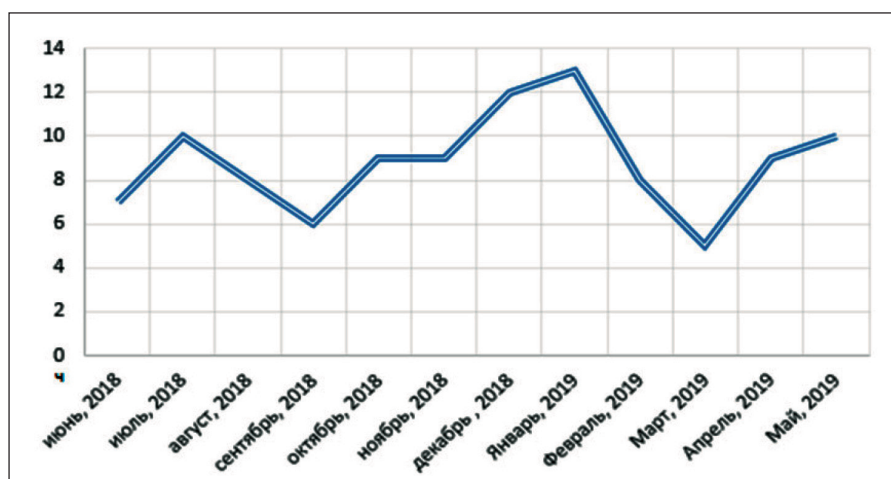


Рис. 4. Среднее время нахождения одного танкера в очереди, ч

Обсуждение (Discussion)

Полученные результаты не противоречат другим работам по моделированию транспортных систем, выполненным как с помощью теории массового обслуживания [11], так и с помощью методов имитационного моделирования [12].

Для обеспечения обслуживания судов в случае многоканальной СМО с очередью количество необходимых каналов может быть сокращено на количество мест ожидания. Рациональность выбора соотношения каналов обслуживания к местам ожидания может быть определена в зависимости от стоимости и допустимого времени ожидания в очереди. При принятии решений управленческого характера всегда существует несколько вариантов, но экономически целесообразно выбрать оптимальный.

Критерии оптимальности:

- производительность;
- среднее время ожидания судов в очереди;
- постоянное время обслуживания судов или время обслуживания, изменяющееся по показательному закону;
- себестоимость погрузки единицы массы груза;
- количество погрузочно-разгрузочного оборудования, занятого перегрузкой груза на причале.

Заключение (Conclusion)

Проведенное исследование показало, что с помощью модели СМО с очередью можно спроектировать необходимую конфигурацию порта на основе статистической информации о количестве приходящих судов в единицу времени, длительности и стоимости обслуживания судна.

Качество аналитического исследования должно удовлетворять двум основным требованиям:

- реалистическому описанию изучаемой системы;
- модель должна быть простой для ее эффективного использования.

Критерием качества погрузочно-разгрузочных работ, проводимых на судах, является математическое ожидание числа простаивающих судов. Информационные технологии предоставляют инструмент для прогнозирования эффективности управления портовых операций на причальных фронтах порта. Компьютерные программы для проведения экспериментов с моделями, описывающими процесс функционирования причальных фронтов порта, можно включить в состав экспертных систем поддержки принятия решений для администрации морских портов [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Устинов В. В. Системный анализ технологических процессов погрузо-разгрузочных работ в порту на примере эксплуатации нефтеналивного причала / В. В. Устинов, Г. А. Зеленков // Транспортное дело России. — 2012. — № 3. — С. 58–62.
2. Agerschou H. Planning and design of ports and marine terminals / H. Agerschou, I. Dand, T. Ernst, H. Ghooos, O. J. Jensen, J. Korsgaard, J. Land, S. T. McKay, H. Oumeraci, J. B. Peterson, L. R. Schmidt, H.L. Svendsen. — 2nd Edition. — London: Thomas Telford Ltd, 2004. — 72 p.
3. Alvarez J. F. A methodology to assess vessel berthing and speed optimization policies / J. F. Alvarez, T. Longva, E. S. Engebretsen // Maritime Economics & Logistics. — 2010. — Vol. 12. — Is. 4. — Pp. 327–346. DOI: 10.1057/mel.2010.11.
4. Понятовский В. В. Основные технологические требования к морским портам / В. В. Понятовский. — М.: ТРАНСЛИТ, 2014. — 288 с.
5. Аблязов К. А. Использование информационных технологий для анализа моделей, описывающих процесс функционирования причальных фронтов порта / К. А. Аблязов, Э. К. Аблязов // Эксплуатация морского транспорта. — 2017. — № 1 (82). — С. 22–29.
6. Лаврусь О. Е. Теория массового обслуживания / О. Е. Лаврусь, Ф. С. Миронов. — Самара: Самарская государственная академия путей сообщения, 2002. — 40 с.
7. Фетисов В. А. Исследование и реализация оптимального варианта работы портовой логистической системы с использованием имитационных моделей систем массового обслуживания / В. А. Фетисов, Н. Н. Майоров // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 3 (69). — С. 3–7.
8. Маликова Т. Е. Модель массового обслуживания импортного грузопотока с применением технологии предварительного информирования / Т. Е. Маликова, А. А. Янченко, И. Н. Вольнов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 280–287. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-280-287.
9. Судозаходы в порты РФ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://portcall.marinet.ru/table/> (дата обращения: 01.06.2019).
10. Васин А. В. Многоканальные системы массового обслуживания на примере передачи голосового трафика на водном транспорте / А. В. Васин, Д. С. Захаров // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». — СПб.: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 2018. — С. 81–86.
11. Кузнецов А. Л. Моделирование работы морского грузового фронта / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, Д. А. Зайкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 33–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-33-42.
12. Schepler X. Global planning in a multi-terminal and multi-modal maritime container port / X. Schepler, S. Balev, S. Michel, É. Sanlaville // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2017. — Vol. 100. — Pp. 38–62. DOI: 10.1016/j.tre.2016.12.002.

REFERENCES

1. Ustinov, V., and G. Zelenkov. “System analysis of technological processes of loading and unloading at the port on the example of oil-loading terminal operation.” *Transport business of Russia* 3 (2012): 58–62.

2. Agerschou, H., I. Dand, T. Ernst, H. Ghoo, O. J. Jensen, J. Korsgaard, J. Land, S. T. McKay, H. Oumeraci, J.B. Peterson, L. R. Schmidt, and H.L. Svendsen. *Planning and design of ports and marine terminals*. 2nd Edition. London: Thomas Telford Ltd, 2004.
3. Alvarez, J. Fernando, Tore Longva, and Erna S. Engebretsen. "A methodology to assess vessel berthing and speed optimization policies." *Maritime Economics & Logistics* 12.4 (2010): 327–346. DOI: 10.1057/mel.2010.11.
4. Ponyatovskii, V. V. *Osnovnye tekhnologicheskie trebovaniya k morskim portam*. M.: TRANSLIT, 2014.
5. Ablyazov, K. A., and E. K. Ablyazov. "Usage of information technology for an analysis of models describing process of a functionality of berth fronts of the port." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1(82) (2017): 22–29.
6. Lavrus', O.E., and F.S. Mironov. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya*. Samara: Samarskaya gosudarstvennaya akademiya putei soobshcheniya, 2002.
7. Fetisov, V. A., and N. N. Maiorov. "Research and realization of an optimum variant of work of port logistical system, using imitating models of systems of mass service." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(69) (2012): 3–7.
8. Malikova, Tatiana E., Anna A. Yanchenko, and Igor N. Volnov. "The model of massive handling cargo flow for import with the use of preliminary informing technology." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.2 (2017): 280–287. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-280-287.
9. Sudozakhody v porty RF. Web. 1 June 2019 <<https://portcall.marinet.ru/table/>>.
10. Vasin, A. V., and D. S. Zakharov. "Mnogokanal'nye sistemy massovogo obsluzhivaniya na primere peredachi golosovogo trafika na vodnom transporte." *Sbornik nauchny statei natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S.O.Makarova»*. SPb.: FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S. O. Makarova», 2018. 81–86.
11. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Dmitrii A. Zaikin. "Simulation of the sea cargo front operation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 33–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-33-42.
12. Schepler, Xavier, Stefan Balev, Sophie Michel, and Éric Sanlaville. "Global planning in a multi-terminal and multi-modal maritime container port." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 100 (2017): 38–62. DOI: 10.1016/j.tre.2016.12.002.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Васин Андрей Васильевич —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: VasinAV@gumrf.ru
Захаров Дмитрий Сергеевич — аспирант
Научный руководитель:
Васин Андрей Васильевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: dmit.zakharov@gmail.com, kaf_pm@gumrf.ru
Анненков Леонид Владимирович — аспирант
Научный руководитель:
Васин Андрей Васильевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: annenkov89@mail.ru, kaf_pm@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vasin, Andrei V. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: VasinAV@gumrf.ru
Zakharov, Dmitrii S. — Postgraduate,
Supervisor:
Vasin, Andrei V.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: dmit.zakharov@gmail.com, kaf_pm@gumrf.ru
Annenkov, Leonid V. — Postgraduate,
Supervisor:
Vasin, Andrei V.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: annenkov89@mail.ru, kaf_pm@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 11 июня 2019 г.
Received: June 11, 2019.