

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-17-34

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR THE PROBABILISTIC ASSESSMENT OF ANNUAL THROUGHPUT OF THE MARINE LOADING COMPLEX OF THE EXPORT COAL TERMINAL

N. V. Kuptsov¹, A. L. Kuznetsov², A. V. Shatilin¹

¹ — Gazprom Neft PJSC, St Petersburg, Russian Federation

² — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St Petersburg, Russian Federation

The probabilistic assessment (using stochastic methods) of the design annual capacity of the marine loading complex of specialized coal export sea ports and terminals, the technological loading and unloading operations of which are carried out by high-performance conveyor transport is considered in the study. This task is complex and covers the various topics: technological processes of the fleet and port equipment, operational and technical characteristics of sea port transshipment complexes and the commercial fleet. The object of research is the technological processes of marine fleet operation and modern marine export coal terminal using conveyor mechanization. Marine loading complex is defined as the boundaries, as the key and most complex technological zone of the terminal. Subject of the study is stochastic modeling methods for obtaining the functional range of results of probabilistic estimation of marine loading complex throughput. In the paper, the type of model and its logic are substantiated, the structure of the model with the composition and the elements interconnection is formed, the boundaries of the model are designated, the probability distributions of the initial parameters are determined, a computational algorithm for the model of probabilistic assessment of the annual capacity of marine loading complex is developed, a computational experiment with model is performed. As a result of the research, the main goal has been achieved - a stochastic model for the probabilistic assessment of throughput of marine loading complex of coal export terminals has been created and approved. The scientific newness of the study is that for the first time for specialized export coal terminals a methodology for probabilistic estimation of marine loading complex throughput using stochastic modeling has been developed. The stochastic modeling allows you to increase the accuracy and correspondence of the designed throughput of marine loading complex to the real cargo turnover of operating coal terminals. Stochastic modeling of transport systems opens up new possibilities in terms of solving scientific, technological design problems and has a high research potential. For logistics and technical systems, the developed stochastic model has the potential to be applied for optimization of inefficient processes and throughput increase.

Keywords: seaports, coal sea terminals, marine loading complex, ship loading operations, technological design of seaports, stochastic modeling, probabilistic assessment.

For citation:

Kuptsov, Nikolay V., Aleksandr L. Kuznetsov, and Andrey V. Shatilin. "Development of a model for the probabilistic assessment of annual throughput of the marine loading complex of the export coal terminal." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 17–34. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-17-34.

УДК 05.22.19

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ МОРСКОГО ГРУЗОВОГО ФРОНТА ЭКСПОРТНОГО УГОЛЬНОГО ТЕРМИНАЛА

Н. В. Купцов¹, А. Л. Кузнецов², А. В. Шатилин¹

¹ — ПАО «Газпром нефть», Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Исследование посвящено вероятностной оценке стохастическими методами проектной пропускной способности морского грузового фронта (МГФ) для специализированных угольных экспортных морских

портов и терминалов, технологические погрузочно-разгрузочные операции которых выполняются высокопроизводительным конвейерным транспортом. Данная задача является комплексной и затрагивает различные аспекты: технологические процессы работы флота и портового оборудования, эксплуатационно-технические характеристики морских портовых перегрузочных комплексов и коммерческого флота. Объектом исследования являются технологические процессы работы морского флота и современного морского экспортного угольного терминала с применением конвейерной механизации. Границами определён МГФ как ключевая и наиболее сложная технологическая зона терминала. Предметом исследования являются методы стохастического моделирования, направленные на получение функционального диапазона результатов вероятностной оценки пропускной способности МГФ. В статье выполнено обоснование типа модели и ее логики, сформирована структура модели с составом и взаимосвязями элементов, обозначены границы модели, определены распределения вероятности исходных параметров, разработан расчетный алгоритм модели вероятностной оценки пропускной способности МГФ, выполнен расчетный эксперимент с моделью. В результате проведенных исследований достигнута основная цель: создана и апробирована методика стохастического моделирования для вероятностной оценки пропускной способности МГФ угольных экспортных терминалов. Научная новизна исследования состоит в том, что в рамках исследования впервые для специализированных экспортных угольных терминалов разработана методика вероятностной оценки пропускной способности МГФ с применением стохастического моделирования, которое позволяет увеличить точность и соответствие пропускной способности МГФ реальному грузообороту эксплуатируемых угольных терминалов. Стохастическое моделирование транспортных систем открывает новые возможности с точки зрения решения прикладных задач и обладает высоким исследовательским потенциалом. Для логистических и технических систем разработанная методика обладает потенциалом для применения с целью оптимизации неэффективных процессов и увеличения пропускной способности.

Ключевые слова: морские порты, угольные морские терминалы, морской грузовой фронт, судопогрузочные операции, технологическое проектирование морских портов, стохастическое моделирование, вероятностная оценка.

Для цитирования:

Купцов Н. В. Разработка модели вероятностной оценки пропускной способности морского грузового фронта экспортного угольного терминала / Н. В. Купцов, А. Л. Кузнецов, А. В. Шатилин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 17–34. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-17-34.

Введение (Introduction)

В соответствии с нормами технологического проектирования морских портов¹ результат расчетов пропускной способности морского грузового фронта (МГФ) фиксируется детерминированной величиной, т. е. одним численным значением. Полученный в таком виде результат зачастую сильно занижает возможности и потенциал грузооборота экспортных терминалов, что способствует появлению взаимного недоверия между научно-проектным сообществом (исполнителем) и промышленными компаниями (заказчиком). Во многом это связано с необходимостью использования коэффициентов «технического незнания» [1]: простая причала по метеорологическим факторам — $K_{мет}$, перехода от технической к эксплуатационной производительности — K_c , занятости причалов обработкой судов — $K_{зан}$. Получается, что существующая нормативная база в области технологических решений морских портов оперирует аналитическим методом моделирования, позволяющим получать дискретные результаты. Выполняется перемножение средних значений расчетных параметров, результатом расчета является единственное значение, что приводит к получению приблизительных консервативных результатов. Существующее противоречие формирует научную проблему отсутствия современных качественных методов определения пропускной способности МГФ портовых терминалов, удовлетворяющих потребности вводимых в Российской Федерации к 2030 г. объектов. Это стимулирует разработку и развитие новых методов моделирования, в том числе стохастических. Стохастические модели расчета позволяют учитывать влияние нескольких параметров и получить диапазон результатов как наиболее вероятный базовый вариант развития событий (вероятность P50 — вероятность 50 %, от англ. «Prob-

¹ СП 350.1326000.2018 «Нормы технологического проектирования морских портов». Введ. 01.09.2018.

ability»), а также оптимистическую (вероятность P10) и пессимистическую (вероятность P90) оценки целевых значений грузооборота. Вероятностный подход предусматривает учет влияния неопределенности оценки каждого из исходных параметров уравнения подсчета, т. е. возможность их увеличения или уменьшения, и по полученным диапазонам неопределенностей позволяет получать широкий диапазон результатов.

В работах отечественных и зарубежных авторов по тематике современных морских портов значительное внимание уделено исследованиям контейнерных терминалов. Касательно угольных навалочных терминалов существует небольшое количество публикаций и наработок различных направлений и специализаций, что обусловлено относительной давностью данного направления. В то же время радикально изменившаяся технико-экономическая и коммерческая среда требует нового подхода, который в полной мере в существующих работах не отображен.

Наибольший вклад в решение научных задач, связанных с деятельностью угольных экспортных терминалов, внесли иностранные специалисты: V. H. Barros [2], U. S. Bugaric [3], T. A. Van Vianen [4]–[6], A. J. A. Kleinheerenbrink [7], H. Ligteringen [8], T. A. Robenek [9], C. A. Thorensen [10], N. Umang [11]. В международном научном сообществе существуют различные школы: в Нидерландах (Delft University of Technology) исследуют навалочные терминалы в качестве комплексной взаимосвязанной технологической системы, в Австралии (The University of Newcastle TUNRA Bulk Solids) большее внимание уделяют исследованиям оборудования для перевалки и транспортировки потока груза, в Южной Кореи (Pohang University of Science and Technology) внимание акцентировано на составлении расписаний и планирование операций судов-балкеров.

Среди работ отечественных ученых существует ограниченное количество исследований о навалочных терминалах, среди которых необходимо выделить работы Я. Б. Спасского [12], [13], посвященные повышению эффективности управления перегрузочными процессами и математическому имитационному моделированию навалочных терминалов. Исследованием общих вопросов моделирования и технологических процессов ненавалочных терминалов проводилось следующими авторами: И. О. Бондаревой [14], С. С. Павленко [15], В. А. Погодиным [16], А. Л. Степановым [17], А. А. Хановой [18]. Большие исследования по моделированию процессов контейнерных терминалов выполнены в работах А. Л. Кузнецова, А. В. Кириченко, А. Д. Семенова и В. Н. Щербаковой-Слюсаренко [19]–[23], что позволяет сформировать базис для проведения подобных исследований для навалочных угольных терминалов.

Российские исследователи в большей степени рассматривают фундаментальные задачи функционирования морских терминалов, в то время как зарубежные в качестве объекта изучения выбирают численные методики моделирования и расчетов как отдельных технологических зон (МГФ, складская зона, железнодорожный грузовой фронт), так и терминалов в целом. Вероятностная оценка грузопотоков стохастическими методами моделирования находится на ранних стадиях проработок некоторых авторов, что связано с недавним возникновением направления и развитием программного обеспечения в течение последних десятилетий.

Стохастическое моделирование базируется на использовании статистических технологий, наиболее распространенной из которых является *моделирование методом Монте-Карло*. В процессе моделирования из произвольной выборки значений вероятностного распределения данных для каждого параметра выполняется подстановка в заданное уравнение подсчета. Цикл повторяется многократно, что позволяет построить график вероятностного распределения результатов. В мировой практике стохастическое моделирование является актуальной современной методикой, применяемой для вероятностной статистической оценки характеристик сложных динамических систем в различных сферах деятельности. В качестве научного направления стохастическое моделирование интенсивно развивается при инвестиционной оценке проектов и риск-менеджменте, а также при решении прикладных задач различных отраслей: аэрокосмическая отрасль, сельское хозяйство, банковская сфера, строительство, армия, спорт, медиапространство, окружающая среда, медицина, фармацевтика, безопасность, юриспруденция, недвижимость, продажи, телекоммуникации, энергетика, страхование, нефтегазовая отрасль. В за-

рубежной практике наблюдается рост интереса к стохастическому моделированию, в частности, транспортно-логистические вероятностные исследования выполняют зарубежные университеты: Technical University of Denmark, Ohio State University и Pennsylvania State University, при этом в российском научном и проектном сообществе данная методика не распространена.

Целью исследования является увеличение точности и соответствия расчетной пропускной способности МГФ реальному грузообороту эксплуатируемых экспортных угольных терминалов. Основной научной гипотезой, которая находится в основе данного исследования, служит положение о том, что для решения этой сложной научной задачи создание и апробация методики стохастического моделирования позволят повысить качество результатов, что, в свою очередь, обеспечит конкурентоспособность портов и эффективность логистических цепочек поставок угля. Достижение сформулированной цели предполагает решение следующих частных задач исследования:

- разработка логики, структуры и состава элементов модели вероятностной оценки пропускной способности МГФ методами стохастического моделирования;
- разработка методики вероятностной оценки пропускной способности МГФ с применением стохастического моделирования, рекомендаций по ее использованию и средствам доказательства адекватности модели.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В статье выполнена разработка модели вероятностной оценки пропускной способности морского грузового фронта (МГФ) угольных экспортных терминалов, использующих конвейерную механизацию. Помимо моделирования использованы следующие методы:

- для формирования технологической схемы МГФ выполнен анализ нормативных, публицистических и научных источников; глубинный анализ (Data Mining) судопогрузочного оборудования и характеристик судов-балкеров; проектной документации российских терминалов: эксплуатируемых «Ростерминалуголь» и «Дальтрансуголь», проектируемых перспективных «Таманский терминал навалочных грузов» и «УППК Север»;
- для формирования распределений вероятности выполнен анализ судопогрузочных циклов при эксплуатации существующих современных терминалов по экспортной перевалке угля, анализ производственной статистики и таймшитов терминала «Дальтрансуголь»;
- при составлении вероятностной модели применялись анализ и аппроксимация подходов к стохастическим методам моделирования и вероятностной оценки из смежных областей науки, а именно: подсчет запасов в нефтегазовой отрасли [24], оценка надежности инженерных систем [25], расчет электрических нагрузок сложных систем [26].

Для дальнейшего моделирования составлена технологическая схема МГФ, выбраны технологическая схема и характеристики оборудования. Технологическая схема представляет симбиоз существующих в Российской Федерации высокопроизводительных угольных терминалов «Ростерминалуголь» (Усть-Луга) и «Дальтрансуголь» (Ванино). Во второй половине 2010–2020 гг. указанные терминалы имели схожесть в производительности конвейерного оборудования и годовых грузооборотах при существовании некоторых различий (благодаря двустороннему глубоководному пирсу терминал «Дальтрансуголь» может принимать суда Capesize дедвейтом до 150 000–180 000 т). Выбранная универсальная технологическая схема МГФ, где складская зона не входит в границы моделирования (рис. 1), имеет следующие характеристики:

- эксплуатационная производительность конвейерного оборудования 3500 т/ч (конвейерно-транспортная система, реклаймеры, СПМ);
- дискретный тип одностороннего причала с двумя местами для швартовки судов и двумя координатными СПМ;
- приемка судов дедвейтом 25 000–185 000 т;
- целевой пропускная способность МГФ порядка 20 млн т/год грузооборота.

Применение подобной технологической схемы обладает преимуществами с точки зрения верификации полученных при исследовании результатов с фактическим грузооборотом эксплу-

атируемых терминалов «Ростерминалуголь» и «Дальтрансуголь», а также она является типовой для перспективных планируемых в будущем терминалов Российской Федерации.

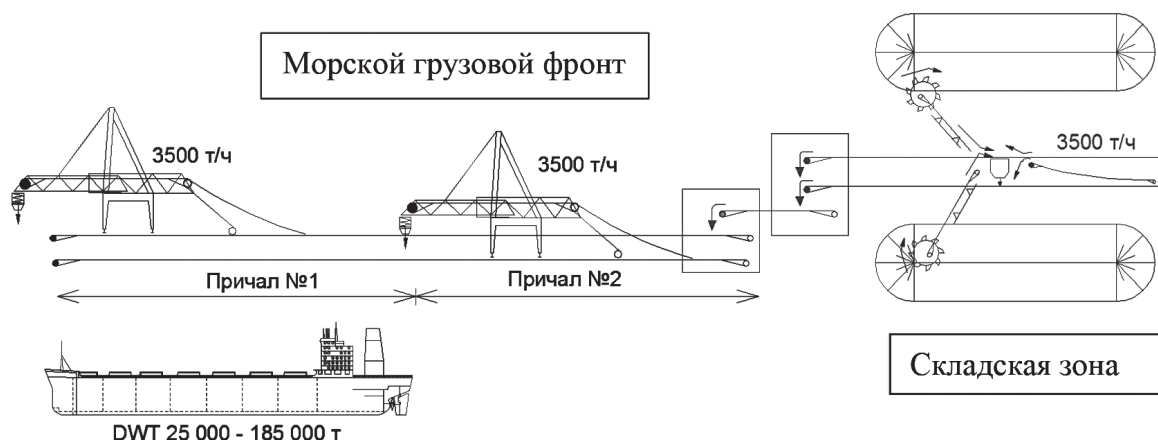


Рис. 1. Технологическая схема МГФ для выполнения моделирования

Для формирования распределения вероятностей входящих в модель исходных данных выполнены анализ и обработка следующей производственной статистики терминала «Дальтрансуголь»:

- статистика по простоям МГФ;
- распределение результатов МГФ (грузооборот, судозаходы) по тоннажным группам;
- средняя загрузка судов по тоннажным группам;
- распределение между судами с нормальной и ограниченной погрузкой;
- судовые партии судов с нормальной и ограниченной осадкой.

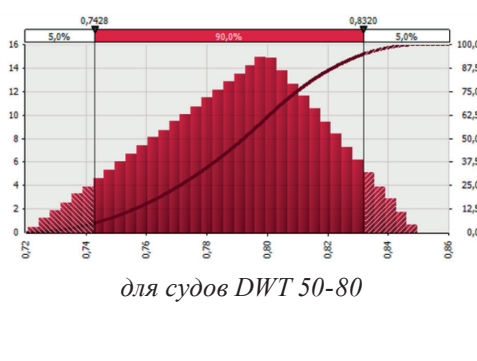
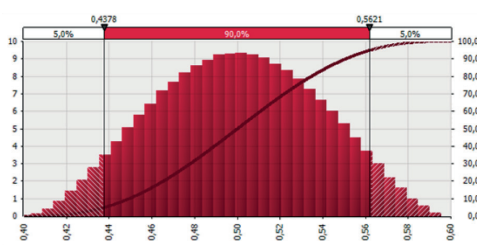
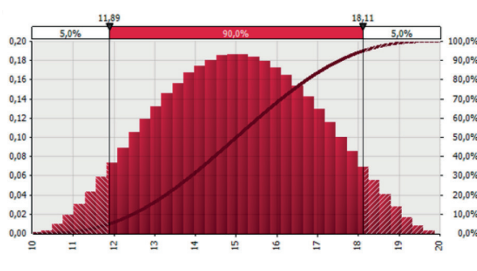
Сформированы допущения по распределениям вероятности параметров фонда рабочего времени, цикла судопогрузочных операций и судозоборота. На основе результатов обработки производственной статистики выполнена оценка минимального, среднего и максимального значений каждого параметра. Была выполнена проверка корректности подбора распределений по пяти критериям: информационный критерий Акайке, информационный критерий Байеса, статистика хи-квадрат, статистика Колмогорова – Смирнова, статистика Андерсона – Дарлингга. В итоге для большинства параметров выбраны треугольное или PERT распределения, что связано с имеющейся статистической выборкой и выполненной проверкой. В табл. 1 в качестве примера представлены распределения вероятности параметров для части исходных данных внутри цикла судопогрузочных операций.

Таблица 1

Распределение вероятностей параметров внутри цикла судопогрузочных операций

№ п/п.	Наименование параметра	Распределение вероятности	Графическое отображение
1	Судовая партия судов с нормальной осадкой, т	распределение Pert: – DWT 10–25: мин. 17900, ср. 18800, макс. 19300; – DWT 25–50: мин. 31800, ср. 32900, макс. 34800; – DWT 50–80: мин. 61300, ср. 63700, макс. 65400; – DWT 80–120: мин. 77600, ср. 80540, макс. 82500; – DWT >120: мин. 133900, ср. 146100, макс. 158500	 для судов DWT 50-80

Окончание табл. 1

2	Наполненность трюма с ограниченной осадкой, %	треугольное распределение – DWT 10–25: мин. 77 %, ср. 80 %, макс. 83 % – DWT 25–50: мин. 70 %, ср. 81 %, макс. 85 % – DWT 50–80: мин. 72 %, ср. 80 %, макс. 85 % – DWT 80–120: мин. 71 %, ср. 78 %, макс. 84 % – DWT >120: мин. 78 %, ср. 80 %, макс. 82 %	 для судов DWT 50-80
3	Подход к причалу, ч; швартовка, ч; отшвартовка, ч; отход от причала, ч	распределение Pert: мин. 0,4; ср. 0,5; макс. 0,6 %	
4	Скорость перемещения СПМ между трюмами, м/мин	распределение Pert: мин. 10, ср. 15, макс. 20	

Для формирования алгоритма вычислений модели в качестве первого шага подготовлена детерминированная модель определения пропускной способности терминала, в которой однозначно определены расчетная логика, последовательность операций и учтены все факторы, скрытые в коэффициентах «инженерного незнания». Затем на основе детерминированной модели сформирована стохастическая модель, учитываются распределения параметров.

Модель состоит из трех взаимозависимых модулей:

- фонда рабочего времени;
- судопогрузочных операций;
- пропускной способности.

Элементы внутри расчетных модулей обладают связями, которые влияют на пропускную способность МГФ. Общая блок-схема связей элементов модели представлена на рис. 2.

В рамках модуля «Фонд рабочего времени» (рис. 3) вычисляется доступное время работы СПМ. Для его вычисления из максимально теоретически возможного фонда рабочего времени вычитаются суммы времени простоев СПМ по различным факторам:

$$T_{\text{раб}} = T_{\text{max}} - T_{\text{пр}},$$

T_{max} — максимально возможный фонд рабочего времени, ч;

$T_{\text{пр}}$ — сумма простоев (неуправляемые и управляемые), ч.

В рамках модуля «Судопогрузочные операции» (рис. 4) определяется длительность цикла судопогрузочных операций, зависящая от судовой партии, подготовительных операций на рейде, маневровых операций в акватории, производственных операций по погрузке угля в судно, операций по оформлению документации при нахождении судна у причала.

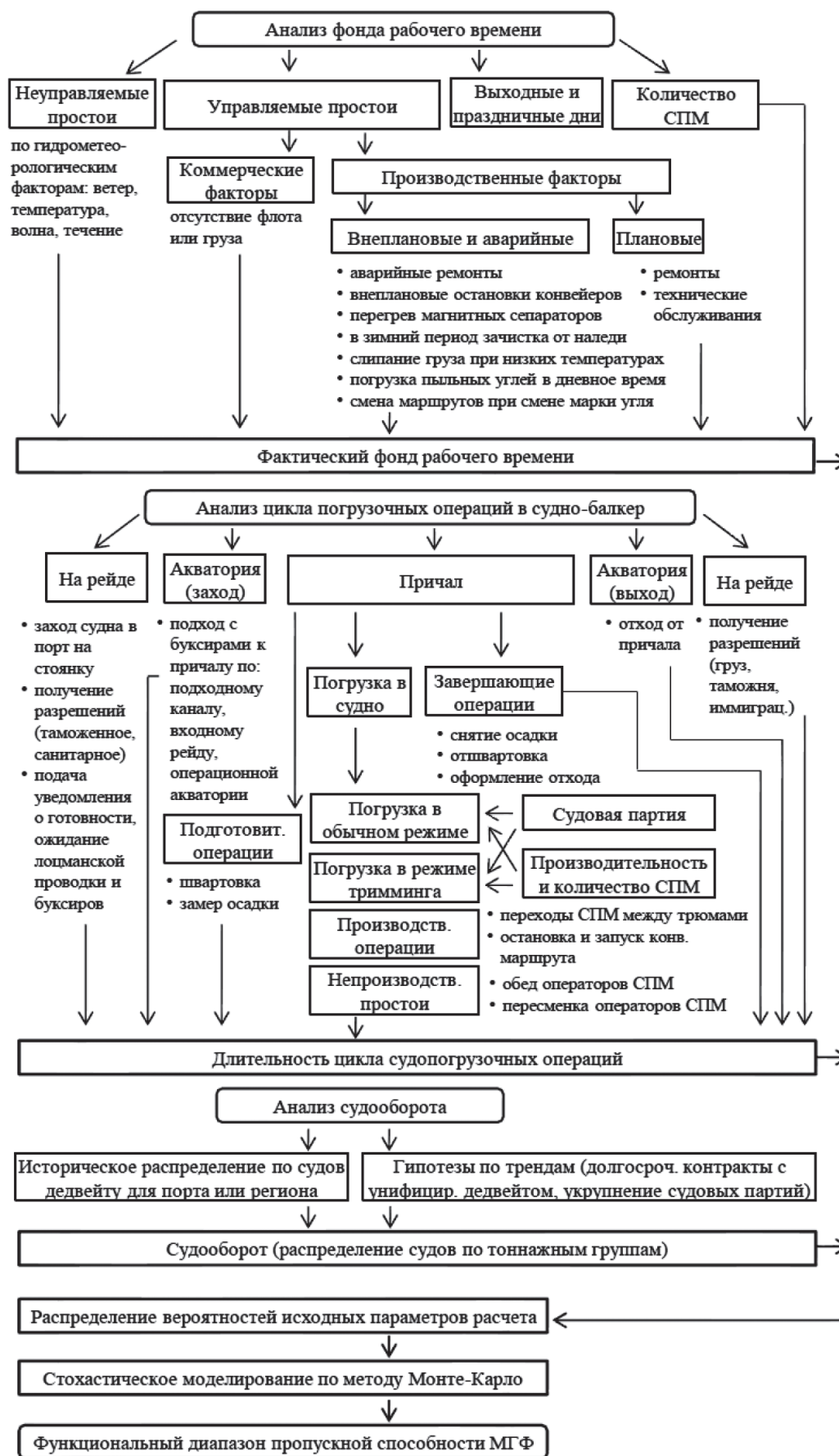


Рис. 2. Блок-схема модели вероятностной оценки пропускной способности МГФ

Максимально возможный фонд рабочего времени (на одну СПМ)

8 760 ч/год

Количество СПМ

2 шт

Максимально возможный фонд рабочего времени (все СПМ)

17 520 ч/год

1	Неуправляемые простои							
а	Простой метео (непогода + ледовая обстановка), лето-весна	6	мес	х	☐	ч =	☐	ч
б	Простой метео (непогода + ледовая обстановка), зима	6	мес	х	☐	ч =	☐	ч
2	Управляемые простои							
2.1	Коммерческие факторы							
а	Отсутствие флота, лето-весна	6	мес	х	☐	ч =	☐	ч
б	Отсутствие флота, зима	6	мес	х	☐	ч =	☐	ч
в	Отсутствие груза	12	мес	х	☐	ч =	☐	ч
2.2	Производственные факторы							
2.2.1	Плановые							
а	Плановые ремонты (СПМ, конвейеров)	5	мес	х	☐	ч =	☐	ч
б	Плановые технические обслуживания	7	мес	х	☐	ч =	☐	ч
2.2.2	Внеплановые и аварийные							
а	Аварийные ремонты (СПМ, конвейеров)	да/нет	х	☐	ч =	☐	ч	
б	Внеплановые остановки конвейеров (некорректный ход ленты; перегревы; перекос ленты; сработал тяговый шнур)	12	мес	х	☐	ч =	☐	ч
в	Перегрев магнитов	7	мес	х	☐	ч =	☐	ч
г	В зимний период доп. зачистки от наледи (барабаны и др.)	6	мес	х	☐	ч =	☐	ч
д	Сползание угля при низких температурах	4	мес	х	☐	ч =	☐	ч
е	Смена маршрутов при смене марки угля	12	мес	х	☐	ч =	☐	ч
ж	Погрузка пыльных углей (в дневное время), лето-весна-осень	8	мес	х	☐	ч =	☐	ч
з	Погрузка пыльных углей (в дневное время), зима	4	мес	х	☐	ч =	☐	ч
ИТОГО фонд рабочего времени:								☐ ч

Рис. 3. Модуль
«Фонд рабочего времени»

При этом наибольшую длительность занимает погрузка на судно, выполняемая в режимах обычной погрузки и тримминга, при этом производительность СПМ снижается при переходах между трюмами и простоях из-за необходимых действий операторов СПМ (обед, пересменка). Длительность цикла судопогрузочных операций определяется по формуле

$$T_{\text{судопогр}} = T_{\text{рейд}} + T_{\text{подх}} + T_{\text{шварт}} + T_{\text{погр}} + T_{\text{пр}} + T_{\text{отх}}$$

где $T_{\text{судопогр}}$ — длительность цикла судопогрузочных операций, ч;

$T_{\text{рейд}}$ — длительность подготовительных операций оформления на рейде, ч;

$T_{\text{подх}}$ — длительность подхода по подходному каналу в сопровождении буксиров и швартовки, ч;

$T_{\text{погр}}$ — длительность погрузки угля в судно, учитывая длительность обычной погрузки, тримминга, обедов и пересменок операторов СПМ, ч;

$T_{\text{пр}}$ — длительность отшвартовки и операций по оформлению у причала (снятие осадки, оформление отхода портнадзором), ч;

$T_{\text{отх}}$ — длительность отхода по каналу в сопровождении буксиров, ч.

Внутри модуля «Пропускная способность» (рис. 5) необходимо задать доли судов каждой тоннажной группы. Затем выполняется расчет судозаходов и пропускной способности:

$$P_{\Gamma} = \sum_{j=1}^m P_{\Gamma j} = T_{\text{раб}} \sum_{j=1}^m \frac{A_j D_j}{T_{\text{судопогр } j}},$$

где $\sum P_{\Gamma j}$ — сумма пропускных способностей для всех тоннажных групп судов, т/год;

A_j — доля расчетных судов типа j в общем объеме грузооборота, %;

D_j — судовая партия судна типа j , т;

$T_{\text{судопогр}}$ — длительность цикла судопогрузочных операций для расчетных судов типа j , ч.

Характеристики судов		DWT 10-25		DWT 25-50		DWT 50-80		DWT 80-120		DWT >120		
		норм.	огранич.	норм.	огранич.	норм.	огранич.	норм.	огранич.	норм.	огранич.	
	Дедвейт, т	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	
	Длина (LOA), м	159	159	185	159	215	159	230	159	270	159	
	Длина между трюмами (LOH), м	132	132	154	132	178	132	191	132	224	132	
	Количество трюмов, шт	5	5	5	5	7	7	7	7	9	9	
	Расстояние между трюмами, м	33	33	38	33	30	22	32	22	28	16	
	Судовая партия, т	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	Наполненность трюма	-	○	-	○	-	○	-	○	-	○	
Цикл погрузки судов												
а	На рейде: заход судна в порт на стоянку, ч						0					
б	На рейде: получение разрешений (таможенное, санитарное), ч						0					
в	На рейде: Подача уведомления о готовности, ожидание лоцмана/буксиров, ч						0					
г	Акватория: подход к причалу, ч	○		○		○		○		○		
д	Причал: швартовка, ч	○		○		○		○		○		
е	Причал: замер осадки (initial draught survey) ч	○		○		○		○		○		
Погрузка в судно												
Производительность обычной погрузки в судно, т/ч		○		○		○		○		○		
Судовая партия обычной погрузки, %		95%	80%	96%	80%	97%	80%	97%	80%	97%	80%	
Партия, т		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Судовая партия на каждую СПМ, т		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
ж	Длительность обычной погрузки, ч	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Производительность тримминга, т/ч		○		○		○		○		○		
Судовая партия тримминга, %		5%	20%	4%	20%	3%	20%	3%	20%	3%	20%	
Партия, т		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Судовая партия тримминга на каждую СПМ, т		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
и	Длительность тримминга, ч	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Время на непроизводственные операции СПМ												
1) Переходы между трюмами												
Количество подходов к каждому трюму, шт.		○		○		○		○		○		
Количество трюмов на каждую СПМ, шт.		2,5	2,5	2,5	2,5	3,5	3,5	3,5	3,5	4,5	4,5	
Скорость перемещения СПМ между трюмами, м/мин		○		○		○		○		○		
Остановка конвейрного маршрута, мин		○		○		○		○		○		
Время на одно раскрепление СПМ, мин		○		○		○		○		○		
Время на одно перемещение между трюмами, мин		○		○		○		○		○		
Время на одно закрепление СПМ, мин		○		○		○		○		○		
Запуск конвейрного маршрута		○		○		○		○		○		
Итого, мин:		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
к	Итого время на переходы между трюмами, ч	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
2) Обед операторов СПМ (30 мин, 2 раза в день)												
Обедов в течение цикла судопогрузочных операций, шт.		○		○		○		○		○		
л	Длительность обедов, ч	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
3) Пересменка операторов СПМ (30 мин, 2 раза в день)												
Пересменок в течение цикла судопогрузочных операций, шт.		○		○		○		○		○		
м	Длительность пересменок, ч	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
н	Причал: Снятие осадки (final draught survey)	○		○		○		○		○		
п	Причал: Отшвартовка	○		○		○		○		○		
р	Причал: Оформление отхода портнадзором	○		○		○		○		○		
с	Акватория: отход от причала	○		○		○		○		○		
т	На рейде: получение разрешений (cargo documents issuing/clearance, custom, immigration), ч						0					
Длительность цикла судопогрузочных операций, ч		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

Рис. 4. Модуль
«Судопогрузочные операции»

	Доля по тоннажным группам, %	Суда с нормальной и ограниченной осадкой		Пропускная способность, т/год
		Норм.	Огранич	
DWT 10-25	☐	72,5% ☐ шт.	27,5% ☐ шт.	☐
DWT 25-50	☐	70% ☐ шт.	30% ☐ шт.	☐
DWT 50-80	☐	75% ☐ шт.	25% ☐ шт.	☐
DWT 80-120	☐	90% ☐ шт.	10% ☐ шт.	☐
		ИТОГО: ☐ шт.		☐

Рис. 5. Модуль
«Пропускная способность»

Таким образом, в детерминированном варианте последовательного алгоритма вычислений сформирован расчетный алгоритм модели расчета пропускной способности МГФ экспортного угольного терминала. Сформированная функционально-логическая целостность позволяет, применив программный продукт @Risk, выполнить стохастическое моделирование с использованием распределений вероятности расчетных параметров.

В процессе моделирования для каждого параметра, который может принимать любое значение в соответствии с описанным статистическим законом (вероятностным распределением), выполняется подстановка в заданное уравнение подсчета, описанного математической моделью. Цикл повторяется многократно, результат каждой итерации фиксируется. Итогом становится распределение вероятностей возможных последствий. Моделирование по методу Монте-Карло дает гораздо более полное представление о возможных событиях, позволяя оценить не только результат, но и вероятности такого исхода. Для параметров, оказывающих влияние на пропускную способность МГФ, заданы распределения вероятности, а также отражены причинно-следственные закономерности. Благодаря этому сформирована стохастическая модель пропускной способности МГФ экспортного угольного терминала. В разработанной модели выполнены эксперименты, результаты которых представлены далее.

Результаты (Results)

Моделирование методом Монте-Карло для каждого эксперимента выполнено в 5000 перерасчетов-итераций (рис. 6), что позволяет благодаря генерации случайных чисел в каждом из «прогнозов» получить усредненные результаты. При вероятностном расчете модель непрерывно пересчитывается на каждой из итераций.

В каждой итерации расчетная модель пересчитывается с новым набором исходных параметров, что приводит к новым значениям результатов. Результат каждой итерации фиксируется, что позволяет благодаря собранной статистике в итоге сформировать графическое распределение вероятных результатов (оптимистичных, средних, пессимистичных) и выполнить анализ чувствительности параметров, наиболее оказывающих влияние на результат.

Выполнен эксперимент с условным терминалом, приближенным по параметрам к существ-

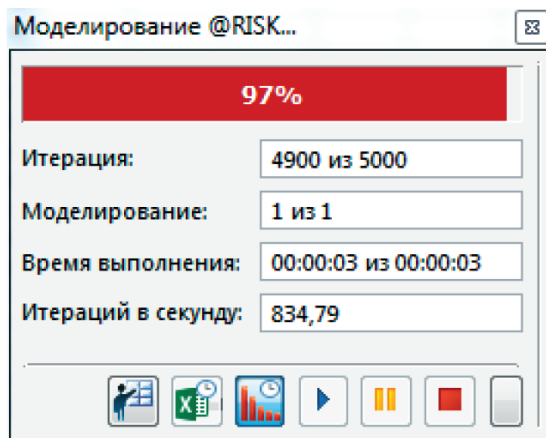


Рис. 6. Моделирование
методом Монте-Карло

вующему терминалу «Дальтрансуголь». Терминал расположен в порту Ванино, для отгрузки в суда используется глубоководный пирс. Ситуационный план терминала и МГФ представлен на рис. 7.

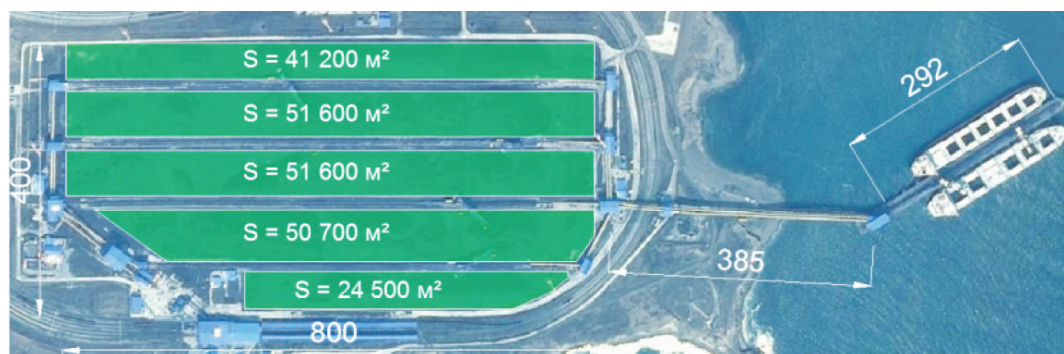


Рис. 7. Ситуационный план терминала «Дальтрансуголь»

В целом моделируемую систему можно охарактеризовать следующим образом. МГФ экспортного угольного терминала выполняет перевалку грузов в суда-балкеры дедевейтом до 220 000 т с помощью двух СПМ, производительность каждой из которых составляет 3500 т/ч (производительность соответствует заполнению 75% черпаков на колесе реклаймера). Наиболее распространенными тоннажными группами судов являются 50 000–80 000 т и 80 000–120 000 т, обеспечивающие по 40 % грузооборота каждая. Для 25 % судов выполняется отгрузка неполной судовой партии в связи с конструктивными особенностями или ограничениями по осадке у причала. Для экономии дорогостоящего времени стоянки у причала оформление судов выполняется на рейде. Из-за климатического расположения, терминал подвержен длительному зимнему периоду с не всегда пригодными для погрузки гидрометеорологическими условиями. Периодически возникает простой судопогрузочных операций, когда складская зона (СЗ) не может в полной мере обеспечить необходимое количество груза для МГФ. В некоторые суда выполняется отгрузка различных марок угля в соответствии с потребностью покупателя и контрактными обязательствами. Выполнено стохастическое моделирование в соответствии с логикой модели и исходными параметрами, приведенным в разделе «Методы и материалы».

С точки зрения квантильной оценки результатов медиане x_2 (50 % квантиль) соответствует пропускная способность 20, 47 млн т/год, а квантилям x_1 (25 % квантиль) = 22,81 млн т/год и x_3 (75 % квантиль) = 17,96 млн т/год. Интегральная кривая квантильной оценки представлена на рис. 8.

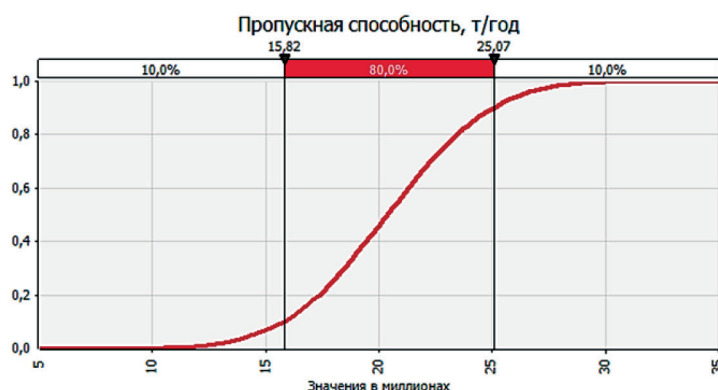


Рис. 8. Интегральная кривая

При этом для выборки в 100 итераций (лет) при 95 % доверительном интервале нижний лимит пропускной способности составит 19,69 млн т/год и верхний лимит 21,10 млн т/год — узкий

интервал указывает на точную оценку. Получается, что при генерировании случайных исходных параметров в итоге средним результатом (вероятность P50, медиана) для моделируемого терминала «Дальтрансуголь» является пропускная способность 20,47 млн т/год, оптимистичным (P10) — 24,94 млн т/год, пессимистичным (P90) — 15,75 млн т/год. Диапазон полученных результатов является адекватным, принимая во внимание фактические значения грузооборота от 17,0 млн т в 2015 г. до 20,1 млн т в 2018 г. Плотность вероятности пропускной способности МГФ приведена на рис. 9.

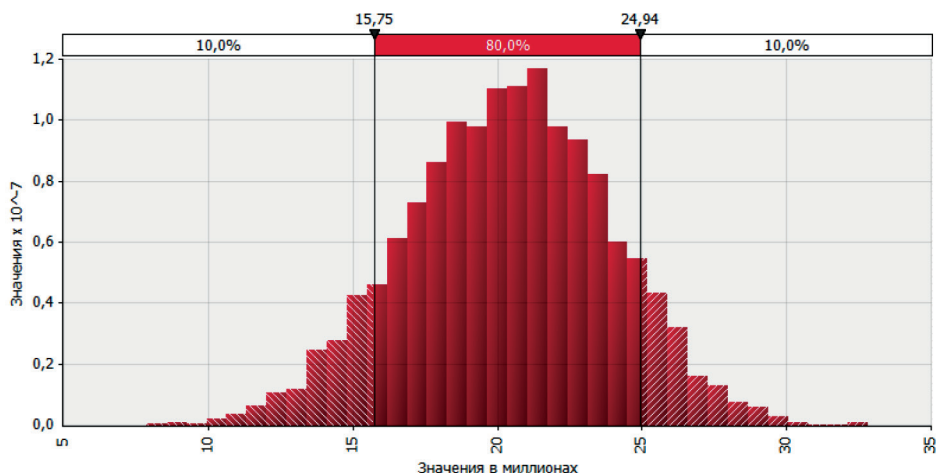


Рис. 9. Плотность вероятности пропускной способности МГФ

Влияние на возможность выполнения судопогрузочных операций оказывает расчетный фонд рабочего времени. Для двух СПМ максимальное теоретическое время работы 17 520 ч/год, что недостижимо в реальности в связи с неуправляемыми простоями в связи с метеоусловиями и управляемыми производственными простоями. При выполнении стохастического моделирования получены следующие значения фонда рабочего времени (рис. 10): среднее (P50) — 7 449 ч, оптимистичное (P90) — 9 071 ч, пессимистичное (P10) — 5 728 ч.

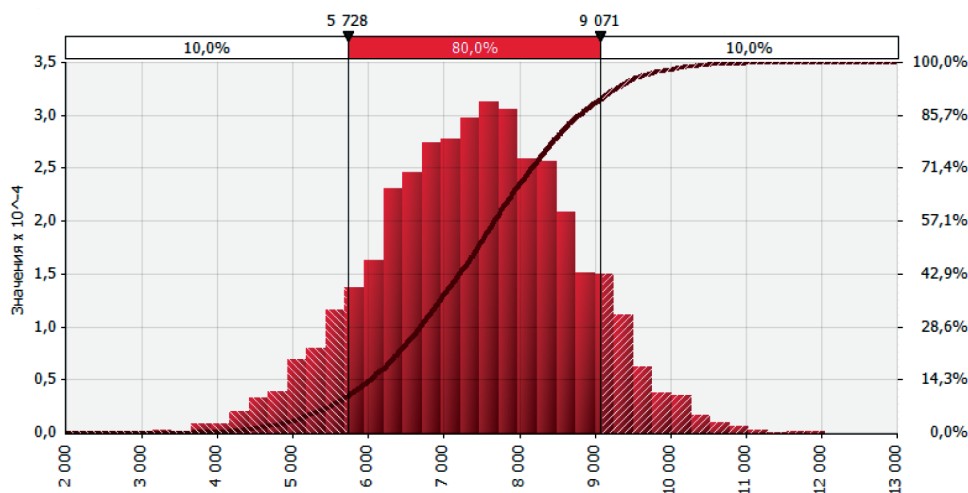


Рис. 10. Фонд рабочего времени

Чтобы оценить степень влияния исходных параметров, построен график чувствительности к изменению параметров, позволяющий определить как меняется результат пропускной способности в зависимости от варьирования значения основных входных параметров. При анализе графика определены наиболее влияющие на результат параметры. График чувствительности представлен на рис. 11.

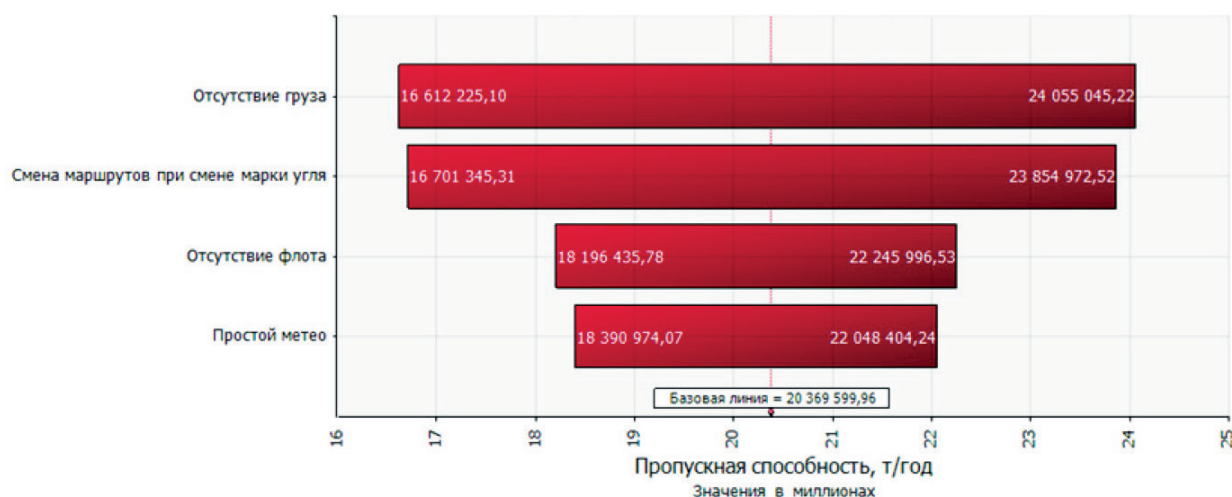


Рис. 11. Анализ чувствительности

Наибольшее влияние на результат оказывают операции, во время которых МГФ простаивает в длительном ожидании. К таковым относятся отсутствие груза в СЗ (влияние на результаты $\pm 3,8$ млн т/год), смена конвейерных маршрутов при смене марки угля ($\pm 3,6$ млн т/год), отсутствие флота ($\pm 2,0$ млн т/год), простои по метеоусловиям ($\pm 2,0$ млн т/год). Простои по метеоусловиям относятся к неуправляемым параметрам, в то время как терминал может улучшать эффективность при воздействии на управляемые простои, связанные с наличием угля, заблаговременным заключением контрактов коммерческого флота, накоплением резервных судовых партий в СЗ.

Обсуждение (Discussion)

По результатам выполненных экспериментов и анализа результатов стохастического моделирования выполнена проверка модели, при этом было отмечено следующее.

В целом результаты экспериментов позволяют сделать вывод, что поведение разработанной в исследовании стохастической математической модели достаточно точно совпадает с поведением моделируемых объектов. Модель позволяет с уверенностью определить свойства системы экспортной перевалки угольных грузов через МГФ с получением диапазона результатов пропускной способности МГФ, что и требуется от прогнозирования результатов при помощи модели. Таким образом, установлена *адекватность* модели.

Разработанная модель вероятностной оценки пропускной способности МГФ экспортных угольных терминалов с высокой точностью позволяет определять свойства элементов и их влияние на результат, на основании которых можно сделать вывод, что модель *валидна*.

При изменении исходных данных модель сохраняет устойчивость. При пересчете одного или нескольких параметров возникает изменение результатов пропускной способности в разумном диапазоне, что свидетельствует о достаточной *чувствительности* модели.

При использовании алгоритма модели для абсолютно новых исходных данных модель с достаточной точностью позволяет прогнозировать диапазон пропускной способности МГФ. Получается, что модель удовлетворяет требованиям *устойчивости*.

Анализ функционирования сложной транспортной системы с условием высокой детализации с помощью только численных методов сталкивается со значительными трудностями, приводящими к необходимости существенного упрощения моделей и получению недостоверных результатов. Поэтому в зарубежной науке XXI в. для исследования транспортных систем получают популярность вероятностные модели, редко применяемые в РФ в связи с нехваткой знаний и опыта [27]. Технологические процессы в порту отличаются разнообразием по характеру, динамике и интенсивности, а именно: различия в интенсивности грузовых операций технологических зон, конструктивные и технологические особенности транспорта и оборудования, непрерывно

изменяющаяся гидрометеорологическая обстановка в порту, динамичное перемещение грузов между технологическими зонами [28]. Порой без моделирования продемонстрировать заказчику корректную общую картину представляется затруднительным. Функциональный диапазон результатов, полученный в результате разработки детализированной стохастической модели, позволят укрепить доверие во взаимоотношениях «исследователь / проектировщик – заказчик» благодаря более прозрачной и точной оценке пропускной способности МГФ, а также возможности формирования гипотез по потенциалу увеличения грузооборота.

Доверие к результатам расчета формируется за счет детализированной декомпозиции процессов и численных исходных данных, а наглядность предоставления результатов моделирования — в виде гистограммы вероятностного распределения. Моделирование по методу Монте-Карло дает гораздо более полное представление о возможных вариантах развития событий и имеет ряд преимуществ по сравнению с детерминистическим анализом (табл. 2).

Таблица 2

Преимущества моделирования по методу Монте-Карло

Преимущество	Описание
Вероятностные результаты	Имеется возможность получить в качестве результата значения медианы искомой величины (в проведенном эксперименте порядка 20 млн т/год в качестве пропускной способности МГФ) и наименьших/наибольших результатов с вероятностью их наступления
Графическое представление результатов	Результаты каждой из множества итераций фиксируются, а итогом становится распределение вероятностей возможных последствий. Характер используемого аппарата позволяет получать графики распределения результатов в зависимости от вероятности их наступления, что формирует наглядность при демонстрации результатов заказчикам и передаче внешним заинтересованным лицам
Анализ чувствительности	Детерминистский анализ затрудняет определение того, какая из переменных в наибольшей степени оказывает влияние на результаты. При проведении моделирования по методу Монте-Карло несложно определить, какие исходные данные оказывают наибольшее воздействие на конечные результаты
Корреляция исходных данных	Метод Монте-Карло позволяет моделировать взаимозависимые отношения между исходными переменными. Для получения достоверных сведений необходимо описать, в каких случаях при увеличении некоторых факторов соответствующим образом возрастают или снижаются другие

Заключение (Conclusion)

В результате проведенного исследования создана и апробирована стохастическая модель для вероятностной оценки пропускной способности МГФ угольных экспортных терминалов. Применение стохастического моделирования позволяет увеличить точность, а также соответствие пропускной способности МГФ реальному грузообороту эксплуатируемых угольных терминалов, что подтверждают вычислительные эксперименты. Разработаны расчетные инструменты, появилась возможность выполнения анализа чувствительности влияющих на результат факторов.

Стохастическое моделирование транспортных систем открывает новые возможности с точки зрения решения прикладных задач и обладает высоким исследовательским потенциалом. В современной российской и мировой науке не исчерпано развитие данного направления. При технологическом проектировании морских портов стохастический метод моделирования практически неизвестен специалистам в РФ. Для логистических и технических систем разработанная методика обладает потенциалом для применения с целью оптимизации неэффективных процессов и увеличения пропускной способности.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение стохастического моделирования для получения диапазона пропускной способности МГФ в качестве исследовательского подхода является актуальным и логичным шагом с точки зрения развития более глубокого понима-

ния процессов и получения более точных расчетных результатов. Применение стохастического моделирования позволит повысить эксплуатационную эффективность работы и грузооборот терминалов, что способствует решению стратегической задачи отраслевого развития портовой инфраструктуры РФ.

На основе использования методов стохастического моделирования при должном уровне детализации и декомпозиции процессов возникает высокая технологическая гибкость и прозрачность демонстрации результатов. Данная методика позволяет осуществлять проектирование новых перспективных терминалов с использованием допущений по проектам-аналогам и повышать эффективность технологических операций существующих эксплуатируемых терминалов с использованием существующей производственной статистики. Помимо указанных направлений разработанная методика имеет потенциал для дальнейшего использования в следующем виде:

- в качестве альтернативного направления технологических расчетов МГФ;
- в качестве прикладного расчетного продукта для морских терминалов, в который будут интегрированы базы усредненных показателей (бенчмаркинга) и выполнена проверка эффективности получаемых результатов;
- в качестве базиса для создания отдельных методик вероятностного моделирования для прочих технологических зон терминала (складская зона, железнодорожный грузовой фронт);
- расширение методики модулями стоимостного инжиниринга и оценки экономической эффективности;
- расширение методики для формирования интегрированных моделей цельного морского терминала;
- аппроксимация алгоритма на другие промышленно-транспортные объекты и отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валькова С. С. Вероятностно-статистический метод расчета вместимости склада морского порта / С. С. Валькова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 507–519. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-507-519.
2. Barros V. H. Model and heuristic for berth allocation in tidal bulk ports with stock level constraints / V. H. Barros, T. S. Costa, A. C. Oliveira, L. A. Lorena // Computers & Industrial Engineering. — 2011. — Vol. 60. — Is. 4. — Pp. 606–613. DOI: 10.1016/j.cie.2010.12.018.
3. Bugaric U. S. Optimal utilization of the terminal for bulk cargo unloading / U. S. Bugaric, P. B. Petrovic, Z. V. Jeli, D. V. Petrovic // Simulation. — 2012. — Vol. 88. — Is. 12. — Pp. 1508–1521. DOI: 10.1177/0037549712459773.
4. van Vianen T. Simulation-based determination of the required stockyard size for dry bulk terminals / T. van Vianen, J. Ottjes, G. Lodewijks // Simulation Modelling Practice and Theory. — 2014. — Vol. 42. — Pp. 119–128. DOI: 10.1016/j.simpat.2013.12.010.
5. van Vianen T. Belt conveyor network design using simulation / T. van Vianen, J. Ottjes, G. Lodewijks // Journal of Simulation. — 2016. — Vol. 10. — Is. 3. — Pp. 157–165. DOI: 10.1057/jos.2014.38.
6. van Vianen T. Simulation-based rescheduling of the stacker–reclaimer operation / T. van Vianen, J. Ottjes, G. Lodewijks // Journal of Computational Science. — 2015. — Vol. 10. — Pp. 149–154. DOI: 10.1016/j.jocs.2014.06.004.
7. Kleinheerenbrink A. J. A. A Design Tool for Dry Bulk Terminals / A. J. A. Kleinheerenbrink. — Delft University of Technology, 2012. — 142 p.
8. Ligteringen H. Ports and terminals / H. Ligteringen, H. Velsink. — CA Delft, Netherlands: VSSD, 2012. — 276 p.
9. Robenek T. A branch-and-price algorithm to solve the integrated berth allocation and yard assignment problem in bulk ports / T. Robenek, N. Umang, M. Bierlaire, S. Ropke // European Journal of Operational Research. — 2014. — Vol. 235. — Is. 2. — Pp. 399–411. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.08.015.
10. Thorensen C. A. Port designer's handbook / C. A. Thorensen. — London: Thomas Telford Limited, 2010. — 554 p.
11. Umang N. Exact and heuristic methods to solve the berth allocation problem in bulk ports / N. Umang, M. Bierlaire, I. Vacca // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2013. — Vol. 54. — Pp. 14–31. DOI: 10.1016/j.tre.2013.03.003.

12. *Спасский Я. Б.* Автоматизация технологического проектирования портовых терминалов на основе имитационного моделирования: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.12 / Ярослав Борисович Спасский. — СПб., 2012. — 214 с.
13. *Кузнецов А. Л.* Имитационное моделирование работы порта с учетом дифференцированных метеоусловий / А. Л. Кузнецов, В. А. Погодин, Я. Б. Спасский // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 1 (63). — С. 3–8.
14. *Бондарева И. О.* Оценка качества логистического обслуживания грузового порта на основе имитационного моделирования: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.10 / Ирина Олеговна Бондарева. — Астрахань, 2010. — 226 с.
15. *Павленко С. С.* Организация системы управления грузораспределением морских контейнерных терминалов на основе имитационного моделирования: дис. ... канд. техн. наук / Сергей Сергеевич Павленко. — СПб., 2016. — 179 с.
16. *Погодин В. А.* Обоснование оптимальных технологических параметров контейнерных комплексов: дис. ... канд. техн. наук / Владимир Алексеевич Погодин. — Л., 1989. — 201 с.
17. *Степанов А. Л.* Перегрузочное оборудование портов и транспортных терминалов / А. Л. Степанов. — СПб.: Политехника, 2013. — 427 с.
18. *Ханова А. А.* Методология стратегического управления грузовым портом на основе имитационного моделирования: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Анна Алексеевна Ханова. — Астрахань, 2013. — 32 с.
19. *Кузнецов А. Л.* Бенчмаркинг-показатели в технологическом проектировании контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 7–19. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-7-19.
20. *Щербакова-Слюсаренко В. Н.* Разработка функциональной модели контейнерного терминала типа «сухой порт» и принципов ее использования в технологическом проектировании / В. Н. Щербакова-Слюсаренко, В. А. Погодин, А. С. Ткаченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 48–60. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-48-60.
21. *Кузнецов А. Л.* Теоретико-множественная модель для расчета операционных ресурсов контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 1094–1103. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1094-1103.
22. *Кузнецов А. Л.* Планирование работы тыловых грузовых фронтов морских контейнерных терминалов методами имитационного моделирования / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 243–253. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-243-253.
23. *Кузнецов А. Л.* Имитационное моделирование в задачах анализа операций в морских портах / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.
24. *Емельянова Н. М.* Возможность использования вероятностных оценок запасов при управлении углеводородными ресурсами / Н. М. Емельянова, В. И. Порожун // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. — 2006. — № 12. — С. 67–71.
25. *Белов В. П.* Аналитико-статистический метод оценки надёжности систем управления и навигации подвижных объектов / В. П. Белов, А. Д. Голяков, С. Я. Старков // Сборник докладов НТК «Радиолокация, навигация, связь». — 2003.
26. *Соколянский П. А.* Вероятностные методы расчета электроэнергетической системы предприятия / П. А. Соколянский, В. И. Хименко // Фундаментальные исследования. — 2005. — № 7. — С. 42–44.
27. *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.
28. *Проталинский О. М.* Концепция интеллектуального управления технологическими процессами грузового порта на основе имитационных моделей / О. М. Проталинский, А. А. Ханова // Вестник Астраханского государственного технического университета. — 2007. — № 1 (36). — С. 46–49.

REFERENCES

1. Valkova, Svetlana S. "Stochastic method for sea port storage capacity calculation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 507–519. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-507-519.
2. Barros, Victor Hugo, T.S. Costa, A.C. Oliveira, and L.A. Lorena. "Model and heuristic for berth allocation in tidal bulk ports with stock level constraints." *Computers & Industrial Engineering* 60.4 (2011): 606–613. DOI: 10.1016/j.cie.2010.12.018.
3. Bugaric, Ugljesa S., P.B. Petrovic, Z.V. Jeli, and D.V. Petrovic. "Optimal utilization of the terminal for bulk cargo unloading." *Simulation* 88.12 (2012): 1508–1521. DOI: 10.1177/0037549712459773.
4. Van Vianen, Teus, Jaap Ottjes, and Gabriël Lodewijks. "Simulation-based determination of the required stockyard size for dry bulk terminals." *Simulation Modelling Practice and Theory* 42 (2014): 119–128. DOI: 10.1016/j.simpat.2013.12.010
5. van Vianen, T., J. Ottjes, and Gabriël Lodewijks. "Belt conveyor network design using simulation." *Journal of Simulation* 10.3 (2016): 157–165. DOI: 10.1057/jos.2014.38.
6. Van Vianen, Teus, Jaap Ottjes, and Gabriël Lodewijks. "Simulation-based rescheduling of the stacker–reclaimer operation." *Journal of Computational Science* 10 (2015): 149–154. DOI: 10.1016/j.jocs.2014.06.004.
7. Kleinheerenbrink, A. J. A. *A Design Tool for Dry Bulk Terminals*. Delft University of Technology, 2012.
8. Ligteringen, H., and H. Velsink. *Ports and terminals*. CA Delft, Netherlands: VSSD, 2012.
9. Robenek, Tomáš, N. Umang, M. Bierlaire, and S. Ropke. "A branch-and-price algorithm to solve the integrated berth allocation and yard assignment problem in bulk ports." *European Journal of Operational Research* 235.2 (2014): 399–411. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.08.015.
10. Thorensen, C. A. *Port designer's handbook*. London: Thomas Telford Limited, 2010.
11. Umang, Nitish, Michel Bierlaire, and Ilaria Vacca. "Exact and heuristic methods to solve the berth allocation problem in bulk ports." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 54 (2013): 14–31. DOI: 10.1016/j.tre.2013.03.003.
12. Spasskii, Ya. B. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskogo proektirovaniya portovykh terminalov na osnove imitatsionnogo modelirovaniya*. PhD diss. SPb., 2012.
13. Kuznetsov, A. L., V. A. Pogodin, and Y. B. Spasskiy. "The simulation modeling of the port operations subject to differentiated weather conditions." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1(63) (2011): 3–8.
14. Bondareva, I. O. *Otsenka kachestva logisticheskogo obsluzhivaniya gruzovogo porta na osnove imitatsionnogo modelirovaniya*. PhD diss. Astrakhan', 2010.
15. Pavlenko, S. S. *Organizatsiya sistemy upravleniya gruzoraspredeleniem morskikh konteynernykh terminalov na osnove imitatsionnogo modelirovaniya*. PhD diss. SPb., 2016.
16. Pogodin, V. A. *Obosnovanie optimal'nykh tekhnologicheskikh parametrov konteynernykh kompleksov*. PhD diss. Leningrad, 1989.
17. Stepanov, A. L. *Peregruzochnoe oborudovanie portov i transportnykh terminalov*. SPb.: Politehnika, 2013.
18. Khanova, A. A. *Metodologiya strategicheskogo upravleniya gruzovym portom na osnove imitatsionnogo modelirovaniya*. Abstract of Dr. diss. Astrakhan', 2013.
19. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "Benchmarking indicators in technological design of container terminals." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.1 (2018): 7–19. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-7-19.
20. Shcherbakova-Slyusarenko, Victoria N., Vladimir A. Pogodin, and Andrei S. Tkachenko. "The development of the functional model for the "dry port" type container terminal and principles of its use in the technologic design." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 48–60. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-48-60.
21. Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "Set theory model for the assessment of the container terminal's operational resources." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.5 (2018): 1094–1103. DOI: 10.21821/2309-5180- 2018-10-5-1094-1103.
22. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Anton D. Semenov. "Application the simulation modeling methods for planning a container terminal internal operations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 243–253. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-243-253.

23. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "Simulation in the tasks of sea port operational analyses." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.
24. Emel'yanova, N. M., and V. I. Poroskun. "Vozmozhnost' ispol'zovaniya veroyatnostnykh otsenok zapasov pri upravlenii uglevodorodnymi resursami." *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii* 12 (2006): 67–71.
25. Belov, V. P., A. D. Golyakov, and S. Ya. Starkov. "Analitiko-statisticheskii metod otsenki nadezhnosti sistem upravleniya i navigatsii podvizhnykh ob'ektov." *Sbornik dokladov NTK «Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz'.* 2003.
26. Sokolyanskii, P. A., and V. I. Khimenko. "Veroyatnostnye metody rascheta elektroenergeticheskoi sistemy predpriyatiya." *Fundamental'nye issledovaniya* 7 (2005): 42–44.
27. 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.
28. Protalinsky, O. M., and A. A. Khanova. "The concept of intellectual management of technological processes of cargo port on the basis of imitating models." *Vestnik of Astrakhan State Technical University* 1(36) (2007): 46–49.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Купцов Николай Владимирович —
руководитель направления
ПАО «Газпром нефть»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Почтамтская, 3-5
e-mail: kuptsov.nv@gazprom-neft.ru,
kuptsov.nikolay@gmail.com
Кузнецов Александр Львович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО ГУМРФ имени адмирала
С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru
Шатилин Андрей Валерьевич —
руководитель направления
ПАО «Газпром нефть»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Почтамтская, 3-5
e-mail: shatilin.av@gazprom-neft.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuptsov, Nikolay V. —
Lead specialist
Gazprom Neft PJSC
3-5 Pochtamtskaya Str., St Petersburg, 190000,
Russian Federation
e-mail: kuptsov.nv@gazprom-neft.ru,
kuptsov.nikolay@gmail.com
Kuznetsov, Aleksandr L. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru
Shatilin, Andrey V. —
Lead specialist
Gazprom Neft PJSC
3-5 Pochtamtskaya Str., St Petersburg, 190000,
Russian Federation
e-mail: shatilin.av@gazprom-neft.ru

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2019 г.

Received: December 25, 2019.