

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602

DISCRETE-EVENT MODELLING OF CONTAINER TERMINAL CARGO FRONTS

A. L. Kuznetsov¹, A. V. Galin¹, G. B. Popov²

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — Morstroytechnology Company, St. Petersburg, Russian Federation

The basis for designing and upgrading new sea ports and container terminals is regulatory documentation. A part of designing a new sea port is making key technological decisions, including on calculating its cargo throughput capacity. However a method for capacity evaluation of operating ports is not described in the regulatory documents. Operating cargo terminals often undergo significant changes since the moment they were put into operation. Equipment, resources and infrastructure of cargo fronts should not be the only thing taken into consideration when evaluating an existing container terminal capacity. The way in which a terminal interacts with external transport systems (railroad, vessel fleet, etc.) as well as interactions between cargo fronts inside a terminal should also be considered. A discrete-event simulation model for the system consisting of a railroad cargo front, a container yard and a berth cargo front of a container terminal is proposed in the paper. This model allows to evaluate the balance between calls of different modes of transport (vessel calls, cargo train calls), as well as the impact of this balance on the state of container yard and on the terminal cargo throughput capacity in general. Container terminal in terms of proposed model is not merely a set of unrelated objects, but a system. In such system interaction with one of elements has influence on all the others. The model is described as mathematical dependencies between key variables. Cargo train and vessel calls generation is performed via standard spreadsheet methods. To acquire more accurate results, specific sea port statistical data should be used.

Keywords: discrete-event simulation, throughput capacity, container terminals, cargo fronts, sea ports.

For citation:

Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Galin, and German B. Popov. "Discrete-event modelling of container terminal cargo fronts." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 589–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602.

УДК 656.6

ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРУЗОВЫХ ФРОНТОВ КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМИНАЛА

А. Л. Кузнецов¹, А. В. Галин¹, Г. Б. Попов²

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ООО «Морское строительство и технологии», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Предметом исследования в данной работе являются вопросы проектирования новых морских портов и контейнерных терминалов на основе действующей нормативной документации. В рамках технологического проектирования осуществляется принятие основных технологических решений, предусматривающих предварительную оценку пропускной способности объекта. Однако методика оценки пропускной способности действующих предприятий указанного профиля не отражена в нормативной документации. Существующие грузовые терминалы зачастую претерпевают существенные изменения с момента их ввода в эксплуатацию. Отмечается, что при оценке пропускной способности существующего терминала необходимо учитывать не только техническое оснащение, ресурсы и инфраструктуру грузовых фронтов, но и протоколы взаимодействия терминала с внешними объектами транспорта (железная дорога, морской флот и т. д.), а также взаимосвязь грузовых фронтов между собой. В статье предлагается дискретно-событийная модель взаимодействия системы железнодорожного грузового фронта контейнерного терминала, его склада и морского грузового фронта. Данная модель позволяет оценить воздействие сбалансированности подхода транспортных средств на грузовых фронтах на наполненность склада, и, как следствие,

на пропускную способность терминала. Контейнерный терминал с точки зрения модели представляет собой не набор отдельных элементов (грузовых фронтов), а систему, в которой воздействие на один из фронтов оказывает влияние на все остальные грузовые фронты. Таким образом, в модели наглядно демонстрируется взаимосвязь, которая приводит к ситуациям, например, заполнения склада из-за недостаточной интенсивности подхода железнодорожных составов. Модель представлена в виде арифметических зависимостей между ключевыми переменными, описывающими потоки контейнеров на терминале. Генерация подхода железнодорожных составов и морских судов выполнена доступными методами работы с электронными таблицами. Для повышения точности моделирования следует использовать проанализированные статистические данные конкретного морского порта или контейнерного терминала.

Ключевые слова: дискретно-событийное моделирование, пропускная способность, контейнерные терминалы, модель, грузовой фронт, морские порты.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Дискретно-событийное моделирование грузовых фронтов контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин, Г. Б. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 589–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602.

Введение (Introduction)

Проектирование морских портов и контейнерных терминалов (КТ) регулируется нормативной документацией: СП 350.1326000.2018 «Нормы технологического проектирования морских портов»¹ и СП 316.1325800.2017 «Терминалы контейнерные. Правила проектирования»². Данные нормы содержат методики определения основных характеристик и пропускной способности грузовых терминалов. Пропускная способность терминала в целом определяется по лимитирующему грузовому фронту, т. е. рассматривается как минимальное значение из ряда пропускных способностей грузовых фронтов:

$$П = \min(П_{ж}; П_{а}; П_{м}; П_{с}),$$

где $П_{ж}$ — пропускная способность железнодорожного грузового фронта (ЖГФ);

$П_{а}$ — пропускная способность автомобильного грузового фронта (АГФ);

$П_{м}$ — пропускная способность морского грузового фронта (МГФ);

$П_{с}$ — пропускная способность склада.

Единицей измерения пропускной способности являются контейнеры или TEU (англ. Twenty feet Equivalent Unit — ДФЭ (двадцатифутовый эквивалент)), проходящие через лимитирующий функциональный элемент в единицу времени, обычно месяц или год. В данном исследовании единицей измерения пропускной способности принято число контейнеров в месяц. Методики определения пропускных способностей грузовых фронтов, изложенные в нормативной документации, в целом отвечают потребностям предварительного проектирования и концептуальных проработок контейнерных терминалов, однако имеют существенные недостатки для практики их эксплуатации. В частности, грузовые фронты рассматриваются как отдельные, изолированные друг от друга элементы терминала, не влияющие друг на друга. Кроме того, соответствующая пропускная способность определяется исходя из предположения о равномерной и максимальной насыщенности грузовых фронтов потоками транспортных средств, т. е. предполагается, например, что подача железнодорожных составов на ЖГФ будет производиться железной дорогой непрерывно в течение всего года таким образом, что за одной железнодорожной подачей сразу следует другая. Иными словами, указанным способом устанавливается мощность той или иной операции, а не ее пропускная способность. Такой подход оправдан при проектировании новых терминалов, однако неприменим при оценке важнейшего параметра действующего терминала — его эксплуатационной пропускной способности грузовых фронтов существующих терминалов.

На действующих контейнерных терминалах (КТ) формируется определенный порядок взаимодействия не только между составляющими функциональными элементами, но и между терми-

¹ СП 350.1326000.2018. Нормы технологического проектирования морских портов. М.: Стандартинформ, 2018. 218 с.

² СП 316.1325800.2017. Терминалы контейнерные. Правила проектирования. М.: Стандартинформ, 2018. 54 с.

налом и железной дорогой, а также между терминалом и судопотоками. Недостаточная развитость прилегающей к терминалу транспортной инфраструктуры (ж.-д. станции, морских подходов путей, автомобильных магистралей) не может не сказаться на пропускной способности терминала. Например, нехватка ж.-д. платформ повлечет за собой невозможность разгрузить условно «импортную» часть склада (контейнеропоток в направлении с МГФ на ЖГФ). При этом условно «экспортный» контейнеропоток (в направлении с ЖГФ на МГФ) будет недостаточным из-за малого количества платформ, подаваемых на терминал, а суда будут покидать терминал не до конца заполненными. Избыток импортных контейнеров, которые будет некуда отгружать из-за нехватки платформ на ЖГФ, вызовет увеличение сроков хранения и снижение пропускной способности склада. Весь описанный процесс не находит отражения в аналитических формулах, предлагаемых в нормативной документации.

Таким образом, актуальность рассматриваемой проблемы обусловлена следующими факторами:

- существующая нормативная документация РФ содержит расчетно-аналитические методики определения пропускной способности вновь проектируемых морских портов и контейнерных терминалов;
- отсутствует какая-либо нормативная документация для оценки пропускной способности грузовых фронтов действующих морских портов и грузовых терминалов;
- наличие недостатков в методиках определения пропускной способности, рекомендуемых нормативной документацией по проектированию морских портов и контейнерных терминалов, затрудняющих применение норм для оценки пропускной способности действующих терминалов, а именно:

- 1) грузовые фронты рассматриваются в отрыве друг от друга;
- 2) не учитывается влияние внешних объектов транспортной инфраструктуры на пропускную способность терминала.

Дискретно-событийное моделирование морских портов и грузовых терминалов, в частности контейнерных, освещено как в отечественной, так и в зарубежной научной литературе [1], [2]. Одним из наиболее близких к настоящему является публикация [3], в которой приведено описание дискретно-событийной модели системы «ЖГФ – склад – МГФ». Выходными оцениваемыми параметрами модели служат средние значения длины очереди и средняя загрузка судна, а в качестве основного изменяемого параметра выбран максимальный размер склада. Такая постановка отличается от задачи, рассматриваемой в данном исследовании, где в качестве исходных данных выступают интенсивности поступления и обработки транспортных средств на грузовых терминалах и вместимость склада, а выходными параметрами являются средняя и максимальная потребная вместимость склада в течение прогона. Кроме того, в модели [3] предполагается обработка на терминале только экспортного грузопотока контейнеров, поступающего по железной дороге и уходящего с терминала морем, в то время как задачей настоящего исследования является описание как экспортного, так и импортного грузопотока контейнеров.

Некоторые авторы фокусируют внимание на исследовании работы одного грузового фронта. Так, например, в статье [4] приводится дискретно-событийная модель морского грузового фронта экспортного терминала угля, разработанная в среде имитационного моделирования AnyLogic. Достаточно близкая задача к поставленной в данном исследовании рассмотрена авторами работы [5], в которой приведен пример имитационного моделирования системы «железнодорожная станция – морской порт». Однако в большей степени авторы работы сосредоточены на анализе работы припортовой ж.-д. станции на примере станции Владивосток, взаимосвязанной с Владивостокским морским торговым портом. Описано влияние интенсивности поступления и характеристик ж.-д. составов на работу ж.-д. станции и системы «ж.-д. станция – порт» без учета влияния подхода судов и степени заполнения склада контейнеров.

Авторы серии статей [6]–[8] провели в своих исследованиях работу формализации некоторых аспектов работы контейнерных терминалов с точки зрения имитационного и дискретно-событийного моделирования. Так, например, в статье [6] приводится блок-схема обработки импортного контейнеропотока в морском порту. В указанных работах основным предметом исследований является

коммерческая составляющая процессов перегрузки в порту, в том числе таможенная обработка контейнеров в порту и взаимодействие с контролирующими органами. Модели реализованы авторами в специализированных программных средах MATLAB / Simulink.

Авторы исследования [9], например, в большинстве случаев ограничиваются моделированием одного конкретного контейнерного терминала (в данном случае это контейнерный терминал Салерно, SalCT, Италия). Данный подход является верным при углубленной проработке имитационной или дискретно-событийной модели, поскольку каждый контейнерный терминал имеет уникальный набор характеристик и зачастую состоит из уникального ряда объектов. Однако в данной работе привязка к конкретному терминалу неуместна, поскольку задачей данной статьи является модель, позволяющая выполнить оценку пропускной способности любого контейнерного терминала, обрабатывающего морским и железнодорожным грузовым фронтом.

Цель работы состоит в том, чтобы показать, что применение ДСМ для определения характеристик действующего морского порта не обязательно должно основываться на использовании специализированных средств разработки имитационных моделей. Для создания простейшей дискретно-событийной модели контейнерного терминала достаточно формализации процессов перегрузки в терминах ДСМ и использования программного обеспечения (ПО), поддерживающего работу с электронными таблицами.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В дискретно-событийной модели цена дискрета (единицы времени) принята равной одному часу, период моделирования составляет один месяц.

Основные переменные, используемые в моделировании:

- $D_{ж.э}$ — загрузка ж.-д. состава экспортными контейнерами (предназначены для перегрузки по варианту «вагон – склад»), конт.;
- $D_{ж.и}$ — загрузка ж.-д. состава импортными контейнерами (предназначены для перегрузки по варианту «склад – вагон»), конт.;
- $D_{с.эj}$ — загрузка судна типа j экспортными контейнерами (предназначены для перегрузки по варианту «склад – судно»), конт.;
- $D_{с.иj}$ — загрузка судна типа j импортными контейнерами (предназначены для перегрузки по варианту «судно – склад»), конт.;
- $d_{ж.эi}$ — заявка на разгрузку ж.-д. подачи в i -й дискрет времени, конт.;
- $d_{ж.иi}$ — заявка на загрузку ж.-д. подачи в i -й дискрет времени, конт.;
- $d_{с.эi}$ — заявка на загрузку судов в i -й дискрет времени, конт.;
- $d_{с.иi}$ — заявка на разгрузку судов в i -й дискрет времени, конт.;
- $x_{эi}$ — количество контейнеров, перемещаемых по варианту «вагон – склад» в i -й дискрет времени, конт.;
- $x_{иi}$ — количество контейнеров, перемещаемых по варианту «склад – вагон» в i -й дискрет времени, конт.;
- $y_{эi}$ — количество контейнеров, перемещаемых по варианту «склад – судно» в i -й дискрет времени, конт.;
- $y_{иi}$ — количество контейнеров, перемещаемых по варианту «судно – склад» в i -й дискрет времени, конт.;
- $\mu_{ж}$ — часовая интенсивность грузовых работ на ЖГФ, с учетом обедов, пересменок, переподач составов, конт. / ч;
- $\mu_{с}$ — часовая интенсивность грузовых работ на МГФ, с учетом обедов, пересменок, вспомогательных операций с судами, конт. / ч;
- E — вместимость склада, максимальная, конт.;
- $E_{пред}$ — предельная вместимость склада, при которой проведение грузовых операций, в том числе «копка» на складе не затруднена из-за слишком высокой плотности штабелирования, конт.;
- $E_{зап}$ — запас вместимости склада в виде незанятых слотов хранения контейнеров, предназначенных для размещения контейнеров в процессе «копки», конт.;
- $e_{эi}$ — количество экспортных контейнеров на складе (в ожидании погрузки на суда) в i -й дискрет времени, конт.;

- e_{ni} — количество импортных контейнеров на складе (в ожидании погрузки на ж.-д. платформы) в i -й дискрет времени, конт.;
- e_i — состояние склада — количество контейнеров на складе в i -й дискрет времени, конт.;
- $\bar{e}$ — среднее значение состояния склада за период моделирования, конт.; определяется как среднее арифметическое e_i среди всех дискретов времени i ;
- $e_{\max}, e_{\min}$ — максимальное и минимальное значение (соответственно) состояния склада за период моделирования, конт.;
- a_{ji} — вспомогательная переменная, обозначающая прибытие ж.-д. состава в i -й дискрет времени. Принимает значение «1», если состав прибыл в i -й дискрет времени, и значение 0, если не прибыл;
- a_{ci} — вспомогательная переменная, обозначающая прибытие судна в i -й дискрет времени; $a_{ci} = j$, если в i -й дискрет времени прибыло судно типа j , и $a_{ci} = 0$, если судно не прибывало;
- $D_3(a_{ci})$ — функция, определяющая инкремент заявки на загрузку судна в зависимости от значения a_{ci} , конт.;
- $D_{ii}(a_{ci})$ — функция, определяющая инкремент заявки на разгрузку судна в зависимости от значения a_{ci} , конт.;
- λ_j — управляющая переменная: интенсивность прибытия ж.-д. составов (единиц в неделю);
- λ_c — управляющая переменная: интенсивность прибытия судов (судозаходов в месяц).

Схема дискретно-событийной модели приведена на рис. 1.

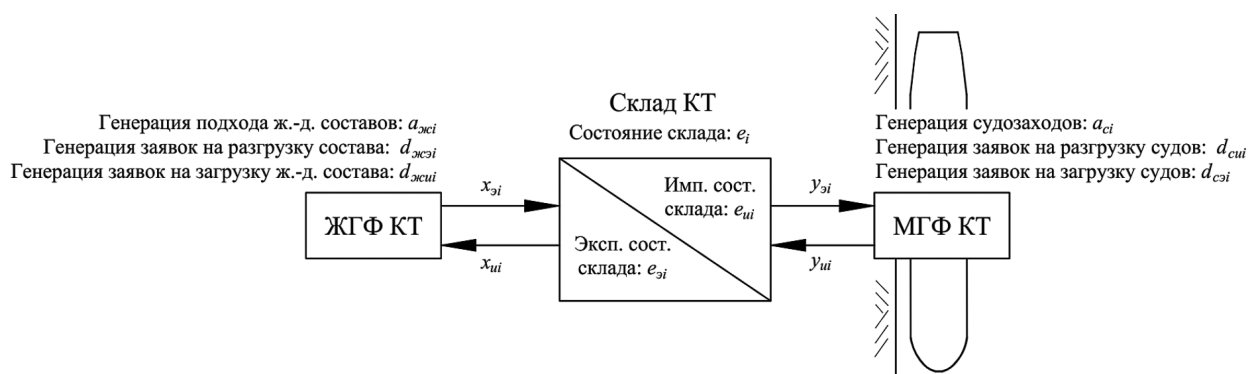


Рис. 1. Схема дискретно-событийной модели контейнерного терминала

Когда на ЖГФ терминала прибывает ж.-д. подача, заявка на разгрузку / погрузку контейнеров на ЖГФ должна возрастать на размер загрузки ж.-д. подачи в экспортном и импортном направлении соответственно. Заявка на проведение грузовых работ на ЖГФ в i -й дискрет времени зависит от размера заявки в $(i-1)$ -й дискрет времени, от прибытия ж.-д. состава в i -й дискрет времени и от количества контейнеров, перемещенных по соответствующему варианту («вагон – склад» или «склад – вагон») в i -й дискрет времени.

Заявка на разгрузку ж.-д. подачи (количество контейнеров, которое нужно снять с ж.-д. платформ в дискрет времени i) определяется в соответствии со следующей формулой:

$$d_{жэi} = d_{жэ(i-1)} + D_{жэ} a_{ji} - x_{э(i-1)}. \quad (1)$$

Заявка на загрузку ж.-д. подачи (количество контейнеров, которое нужно погрузить на ж.-д. платформы в дискрет времени i) определяется по формуле

$$d_{жиi} = d_{жи(i-1)} + D_{жи} a_{ji} - x_{и(i-1)}. \quad (2)$$

Погрузка импортных контейнеров на ж.-д. платформы на ЖГФ не начинается до тех пор, пока не закончится выгрузка экспортных контейнеров, прибывших в составе ж.-д. подачи. При этом количество контейнеров, перегружаемых по варианту «вагон – склад» ($x_{эi}$), зависит только

от интенсивности перегрузки на ЖГФ ($\mu_{\text{ж}}$) и размера заявки на снятие контейнеров с ж.-д. платформ ($d_{\text{ж.э}i}$). Количество контейнеров, перегружаемых по варианту «склад – вагон» в этот же дискрет времени i , зависит от размера заявки на погрузку контейнеров на платформы ($d_{\text{ж.и}i}$), от интенсивности перегрузки на ЖГФ с учетом снятых в этот же дискрет времени контейнеров ($\mu_{\text{ж}} - x_{\text{э}i}$), а также от наличия импортных контейнеров на складе ($e_{\text{и}i}$). Таким образом, если импортных контейнеров на складе нет ($e_{\text{и}i} = 0$), то они не могут быть погружены на ж.-д. платформы ($x_{\text{и}i} = 0$), и если в течение всего дискрета времени i оборудование ЖГФ было занято только разгрузкой ж.-д. платформ ($x_{\text{э}i} = \mu_{\text{ж}}$), то у оборудования не останется времени для погрузки контейнеров на платформы ($x_{\text{и}i} = 0$). С учетом ранее изложенного приведены формулы (3) и (4).

Количество контейнеров, перемещаемое по варианту «вагон – склад» в i -й дискрет времени определяется по формуле

$$x_{\text{э}i} = \min \{d_{\text{ж.э}i}; \mu_{\text{ж}}\}. \quad (3)$$

Количество контейнеров, перемещаемое по варианту «склад – вагон» в i -й дискрет времени, определяется по формуле

$$x_{\text{и}i} = \min \{d_{\text{ж.и}i}; \mu_{\text{ж}} - x_{\text{э}i}; e_{\text{и}(i-1)}\}. \quad (4)$$

Заявка на разгрузку судна (количество контейнеров, которое нужно выгрузить из судна в дискрет времени i) определяется в соответствии со следующей формулой:

$$d_{\text{с.и}i} = d_{\text{с.и}(i-1)} + D_{\text{и}}(a_{\text{с}i}) - y_{\text{и}(i-1)}. \quad (5)$$

Заявка на загрузку судна (количество контейнеров, которое нужно погрузить на судно в дискрет времени i) определяется в соответствии со следующей формулой:

$$d_{\text{с.э}i} = d_{\text{с.э}(i-1)} + D_{\text{э}}(a_{\text{с}i}) - y_{\text{э}(i-1)}. \quad (6)$$

Вспомогательные функции $D_{\text{и}}(a_{\text{с}i})$, $D_{\text{э}}(a_{\text{с}i})$ принимают следующие значения в зависимости от значения переменной $a_{\text{с}i}$:

$$D_{\text{и}} = \begin{cases} 0, & \text{если } a_{\text{с}i} = 0; \\ D_{\text{с.и}j}, & \text{если } a_{\text{с}i} = j; \end{cases} \quad D_{\text{э}} = \begin{cases} 0, & \text{если } a_{\text{с}i} = 0; \\ D_{\text{с.э}j}, & \text{если } a_{\text{с}i} = j. \end{cases}$$

По аналогии с ЖГФ грузовые работы по погрузке контейнеров на судно не начинаются до тех пор, пока не закончатся работы по разгрузке судна. Таким образом, в отношении количества перемещаемых контейнеров по вариантам «судно – склад» и «склад – судно», применима та же логика, что и в отношении работ по вариантам «вагон – склад» и «склад – вагон».

Количество контейнеров, перемещаемое по варианту «судно – склад» в i -й дискрет времени определяется по формуле

$$y_{\text{и}i} = \min \{d_{\text{с.и}i}; \mu_{\text{с}}\}. \quad (7)$$

Количество контейнеров, перемещаемое по варианту «склад – судно» в i -й дискрет времени определяется по формуле

$$y_{\text{э}i} = \min \{d_{\text{с.э}i}; \mu_{\text{с}} - y_{\text{и}i}; e_{\text{э}(i-1)}\}. \quad (8)$$

Состояние склада e_i определяется как сумма импортной и экспортной составляющей склада:

$$e_i = e_{\text{и}i} + e_{\text{э}i}. \quad (9)$$

Экспортная и импортная составляющие склада зависят от потоков контейнеров, прибывающих на склад, и от потоков контейнеров, убывающих со склада, а также от количества контейнеров соответствующего направления на складе в предыдущий дискрет времени:

$$e_{\text{э}i} = e_{\text{э}(i-1)} + x_{\text{э}i} - y_{\text{э}i}; \quad (10)$$

$$e_{ii} = e_{i(i-1)} + y_{ii} - x_{ii}. \quad (11)$$

Характеристики контейнерного склада в модели задаются параметрами: E — максимальная вместимость склада, конт. и $E_{\text{пред}}$ — предельная вместимость склада, при которой возможны операции по перестановке контейнеров в штабелях при «копке», конт. Максимальная вместимость склада определяется исходя из геометрических характеристик склада: количества рядов контейнеров в штабеле по ширине w , рядов контейнеров в штабеле по длине b (бэи — от англ. bay) и максимального количества ярусов в штабеле по высоте h . Эти параметры зависят от технических характеристик используемого оборудования, допустимой нагрузки на покрытие терминала и могут различаться от штабеля к штабелю. Таким образом, величина E определяется в соответствии со следующей формулой:

$$E = \sum_{k=1}^{N_{\text{ш}}} (w_k b_k h_k), \quad (12)$$

где $N_{\text{ш}}$ — количество контейнерных штабелей на терминале.

Предельная вместимость склада $E_{\text{пред}}$ определяется исходя из максимальной вместимости склада E и запаса вместимости $E_{\text{зап}}$, предназначенного для размещения контейнеров в процессе «копки». При этом необходимо отметить, что предельная вместимость не является оптимальной, а вопрос оптимизации вместимости склада не рассматривается в данной статье. Оптимальная оперативная вместимость склада $E_{\text{опт}}$ — такая, при которой количество лишних (непроизводительных) движений складской техники при «копке» контейнеров минимально, при этом вместимость является достаточной для обеспечения бесперебойной работы грузовых фронтов терминала (автомобильного, железнодорожного, морского). Предельная вместимость $E_{\text{пред}}$ — такая, при которой на складе не возникает ситуаций с невозможностью «копки» контейнеров из-за нехватки свободных слотов в штабеле. Количество непроизводительных движений техники при этом не важно. Обычно три этих параметра взаимосвязаны следующим неравенством: $E_{\text{опт}} \leq E_{\text{пред}} < E$.

Запас вместимости $E_{\text{зап}}$ в модели определяется исходя из принятой управленческой практики, согласно которой количество свободных слотов в каждом бэе штабеля должно быть не меньше максимальной высоты штабелирования минус один:

$$E_{\text{зап}} = \sum_{k=1}^{N_{\text{ш}}} B_k (h_k - 1), \quad (13)$$

где B_k — количество бэев (рядов контейнеров по длине штабеля) в штабеле k ;

h_k — максимальная высота штабелирования в штабеле k , ярусов.

При единообразии технологии работы склада на терминале (работа на складе только одним видом оборудования с одинаковыми характеристиками) формулу (13) можно упростить до следующего вида:

$$E_{\text{зап}} = B(h-1) = \frac{E(h-1)}{w}, \quad (14)$$

где B — количество бэев на контейнерном терминале;

w — количество контейнеров в штабеле по ширине;

h — максимальная высота складирования контейнеров на терминале.

Величины B , b , E , $E_{\text{зап}}$, $E_{\text{пред}}$ могут выражаться как в контейнерах (конт.), так и в TEU. Переход между этими единицами измерения осуществляется при помощи TEU-фактора (f_{TEU}), показывающего соотношение 40- и 20-футовых контейнеров в грузопотоке. Величины w и h выражаются в ед. рядов или ед. ярусов, поскольку ширина и высота 20- и 40-футового контейнера совпадают.

Предельная вместимость склада $E_{\text{пред}}$ определяется по формуле

$$E_{\text{пред}} = E - E_{\text{зап}}. \quad (15)$$

Математическое ожидание периода подхода ж.-д. составов должно составлять

$$\tau_{\text{ж}} = \frac{168}{\lambda_{\text{ж}}}, \quad (16)$$

где 168 ч — промежуток времени, равный одной неделе, поскольку $\lambda_{\text{ж}}$ задается в количестве составов в неделю.

Математическое ожидание периода судозаходов должно составлять:

$$\tau_c = \frac{720}{\lambda_c}, \quad (17)$$

где 720 ч — промежуток времени, равный одному месяцу, поскольку λ_c задается в количестве судозаходов в месяц.

В модели предлагается задавать размытие подхода ж.-д. составов и судов вокруг значений математических ожиданий $\tau_{\text{ж}}$ и τ_c . Модель автоматически генерирует карманы времени вокруг расчетных значений периодов, а вероятность попадания периода в соответствующий карман задается пользователем (рис. 2). Такой способ генерации судозаходов отличается от способов, применяемых авторами [3], [10]. В настоящем исследовании предлагаемый способ генерации судозаходов несколько более грубый, однако он является более наглядным для оператора модели, позволяя напрямую выполнять манипуляции с плотностью распределения периода судозаходов.

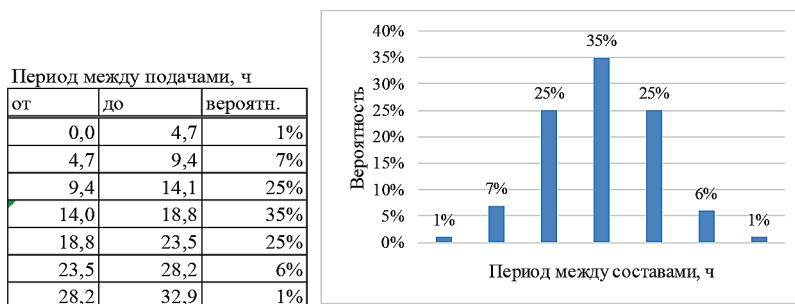


Рис. 2. Генерация периода подхода ж.-д. составов

По аналогии с генерацией периода подхода ж.-д. составов, приведенной на рис. 2, генерируются периоды судозаходов. При этом кроме генерации периода судозаходов, необходимо выполнить генерацию типа судна в зависимости от его контейнеровместимости (рис. 3). Каждая группа контейнеровместимости j имеет заданную загрузку импортными (приходящими на судне) контейнерами $D_{c,ij}$ и загрузку экспортными (погружаемыми на судно) контейнерами $D_{c,эj}$. Величины $D_{c,ij}$, $D_{c,эj}$, $D_{ж.и}$, $D_{ж.э}$ задаются пользователем.

Группы судов (j)	$D_{c,ij}$, конт.	$D_{c,эj}$, конт.	$P(j)$
от 0 до 500 TEU	113	113	30%
от 500 до 1 тыс. TEU	188	187	20%
от 1 до 2 тыс. TEU	447	446	20%
от 2 до 3 тыс. TEU	828	827	10%
от 3 до 4 тыс. TEU	1046	1045	10%
свыше 4 тыс. TEU	939	939	10%

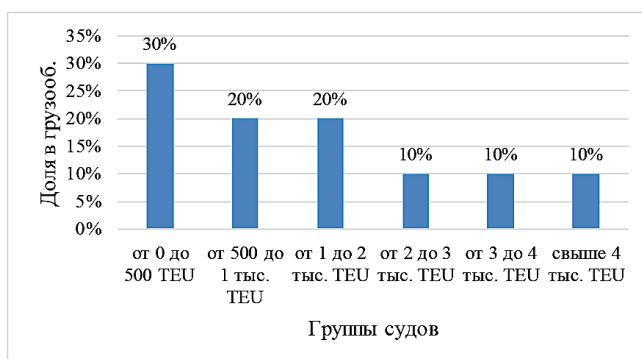


Рис. 3. Генерация судов в соответствии с группами контейнеровместимости

Формулы (1)–(15) позволяют выполнить моделирование в любой программной среде, предназначенной для работы с электронными таблицами. В данном исследовании использовано программное обеспечение Visual Basic Application MS Excel 2013.

Результаты (Results)

На модели был проведен ряд экспериментальных прогонов для оценки ее адекватности. В прогонах варьировались интенсивности прибытия морских судов λ_c и ж.-д. составов $\lambda_{ж}$, при этом остальные параметры моделируемого контейнерного терминала не изменялись.

Тестовая конфигурация термина включала один причал для обработки судов-контейнеровозов, оборудованный тремя причальными контейнерными перегружателями STS (от англ. Ship-To-Shore). Производительность одного STS принята равной 25 конт./ч. Таким образом, интенсивность работ на морском грузовом фронте составляет $\mu_c = 3 \times 25 = 75$ конт./ч. Железнодорожный грузовой фронт оснащен четырьмя контейнерными перегружателями на пневмоколесном (RTG — англ. Rubber Tyred Gantry) либо на рельсовом ходу (RMG — англ. Rail Mounted Gantry). Производительность одного перегружателя принята равной 20 конт./ч. Таким образом, интенсивность работ на ЖГФ составляет $\mu_{ж} = 4 \cdot 20 = 80$ конт./ч. Такой способ определения величин μ_c и $\mu_{ж}$ является примитивным, но вполне достаточным для тестовых прогонов модели. При определении интенсивности работ на грузовых фронтах реального контейнерного терминала рекомендуется следовать методике, изложенной в СП 350.1326000.2018, или использовать результаты анализа статистических данных о работе терминала.

Максимальная вместимость склада, определяемая геометрическими и технологическими характеристиками терминала, принята равной 7000 TEU. На всем складе предполагается использование единой технологии хранения контейнеров. Ширина штабеля $w = 12$ рядов. Максимальная высота штабелирования $h = 5$ ярусов. Такие характеристики штабелей соответствуют технологии хранения контейнеров с использованием складских козловых контейнерных перегружателей на рельсовом ходу (RMG). Поскольку технология хранения единая, можно воспользоваться формулой (14) для определения $E_{зап}$.

Размер запаса свободных слотов составляет $E_{зап} = 2333$ TEU, предельная вместимость склада составляет $E_{пред} = 4667$ TEU в соответствии с формулой (15). При TEU-факторе $f_{TEU} = 1,7$ (70 % 40-футовых и 30 % 20-футовых контейнеров в грузопотоке) величины $E_{зап}$ и $E_{пред}$ будут составлять 1373 конт. и 2745 конт. соответственно. Максимальная вместимость склада, выраженная в контейнерах, $E = 4118$ конт.

Количество контейнеров в составе ж.-д. подачи для выгрузки с платформ ($D_{ж.э}$) принято равным 80 конт., что соответствует контейнерному поезду длиной 38 платформ 80-фут. при максимальной вместимости одной платформы 4 TEU, TEU-факторе, равном 1,7, и коэффициенте заполнения платформ 0,9. Количество контейнеров к погрузке на платформы принято $D_{ж.и} = D_{ж.и} = 80$ конт. В модели предполагается, что в начальный момент времени ($i = 0$) состояние склада, т. е. количество контейнеров на складе, составляет половину от предельной вместимости склада:

$$e_0 = \frac{E_{пред}}{2} = 1373 \text{ конт.}$$

Серия тестовых экспериментов с моделью включала четыре серии прогонов:

- прогон 1 — интенсивности λ_c и $\lambda_{ж}$ сбалансированы и соответствуют интенсивностям грузовых работ μ_c и $\mu_{ж}$;
- прогон 2 — интенсивность подхода судов λ_c существенно превышает интенсивность $\lambda_{ж}$, при этом μ_c и $\mu_{ж}$ позволяют обработать грузопотоки на соответствующих фронтах;
- прогон 3 — интенсивность подхода ж.-д. составов $\lambda_{ж}$ существенно превышает интенсивность λ_c , при этом μ_c и $\mu_{ж}$ позволяют обработать грузопотоки на соответствующих фронтах;
- прогон 4 — интенсивности λ_c и $\lambda_{ж}$ сбалансированы, при этом они превышают интенсивности грузовых работ μ_c и $\mu_{ж}$.

Пример окна дискретно-событийной модели приведен на рис. 4. Зависимости между значениями, приведенными на рисунке, описаны в формулах (1)–(15).

i	a_{ji}	d_{jzi}	d_{jui}	x_{zi}	x_{ui}	e_{ui}	e_{zi}	e_i	y_{ui}	y_{zi}	a_{ci}	d_{cui}	d_{czi}
0	1	80	95	50	0	2500	2500	5000	0	0		0	0
1		30	95	30	20	2480	2530	5010	0	0		0	0
2		0	75	0	50	2430	2530	4960	0	0		0	0
3		0	25	0	25	2405	2530	4935	0	0		0	0
4		0	0	0	0	2405	2530	4935	0	0		0	0
5		0	0	0	0	2455	2530	4985	50	0	3	447	446
6		0	0	0	0	2505	2530	5035	50	0		397	446
7		0	0	0	0	2555	2530	5085	50	0		347	446
8		0	0	0	0	2605	2530	5135	50	0		297	446
9		0	0	0	0	2655	2530	5185	50	0		247	446
10		0	0	0	0	2705	2530	5235	50	0		197	446
11		0	0	0	0	2755	2530	5285	50	0		147	446
12		0	0	0	0	2805	2530	5335	50	0		97	446

Рис. 4. Пример дискретно-событийной модели в формате электронных таблиц

Исходные данные и наиболее показательные результаты экспериментов приведены в следующей таблице.

Результаты тестовых прогонов на модели

Прогон модели	Исходные данные		Результаты						
	λ_c	λ_j	e (среднее)	$\frac{e}{E}$	$e_{\max}$	$\frac{e_{\max}}{E_{\text{пред}}}$	$\frac{e_{\max}}{E}$	СКО (e)	$e > E_{\text{пред}}$
	Единица измерения								
	судозаход / мес.	сост. / нед.	конт.	%	конт.	%	%	конт.	Результат
Прогон 1	9,7	14	1597	39 %	2592	94 %	63 %	281	Нет
Прогон 2	20	14	5525	134 %	11496	419 %	279 %	2302	Да
Прогон 3	10	35	10011	243 %	20639	752 %	501 %	4794	Да
Прогон 4	65	75	3457	84 %	6791	247 %	165 %	1154	Да

На рис. 5 показаны срезы состояния склада с разбивкой по направлениям движения контейнеров через склад.

а)

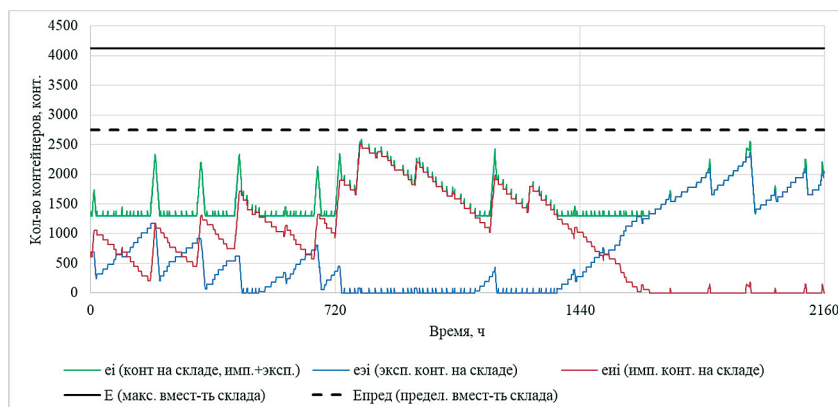
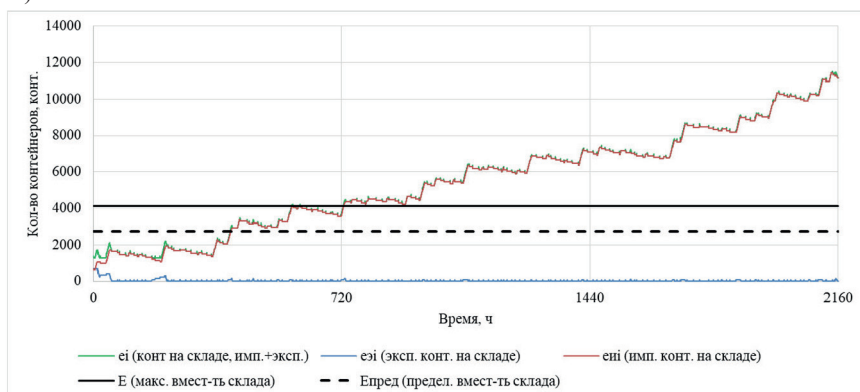
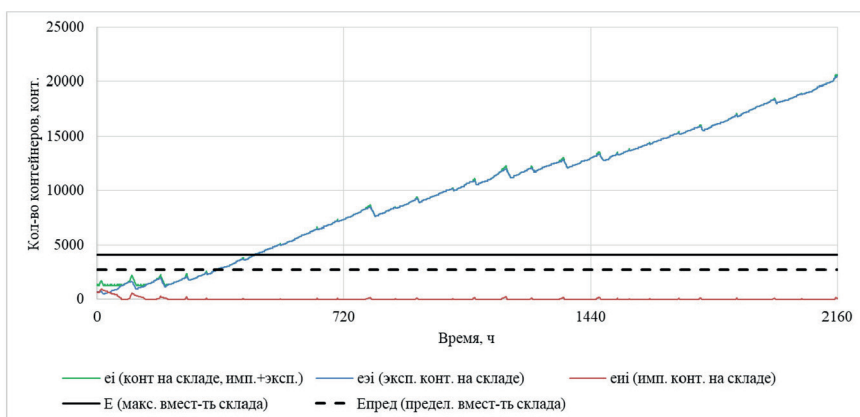


Рис. 5. Состояние склада моделируемого контейнерного терминала: а — прогон 1 (Начало)

б)



в)



г)

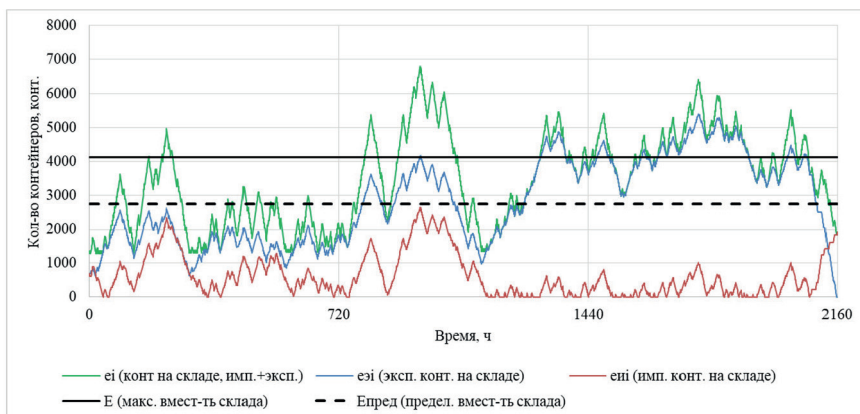


Рис. 5. Состояние склада моделируемого контейнерного терминала:
б — прогон 2; в — прогон 3; г — прогон 4 (Окончание)

Как видно из приведенной таблицы и рис. 5, результаты моделирования существенно различаются при разных исходных данных.

Обсуждение (Discussion)

В первом случае (прогон 1) интенсивности поступления транспорта на терминал (λ_c и $\lambda_{ж}$) имели достаточно низкие значения, с которыми легко справлялось оборудование терминала. При этом λ_c и $\lambda_{ж}$ были сбалансированы, таким образом, что ни один тип транспортных средств не превалировал над другим. Срез состояния склада, соответствующего этой ситуации представлен на рис. 5, а. Импортная и экспортная составляющие склада несколько раз сменяют друг друга в процентном отношении в течение прогона. Всплески импортных контейнеров на складе соответствуют прибытию

судов, из которых производится выгрузка контейнеров. При этом суда забирают экспортные контейнеры, которых становится существенно меньше на складе. Всплески экспортных контейнеров соответствуют периодам отсутствия судозаходов. В течение таких периодов на железнодорожном грузовом фронте (ЖГФ) продолжают поступать партии контейнеров, приходящие ж.-д. составами, а со склада убывают импортные контейнеры, уходящие ж.-д. транспортом.

Прогон 2 и 3 демонстрируют картину неограниченного роста одной составляющей склада. В прогоне 2 λ_c существенно превышает $\lambda_{ж}$, из-за чего на складе растет количество выгружаемых из судов импортных контейнеров (рис. 5, б). Пики неограниченно растущей кривой совпадают с подходом судов и поступлением импортных контейнеров на склад. При этом ж.-д. платформ подается слишком мало, и контейнеры не успевают вывозиться с терминала. Обратная ситуация наблюдается в прогоне 3, в котором $\lambda_{ж}$ существенно превышает λ_c (рис. 5, в). В этом прогоне количество заходящих судов недостаточно, чтобы справиться с поступающими экспортными контейнерами.

Таким образом, экспортные контейнеры в неограниченном количестве накапливаются на складе. При этом заметна следующая разница в форме кривых, приведенных на рис. 5, б и в: в случае избытка экспортных контейнеров, прибывающих ж.-д. составами, форма кривой более сглаженная, поскольку ж.-д. транспорт заходит на терминал чаще, но его партии меньше, чем на морском транспорте. При слишком высокой интенсивности подхода судов по сравнению с ж.-д. транспортом форма кривой больше напоминает «пилу», ввиду меньшей интенсивности захода судов, однако судовые партии здесь больше, чем партии контейнеров, прибывающие ж.-д. транспортом.

В прогоне 4 интенсивности λ_c и $\lambda_{ж}$ снова сбалансированы, однако теперь они превышают способность терминала по переработке груза (μ_c и $\mu_{ж}$). Из-за этого состояние склада e_i имеет более непредсказуемый характер. Это видно из рис. 5, г, а также из значения среднеквадратического отклонения (СКО) величины e_i от среднего значения, указанного в таблице на с. 598. Для прогона 1 СКО e_i составляло всего 281 контейнер, в то время как для прогона 4, также сбалансированного между λ_c и $\lambda_{ж}$, СКО e_i составило 1154 контейнера (больше чем в 4 раза выше). Кроме того, состояние склада e_i в течение прогона 4 несколько раз превышает как $E_{пред}$, так и E . Это означает, что при таких исходных данных терминал не сможет нормально работать.

Необходимо отметить, что некоторая часть порядка работы контейнерного терминала была упрощена для сохранения простоты модели. Например, очевидно, что склад терминала не может расти неограниченно, и графики на рис. 5 должны иметь несколько иной вид. Контейнеры должны накапливаться до значения E , при котором невозможны дальнейшие операции по их приему. В точке достижения $e_i = E$ график должен превращаться в горизонтальный отрезок, пока не будет произведена разгрузка склада, при этом в модели график растет неограниченно. Однако это не означает, что модель ведет себя некорректно, такая форма представления неограниченного роста склада свидетельствует о существенном дисбалансе в интенсивностях подхода транспорта на грузовые фронты.

Заключение (Conclusion)

В выполненном исследовании предлагается относительно простая в реализации дискретно-событийная модель взаимодействия грузовых фронтов контейнерного терминала: «ЖГФ – склад – МГФ», реализованная в виде электронной таблицы с зависимостями между основными параметрами. Тестовая серия экспериментов на модели показала ее адекватность.

Данная дискретно-событийная модель позволяет решить следующие задачи, связанные с оценкой пропускной способности действующих морских портов и контейнерных терминалов:

- оценка пропускной способности с учетом не только технологического оборудования, но и текущей интенсивности подхода транспортных средств;
- оценка пропускной способности терминала с учетом взаимосвязи между грузовыми фронтами (большое количество судов и малое количество ж.-д. платформ приведет к переполнению склада, тогда как расчет по фронтам может показать, что каждый грузовой фронт в отдельности имеет возможность справиться с грузооборотом);

– реализация простого и доступного инструмента, удобного для применения с любыми средствами работы с электронными таблицами.

В перспективе данная модель может быть усовершенствована в следующих направлениях:

- 1) добавление в нее автомобильного грузового фронта (АГФ);
- 2) совершенствование логики модели с точки зрения накопления и расформирования склада: запрет на превышение предельной или максимальной вместимости склада, организация только разгрузки склада при его заполнении;
- 3) совершенствование логики модели с точки зрения сроков хранения контейнеров на терминале: введение минимального срока хранения, необходимого для оформления документов перед отправкой контейнеров, подсчет среднего срока хранения контейнеров;
- 4) выделение дополнительных видов перегружаемых контейнеров: рефрижераторные контейнеры и контейнеры с опасными грузами;
- 5) введение дополнительных зон терминала в модель: склад СВХ, зона таможенного контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бунина А. В. Обзор современных средств имитационного моделирования в области транспорта / А. В. Бунина, Д. А. Сивицкий // Интеллектуальный потенциал Сибири. — 2020. — С. 288–290.
2. Dragović B. Simulation modelling in ports and container terminals: literature overview and analysis by research field, application area and tool / B. Dragović, E. Tzannatos, N. K. Park // Flexible Services and Manufacturing Journal. — 2017. — Vol. 29. — Pp. 4–34. DOI: 10.1007/s10696-016-9239-5.
3. Кузнецов А. Л. Имитационное моделирование как инструмент оценки влияния вместимости склада морского порта на качество обработки наземного транспорта / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, С. С. Валькова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2019. — № 54–55. — С. 19–30.
4. Мазуренко О. И. Дискретно-событийное моделирование морского грузового фронта экспортного угольного терминала в среде Anylogic / О. И. Мазуренко, И. А. Русинов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2022. — № 2. — С. 102–114. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-2-102-114.
5. Король Р. Г. Имитационное моделирование системы «Железнодорожная станция морской порт» на примере Владивостокского транспортного узла / Р. Г. Король, А. С. Балалаев // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 209–216. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-209-216.
6. Янченко А. А. Дискретно-событийная модель в задачах эксплуатации контейнерных терминалов / А. А. Янченко, Т. Е. Маликова // Эксплуатация морского транспорта. — 2017. — № 4 (85). — С. 25–31.
7. Янченко А. А. Экспериментальные исследования влияния зонирования контейнерного терминала на эффективность его работы в условиях свободного порта Владивосток / А. А. Янченко, Т. Е. Маликова, Д. А. Оськин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 57–67. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-57-67.
8. Янченко А. А. Научные подходы к исследованию процессов функционирования морских портов и портовых терминалов / А. А. Янченко // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2018. — № 55. — С. 185–192.
9. Carteni A. Tactical and strategic planning for a container terminal: Modelling issues within a discrete event simulation approach / A. Carteni, S. De Luca // Simulation Modelling Practice and Theory. — 2012. — Vol. 21. — Is. 1. — Pp. 123–145. DOI: 10.1016/j.simpat.2011.10.005.
10. 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.

REFERENCES

1. Bunina, A. V. and D. A. Sivitskiy “Overview of modern tools for simulation modelling of transport.” *Intellectual Potential of Siberia* (2020): 288–290.

2. Dragović, Branislav, Ernestos Tzannatos, and Nam Kuy Park. "Simulation modelling in ports and container terminals: literature overview and analysis by research field, application area and tool." *Flexible Services and Manufacturing Journal* 29 (2017): 4–34. DOI: 10.1007/s10696-016-9239-5.
3. Kuznetsov, A. L., A. D. Semenov, and S. S. Valkova. "Simulation tool for evaluation of influence of seaport warehouse capacity on inland transport service quality." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 54–55 (2019): 19–30.
4. Mazurenko, Ol'ga Igorevna, and Igor' Aleksandrovich Rusinov. "Discrete-event simulation of sea cargo front of export coal terminal in Anylogic environment." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2022): 102–114. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-2-102-114.
5. Korol, R. G., and A. S. Balalaev. "The simulation modeling system "Railway station — Seaport" Vladivostok transport hub." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 209–216. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-209-216.
6. Yanchenko, A. A., and T. E. Malikova. "A discrete — event model for operations in container terminals." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4 (2017): 25–31.
7. Yanchenko, Anna A., Tatiana E. Malikova, and Dmitry A. Oskin. "Experimental studies of the impact of a container terminal zoning on its operation efficiency under the conditions of the free port Vladivostok." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 57–67. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-57-67.
8. Yanchenko, A. A. "Scientific approaches to the sea ports and port terminals operating processes study." *Bulletin of VSAWT* 55 (2018): 185–192.
9. Carteni, Armando, and Stefano De Luca. "Tactical and strategic planning for a container terminal: Modelling issues within a discrete event simulation approach." *Simulation Modelling Practice and Theory* 21.1 (2012): 123–145. DOI: 10.1016/j.simpat.2011.10.005.
10. 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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
Галин Александр Валентинович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: galin2403@gmail.com, kaf_top@gumrf.ru
Попов Герман Борисович —
кандидат технических наук,
инженер отдела технологии
ООО «Морское строительство и технологии»
195220, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Гжатская, 21 к. 2, лит. А
e-mail: german_bp@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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
Galin, Aleksandr 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: galin2403@gmail.com, kaf_top@gumrf.ru
Popov, German B. —
PhD,
technology department engineer
Morstroytechnology Company
21/2 Gzhatskaya Str., St. Petersburg, 195220,
Russian Federation
e-mail: german_bp@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27 апреля 2023 г.
Received: April 27, 2023.