

## SIMULATION MODELING OF THE REAR CARGO FRONTS OF MARINE COAL TERMINALS

**O. I. Mazurenko, I. A. Rusinov**

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

*The issues of simulation of complex transport hubs and systems are considered in the paper. The sea coal terminals, which are complex transport hubs that perform the final operations of railway transport and the initial operations of sea transport, which constitute a single transport process for the transportation of coal, are discussed in the paper. In international and domestic transport science, sea terminals are often considered as queuing systems, the basic principles and patterns of operation of which are explained using the methods of queuing theory. However, the use of exclusively queuing theory methods in the design and calculation of the performance indicators of marine coal terminals often leads to unreliable and underestimated results due to the large number of stochastic processes occurring at the terminals when servicing incoming transport requests. This is due to a significant number of latent factors affecting the quality and intensity of servicing transport requests, as well as the presence of internal parallelism of processes. In this regard, in the modern scientific community, the methods of computer simulation are recognized as the most adequate tool for solving such problems. The creation of digital analogs of complex sea transport nodes in computer programs and the further implementation of simulation experiments makes it possible to obtain much more accurate and visual results on the planned performance of sea terminals, and also provides reliable information about the degree of influence of certain factors on their work processes. The Anylogic environment is chosen for modeling. Using environmental elements, a digital copy of the rear cargo front of the marine coal terminal, which serves the requests of land transport, is created. A detailed explanation of the principles and approach to creating a digital model is provided, all the internal connections of the elements of the digital twin are clarified, and information on the options for setting up and controlling the model, and also brief information on the results obtained, is provided in the paper.*

*Keywords: simulation modeling, seaports, coal terminals.*

**For citation:**

Mazurenko, Olga I., and Igor A. Rusinov. "Simulation modeling of the rear cargo fronts of marine coal terminals." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.5 (2021): 636–650. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-636-650.

**УДК 656.615**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЫЛОВОГО ГРУЗОВОГО ФРОНТА МОРСКОГО УГОЛЬНОГО ТЕРМИНАЛА

**О. И. Мазуренко, И. А. Русинов**

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

*Настоящая статья посвящена вопросам имитационного моделирования сложных транспортных узлов и систем. Рассматриваются морские угольные терминалы, являющиеся комплексными транспортными узлами, выполняющими конечные операции железнодорожного транспорта и начальные операции морского транспорта, составляющие единый транспортный процесс перевозки угля. В международной и отечественной транспортной науке морские терминалы зачастую рассматриваются как системы массового обслуживания, основные принципы и закономерности работы которых объясняются с помощью методов теории массового обслуживания. Однако применение при проектировании и расчетах показателей работы морских угольных терминалов исключительно методов теории массового обслуживания зачастую ведет к недостоверным и заниженным результатам в связи с большим количеством стохастических*

процессов, происходящих на терминалах при обслуживании входящих заявок транспорта. Данное обстоятельство обусловлено значительным количеством скрытых факторов, влияющих на качество и интенсивность обслуживания заявок транспорта, а также наличием внутреннего параллелизма процессов. В этой связи в современном научном сообществе методы имитационного компьютерного моделирования признаны наиболее адекватным инструментом для решения подобного рода задач. Создание цифровых аналогов сложных морских транспортных узлов в компьютерных программах и дальнейшее проведение имитационных экспериментов позволяет получать гораздо более точные и наглядные результаты о планируемых показателях работы морских терминалов, а также дает достоверные сведения о степени влияния тех или иных факторов на процессы их работы. Для проведения моделирования в работе выбрана среда AnyLogic, с помощью элементов которой была создана цифровая копия тылового грузового фронта морского угольного терминала, осуществляющего обслуживание заявок сухопутного транспорта. В статье приведено подробное разъяснение принципов и подхода к созданию цифровой модели, уточнены все внутренние связи элементов цифрового двойника, приведены сведения о вариантах настройки и управления моделью, а также дана краткая информация о полученных результатах.

*Ключевые слова:* имитационное моделирование, морские порты, угольные терминалы.

**Для цитирования:**

Мазуренко О. И. Моделирование тылового грузового фронта морского угольного терминала / О. И. Мазуренко, И. А. Русинов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 5. — С. 636–650. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-636-650.

**Введение (Introduction)**

В международной и отечественной транспортной науке процессы, протекающие на морских терминалах, часто описываются с помощью методов теории массового обслуживания (далее — ТМО). Согласно ТМО, морские терминалы и составляющие их элементы: морской грузовой фронт, склад и тыловые грузовые фронты, рассматриваются в качестве систем массового обслуживания (далее — СМО). Каждая из этих систем представляется в виде следующих основных подсистем:

- источники заявок, требующие обслуживания (поступление сухопутного транспорта, морских судов, материальных потоков, грузов);
- системы обслуживания, осуществляющие исполнение поступающих заявок (станции выгрузки авто и железнодорожного транспорта, морские причалы с перегрузочным оборудованием, технические средства и транспортные мощности).

Грузовые фронты морских навалочных терминалов, в том числе угольных, в случае наличия только одного канала обслуживания — причала или станции разгрузки сухопутного транспорта, в рамках методов ТМО могут рассматриваться как одноканальные СМО с неограниченной очередью [1]. На рис. 1 представлен граф состояний подобной одноканальной СМО. Состояния системы нумеруются по числу заявок, находящихся в работе в СМО:

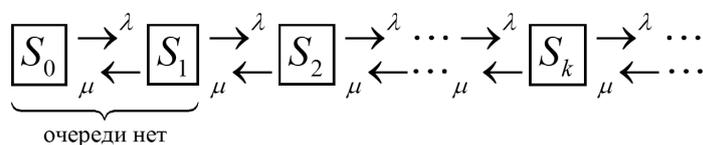


Рис. 1. Граф состояний одноканальной СМО с неограниченной очередью

Одноканальная СМО может в определенный момент времени находиться только в одном из следующих состояний:

- $S_0$  — грузовой фронт (канал) свободен;
- $S_1$  — грузовой фронт (канал) обслуживает заявку, очереди на обслуживание нет;
- ...
- $S_k$  — грузовой фронт (канал) обслуживает заявку, в очереди  $(k-1)$  заявок;
- ...

Как показано в графе состояний на рис. 1, входящие заявки с интенсивностью  $\lambda$  переводят СМО слева направо, а поток обслуживания заявок  $\mu$  переводит СМО справа налево. В таком случае коэффициент использования пропускной способности СМО оценивается как величина  $\rho = \lambda/\mu$ . Соответственно, если величина  $\rho \geq 1$ , то очередь входящих заявок будет расти до бесконечности. При этом практика применения методов ТМО свидетельствует о том, что любая СМО при увеличении числа каналов обслуживания заявок (в случае морских терминалов — количества причалов или станций разгрузки сухопутного транспорта) показывает гораздо более высокие значения интенсивности обслуживания заявок  $\mu$ , позволяя уменьшать время их нахождения в очереди на обслуживание при сохранении аналогичного значения относительного времени ожидания. Соответственно на практике наличие нескольких причалов или станций разгрузки сухопутного транспорта позволяет значительно увеличить общую эффективность использования грузовых фронтов терминала. На рис. 2 представлен граф состояний многоканальной СМО с неограниченной очередью.

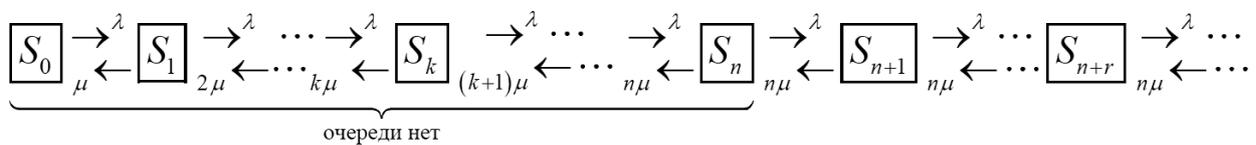


Рис. 2. Граф состояний многоканальной СМО с неограниченной очередью

Соответственно многоканальная СМО может в определенный момент времени находиться только в одном из следующих состояний:

- $S_0$  — в системе нет заявок (все каналы свободны);
- $S_1$  — один канал системы занят (остальные каналы свободны);
- $S_2$  — два канала системы заняты (остальные каналы свободны);
- ...;
- $S_k$  —  $k$  каналов системы заняты (остальные каналы свободны);
- ...;
- $S_n$  — заняты все  $n$  каналов системы, очереди на обслуживание нет;
- $S_{n+1}$  — заняты все  $n$  каналов системы, одна заявка в очереди на обслуживание;
- ...;
- $S_{n+r}$  — заняты все  $n$  каналов системы,  $r$  заявок в очереди на обслуживание;
- ...

При этом, если величина  $\rho/n \geq 1$ , то очередь входящих заявок будет расти до бесконечности. Снижение времени пребывания заявки в СМО и времени ожидания в очереди возможно только при наличии значительных резервов пропускной способности СМО. Однако увеличение физических резервов пропускной способности и количества каналов обслуживания в СМО — строительство новых причалов или оборудование дополнительных пунктов разгрузки сухопутного транспорта — связано с большими финансовыми и материальными затратами на их создание и содержание [2]. Таким образом, зачастую на практике проектирование и эксплуатация морских портов и терминалов с использованием методов ТМО сводится к проблеме поиска оптимального баланса между длиной очереди заявок (транспорта) и резервами пропускной способности морского терминала (количеством причалов и станций обработки сухопутного транспорта).

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Решение данной проблемы выполняется на основе расчетных моделей, позволяющих оценить основные показатели и характеристики работы морского терминала [3]. Для клиента терминала: морской, железнодорожной или автомобильной транспортной компании, основной характеристикой является время ожидания его транспорта в очереди на обслуживание на терминале, т.е. среднее время пребывания заявки в очереди на обслуживание. Для собственника терминала (стивидорной

компании) основной характеристикой является коэффициент использования пропускной способности (коэффициент занятости грузового фронта):

$$k_{\text{зан}} = \rho = \frac{\lambda n}{\mu}, \quad (1)$$

где  $n$  — количество каналов обслуживания.

Коэффициент использования пропускной способности также показывает затрачиваемое количество времени из общего бюджета рабочего времени на терминале непосредственно обработку транспорта:

$$k_{\text{зан}} = \frac{T_p}{T_o}, \quad (2)$$

где  $T_p$  — рабочее время, затраченное на обработку поступившего транспорта;

$T_o$  — общий бюджет рабочего времени грузового фронта терминала.

Общий бюджет рабочего времени грузового фронта терминала определяется как разность между общим календарным временем  $T$  и общим временем простоев в течение календарного периода  $T_{\text{пр}}$ :

$$T_o = T - T_{\text{пр}}. \quad (3)$$

Применительно к тыловым железнодорожным грузовым фронтам морских навалочных терминалов, в том числе угольных, простои в работе грузового фронта  $T_{\text{пр}}$  можно условно разделить на *управляемые* и *неуправляемые* [4]. Под управляемыми простоями понимаются простои, вызванные следующими транспортными и производственными факторами:

*Транспортные факторы:*

- задержки в прибытии и подаче груженых составов на грузовые фронты;
- задержки при маневровой работе в пределах грузового фронта терминала;
- занятость путей для выставления порожних вагонов из-за задержек вывоза порожних составов;
- задержки, связанные со смерзанием груза в кузовах вагонов;
- задержки, связанные с необходимостью подбора угля по маркам в прибывших составах для обеспечения однородной выгрузки.

*Производственные факторы:*

- аварии и внештатные ситуации на оборудовании и в производственных комплексах;
- плановые и внеплановые ремонты перегрузочного оборудования на станциях выгрузки;
- очистка оборудования в зимний период от снега и льда;
- ремонт и обслуживание питателей.

Под неуправляемыми простоями понимаются простои, связанные с неудовлетворительными условиями окружающей среды: сильные снегопады, морозы, природные катаклизмы и др. Структура общего бюджета рабочего времени грузового фронта терминала приведена на рис. 3.

Экспортный груз угля поступает для выгрузки на все морские угольные терминалы в мире исключительно железнодорожным транспортом. Затем на терминалах груженные углем железнодорожные составы обрабатываются на сети собственных железнодорожных путей терминалов, рядом с которыми оборудуются тыловые железнодорожные грузовые фронты, устанавливаются пути и механизмы выгрузки железнодорожных вагонов — станции разгрузки вагонов. Все грузовые операции по обслуживанию входящего грузопотока на экспортных угольных терминалах приходятся именно на подъездные пути терминалов. Морские угольные терминалы выступают транспортными узлами, на которых выполняются конечные операции железнодорожного транспорта и начальные операции водного транспорта, являющиеся составляющими частями единого транспортного процесса по доставке угля.

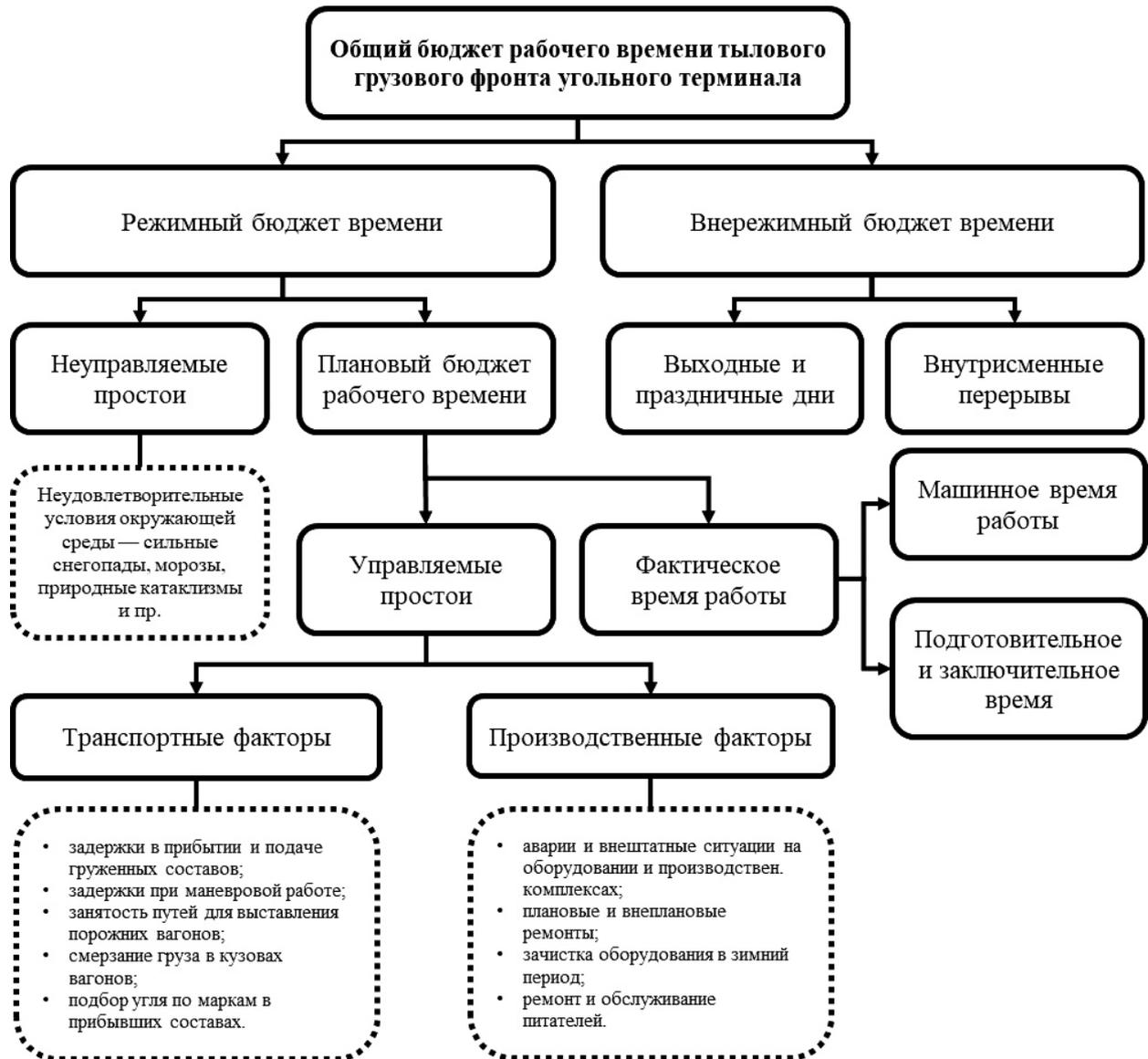


Рис. 3. Структура общего бюджета рабочего времени тылового грузового фронта морского угольного терминала

В России, согласно действующему «Уставу железнодорожного транспорта» [5] и «Нормам технологического проектирования морских портов» [6], взаимоотношения между железнодорожным перевозчиком ОАО «РЖД» и морскими терминалами осуществляются на договорной основе. Собственные железнодорожные подъездные пути морских угольных терминалов могут обслуживаться как собственным (арендованным) маневровым локомотивом по договору эксплуатации подъездного пути, так и локомотивом железнодорожного перевозчика — ОАО «РЖД» согласно договору на подачу и уборку вагонов. В зависимости от варианта обслуживания подъездных путей между угольным терминалом и железнодорожным перевозчиком — ОАО «РЖД», разрабатывается и согласовывается порядок взаимодействия железнодорожной станции примыкания и подъездных путей [7].

Время, затраченное на обработку поступившего транспорта на тыловом железнодорожном грузовом фронте терминала —  $T_p$ , рассчитывается как суммарное время, затраченное на совершение определенного набора операций:

$$T_p = t_{п-сд} + t_{под} + t_{ман} + \sum t_{выг} + \sum t_{тб} + t_{уб}, \quad (4)$$

где  $t_{п-сд}$  — время на приемо-сдаточные операции, ч;

- $t_{\text{под}}$  — время на подачу состава с углем на выгрузочные пути терминала, ч;  
 $t_{\text{ман}}$  — время на маневровые операции с составом на выгрузочных путях, ч;  
 $\sum t_{\text{выг}}$  — суммарное время на выгрузку груза угля из всех железнодорожных вагонов в составе, ч;  
 $\sum t_{\text{тб}}$  — суммарное время на перестановку выгруженных вагонов на пути сбора порожних, ч;  
 $t_{\text{уб}}$  — время на уборку состава из порожних вагонов с подъездных путей терминала, ч.

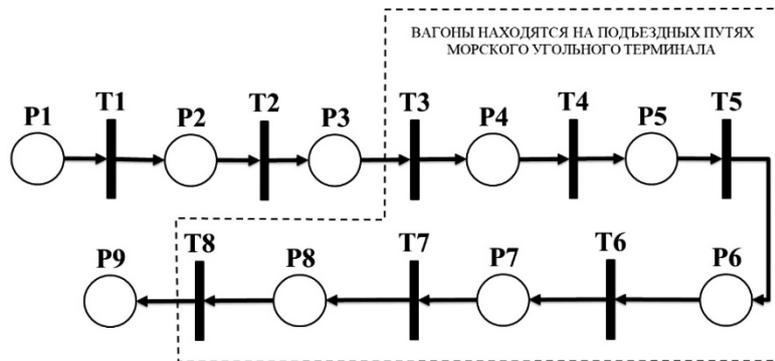


Рис. 4. Графическая модель процесса обработки угля на тыловых фронтах морского терминала

С точки зрения последовательности действий все операции, выполняемые на тыловых железнодорожных грузовых фронтах морских угольных терминалов, удобно и наглядно представить с помощью сети Петри (рис. 4 и табл. 1).

Таблица 1

**Операции по обработке составов на тыловом грузовом фронте терминала**

Операция	Описание
$P_1$	Простой прибывшего груженого углем состава на приемо-отправочных путях станции примыкания в ожидании подачи на выставочные железнодорожные пути
$T_1$	Подача груженого железнодорожного состава на выставочные пути железнодорожной станции примыкания локомотивом железнодорожного перевозчика
$P_2$	Простой груженого состава в ожидании прицепки к собственному (арендованному) локомотиву для подачи на подъездные пути угольного терминала
$T_2$	Прицепка груженого углем состава к собственному (арендованному) локомотиву
$P_3$	Проведение технического и коммерческого осмотра вагонов, подписание «Памятки приемосдатчика на подачу и уборку вагонов» по форме ГУ-45
$T_3$	Постановка груженого углем состава на подъездные пути морского угольного терминала под выгрузку на станции разгрузки вагонов (СРВ)
$P_4$	Простой груженого состава в ожидании выгрузки на станции разгрузки вагонов (СРВ / вагонопрокидывателях)
$T_4$	Разбивка (в зимний период) состава на плети, по 24 вагонов в каждой, и их подача собственным (арендованным) локомотивом для прохождения через пункты обогрева вагонов и дальнейшей выгрузки на станции разгрузки вагонов (СРВ)
$P_5$	Простой вагонов в ожидании подачи для выгрузки на станции разгрузки вагонов (СРВ)
$T_5$	Подача груженых вагонов собственным (арендованным) локомотивом на станцию разгрузки вагонов (СРВ) через пункты разогрева вагонов
$P_6$	Расцепка состава / плетей составителем поездов на станции разгрузки вагонов (СРВ) по один или по два вагона и их поочередная выгрузка на вагонопрокидывателях;
$T_6$	Уборка порожних вагонов со станции разгрузки вагонов (СРВ / вагонопрокидывателей) пневматическими толкателями и их перестановка на пути уборки посредством автоматических трансбордеров
$P_7$	Простой порожних вагонов на путях уборки в ожидании сборки составов посредством пневматических толкателей

Таблица 1  
(Окончание)

<i>T7</i>	Уборка собранных плетей порожних вагонов на выставочные подъездные пути морского угольного терминала
<i>P8</i>	Простой порожних составов на выставочных подъездных путях терминала в ожидании прицепки к собственному (арендованному) локомотиву
<i>T8</i>	Прицепка порожнего железнодорожного состава к собственному (арендованному) локомотиву, подача на выставочный путь станции примыкания
<i>P9</i>	Приемо-сдаточные операции, подписание «Памятки приемосдатчика на подачу и уборку вагонов» по форме ГУ-45, отцепка собственного (арендованного) локомотива, ожидание локомотива железнодорожного перевозчика — ОАО «РЖД», для вывоза со станции

В соответствии с «Уставом железнодорожного транспорта» и «Правилами перевозки груза железнодорожным транспортом» вагоны числятся в пользовании грузополучателя — морского угольного терминала, с момента их передачи грузополучателю в точке *P3* до момента их фактического приема с подъездных путей в точке *P9*. Точное время подачи вагонов и их уборки фиксируются в «Памятке о подаче и уборке вагонов» по форме ГУ-45. На рис. 4 пунктиром дополнительно обозначены операции с вагонами во время их нахождения у грузополучателя на подъездных путях морского терминала.

### Результаты (Results)

Поток входящих заявок на обслуживание железнодорожных составов  $\lambda$ , на терминале является по своей природе неравномерным. Возможно, как «сгущенное» прибытие поездов под выгрузку на терминале, так и появление значительных интервалов в их поступлении. Это связано с тем, что доставка груза угля на морские терминалы чаще всего осуществляется из достаточно удаленных в глубь суши угольных разрезов, находящихся на расстоянии 3000–4000 км от морских портов и мест перевалки на суда. Срок транзита груза в таких случаях составляет 10–15 сут. Ввиду объективных транспортных факторов и большой дальности перевозок, на угольные терминалы может пребывать как по 15–20 составов в сутки, так и по 5–7.

Нестационарность потоков входящего транспорта часто обусловлена также иными факторами, такими как сезонность и связанные с ней трудности транспортировки груза угля, расторжение и заключение новых запродажных контрактов на поставки, государственное регулирование экспорта, нехватка или профицит железнодорожного подвижного состава для перевозки угля, изменение конъюнктуры локального и международного угольного рынка и др. Совокупность всех ранее указанных факторов приводит к тому, что интенсивность поступления входящих заявок транспорта на обслуживание значительно отличается от той средней, заложенной проектировщиками при расчете параметров угольного терминала. Отклонения от подобных показателей могут составлять порой даже не десятки, а сотни процентов. При этом в рамках одного временного периода может значительно изменяться также поток обслуживания заявок на терминале  $\mu$ . Его изменения могут быть связаны с неожиданным выходом из строя оборудования и перегрузочных машин, проблемами с электрическим питанием перегрузочного комплекса, природными катаклизмами, человеческим фактором (нехватка персонала, забастовки, стачки), необходимостью планового дорогостоящего ремонта или реновации, на которые у собственников терминала в данный момент не хватает денежных средств.

Все эти факторы могут оказывать значительное влияние на общую перерабатывающую способность терминала и его отдельных грузовых фронтов, приводя к возникновению очередей из железнодорожных составов, ожидающих выгрузки на терминале, и очередей морских судов, ожидающих погрузки [8]. Влияние всех указанных ранее факторов на поток входящих заявок транспорта на обслуживание  $\lambda$  и поток обслуживания заявок  $\mu$  на практике может настолько значительным, что применение исключительно методов ТМО при проектировании морского угольного терминала не позволит в итоге получить необходимые результаты. Вследствие этого при осуществлении

проектирования морских угольных терминалов более целесообразным является использование комплексного подхода на основе имитационного моделирования [9].

Для построения дискретно-событийной имитационной модели морского экспортного угольного терминала выбрано программное обеспечение компании Anylogic (версия 8.7.6). В рабочем окне агента верхнего уровня *Main* реализовано шесть основных зон модели:

- зона *View2D*, в которой представлен графический план терминала, нанесены ландшафт среды модели и элементы железнодорожной и портовой инфраструктуры терминала, а также показаны связи между элементами;
- зона *View3D*, в которой представлена трехмерная визуализация графического плана терминала, позволяющая в режиме «летающей камеры» перемещаться по модели;
- зона *View3DMultiple*, представляющая собой компоновку четырех камер обзора трехмерной реализации зоны «*View3D*»;
- зона *ViewLogic*, являющаяся графической реализацией математической логики поведения моделируемого терминала, представленной с использованием встроенных блоков программного обеспечения Anylogic;
- зона *ViewControl*, являющаяся главным окном управления поведением имитационной модели, в которой реализовано управление основными параметрами, настраиваемыми с использованием элементов программного обеспечения *AnyLogic*: флажков, переключателей и бегунков.
- зона *ViewStat*, в которой в режиме реального времени в виде временных графиков представляются результаты работы имитационной модели, а также ведется подсчет итоговых показателей деятельности терминала.

В основу работы моделируемого железнодорожного грузового фронта терминала заложен алгоритм логики, сформированный и представленный в зоне *ViewLogic* с помощью «железнодорожной библиотеки» программного обеспечения *AnyLogic*, позволяющей моделировать и визуализировать функционирование железнодорожных узлов и железнодорожных систем терминала. «Железнодорожная библиотека» в модели интегрирована с другими библиотеками *AnyLogic*: «библиотекой моделирования процессов» и «библиотекой моделирования потоков», позволяя соединять железнодорожную часть модели с производственной, складской и морской [10].

Далее при работе над моделью с помощью элементов разметки пространства показана структура и внутренние физические связи тылового железнодорожного грузового фронта терминала. На рис. 5 представлен графический план моделируемого фронта, а в табл. 2 приведены элементы инфраструктуры терминала.

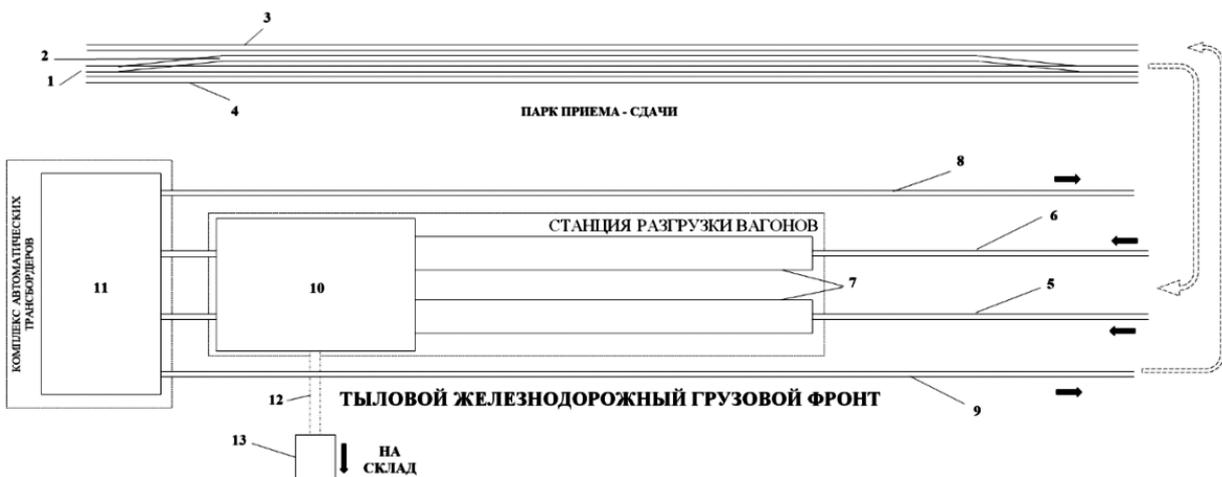


Рис. 5. План моделируемого тылового грузового фронта морского угольного терминала

Элементы плана моделируемого тылового грузового фронта

Элемент	Описание
1	Железнодорожный путь прибытия <i>EnterTrack</i> с точками остановки составов <i>TrainEntranceStop, LocoStopFore</i> и <i>LocoStopBack</i>
2	Маневровый железнодорожный путь <i>ShuntingTrack</i> для перестановки локомотива с головы в хвост железнодорожного состава
3	Железнодорожный путь убытия порожних составов <i>Exit1Track2</i> с точкой остановки <i>LocoStopExit1</i>
4	Железнодорожный путь убытия порожних составов <i>Exit2Track2</i> с точкой остановки <i>LocoStopExit2</i>
5	Железнодорожный путь подачи к вагоноопрокидывателю № 1 на станцию разгрузки вагонов <i>UnloadingTrackN1</i>
6	Железнодорожный путь подачи к вагоноопрокидывателю № 2 на станцию разгрузки вагонов <i>UnloadingTrackN2</i>
7	Пункты обогрева железнодорожных вагонов
8	Путь сбора порожних вагонов второго вагонного трансбордера <i>Exit2Track</i> с точкой остановки <i>EmptyStop2</i>
9	Путь сбора порожних вагонов первого вагонного трансбордера <i>Exit1Track</i> с точкой остановки <i>EmptyStop1</i>
10	Комплекс зданий двух вагоноопрокидывателей с точками остановки вагонов <i>UnloadStop1, UnloadStop2</i> и точками выгрузки <i>Unload1</i> и <i>Unload2</i>
11	Комплекс зданий двух вагонных трансбордеров с точками перестановки вагонов <i>EmptyLeave1</i> и <i>EmptyLeave2</i>
12	Подземные питатели (конвейеры) <i>ConveyorStart</i> комплекса вагоноопрокидывателей
13	Станция аспирации воздуха комплекса вагоноопрокидывателей

Далее при работе над моделью в зоне *ViewLogic* задан алгоритм работы имитационной модели при помощи стандартизированных блоков, которые дополнительно подстраиваются как имеющимися внутренними настройками и параметрами самих блоков, так и при помощи языка программирования Java (рис. 6, табл. 3).

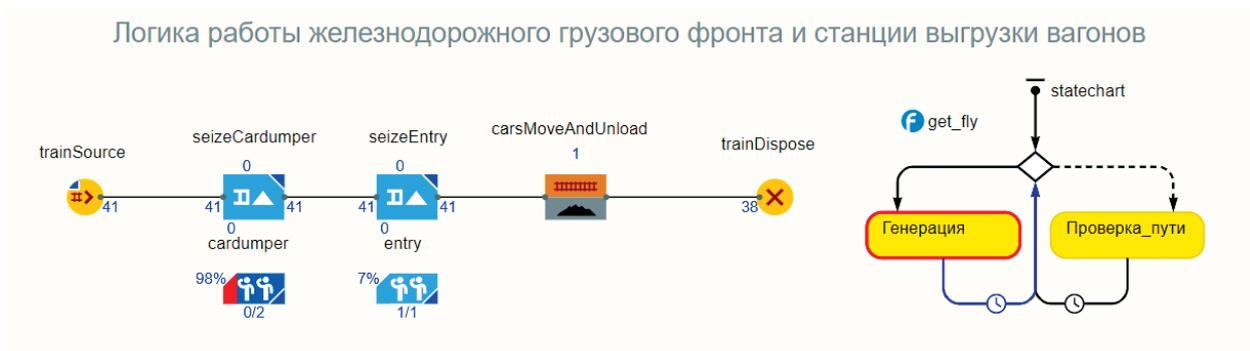
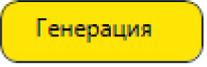


Рис. 6. Общий вид блок-схемы алгоритма работы имитационной модели

Функционал блоков логики алгоритма работы модели

№ п/п.	Блок логики	Функциональность
1	<i>trainSource</i> 	Блок отвечает за генерацию груженых углем составов в модели. Поезда генерируются согласно вызовам метода <i>Inject()</i> . Количество вагонов в составе поезда определяется параметром <i>NumberOfCars</i> . После создания поезд остается как заявка в системе. Популяции созданных поездов добавляются в агент <i>Trains</i>

Таблица 3  
 (Окончание)

2	 <b>seizeCardumper</b>	Блок захватывает для сгенерированного состава с углем один статический ресурс — вагонопрокидыватель для выгрузки из блока <i>Cardumper</i>
3	 <b>cardumper</b>	Блок создает набор из двух статических ресурсов-вагонопрокидывателей на станции разгрузки вагонов. Количество доступных ресурсов в данном блоке определяет количество работающих вагонопрокидыватели на терминале
4	 <b>seizeEntry</b>	Блок захватывает для сгенерированного состава с углем один статический ресурс — путь прибытия. Необходимость данного действия и блока обусловлена поступлением всех сгенерированных составов на один путь <i>EnterTrack</i>
5	 <b>entry</b>	Блок создает набор из одного статического ресурса — пути прибытия. Наличие данного блока позволяет избежать единовременной регенерации двух составов на одном пути и сбоя в модели
6	 <b>carsMoveAndUnload</b>	Является нестандартным блоком, объединяющим в себе функции выгрузки экспортного угля из железнодорожных вагонов на морском терминале на станции разгрузки вагонов
7	 <b>trainDispose</b>	Блок заканчивает диаграмму алгоритма работы имитационной модели и отвечает за удаление порожних выгруженных составов из модели
8	 <b>Генерация</b>	Блок является частью диаграммы состояний. В случае, когда функция <i>get_fly</i> принимает значение <i>get_fly() == true</i> , блок проводит генерацию груженого углем состава в модель вызовом метода <i>Inject()</i> — <i>TrainSource.inject()</i>
9	 <b>Проверка_пути</b>	Блок является частью диаграммы состояний. Отвечает за проверку доступности ресурсов из блоков <i>Cardumper</i> и <i>Entry</i> . В случае доступности ресурсов возвращает действие в блок «Генерация»
10	 <b>get_fly</b>	Функция, позволяющая однократно задать определенную последовательность действий в диаграмме состояний. Работает согласно заданной последовательности действий

В рамках моделирования железнодорожного грузового фронта терминала в качестве материального потока выступает движение агентов: груженых и порожних поездов и отдельных вагонов. Модельным отражением движения данного материального потока являются сменяющиеся фазы инициирования, их прерывание, задержка и обработка на каждом участке движения внутри модели, а также покидание материальным потоком системы с измененными показателями.

В рамках движения материальные потоки груженых поездов генерируется, агрегируются в виде единых составов, затем последовательно дезагрегируются на отдельные вагоны исполнителями заявок, после чего вновь агрегируются в виде порожних поездов. Данные процессы происходят исключительно в рамках однородных материальных потоков и не включают в себя потоки иных видов. Заявки на обслуживание генерируется двумя различными типами агентов — гружеными поездами (агенты — *Train*) и отдельными железнодорожными вагонами (агенты — *Agent*). При этом каждому блоку исполнителю заявок присущи свои определяющий его свойства закономерности, такие как качество обработки заявок, чистота обработки заявок и время задержек.

Основными блоками, изменяющими материальные потоки в модели, являются те, которые непосредственно моделируют выгрузку экспортного угля из железнодорожных вагонов на морском терминале на станции разгрузки вагонов и приведены внутри нестандартного блока — *CarsMoveAndUnload* (рис. 7). Эта часть симулирует работу станции разгрузки вагонов, состоящей из ком-

плекса двух тандемных вагоноопрокидывателей и двух вагонных трансбордеров (автоматические устройства для перестановки вагонов с одного пути на другой). В рамках нестандартного блока *CarsMoveAndUnload* груженые углем составы, выставляются на два параллельных друг другу пути: *UnloadingTrackN1* и *UnloadingTrackN2*, которые являются путями подачи к вагоноопрокидывателям № 1 и 2 на станции разгрузки вагонов.

В зимний период часть передних вагонов в составе поезда простаивают в течение 20–30 мин в двух пунктах обогрева вагонов для обеспечения таяния смерзшегося груза угля в кузовах вагонов. В пунктах обогрева вагонов обеспечивается конвекция теплого воздуха и инфракрасный разогрев стенок вагонов, благодаря чему груз отстает от стенок кузова и может быть безопасно выгружен на станции разгрузки вагонов. После этого вагоны поочередно подаются на вагоноопрокидыватели, где происходит отцепка нужного количества вагонов от состава поезда (одного или двух) и их поочередная подача непосредственно на выгрузку. Далее происходит захват пары вагонов в каждое устройство вагоноопрокидывателя, поворот вагонов на 150 град. относительно уровня пола и выгрузка груза угля из кузовов вагонов в приемный бункер вагоноопрокидывателей. Весь процесс выгрузки четырех вагонов с грузом в объеме 290–300 т занимает 150 с, а общая максимальная производительность комплекса из двух вагоноопрокидывателей составляет порядка 7000 т/ч.

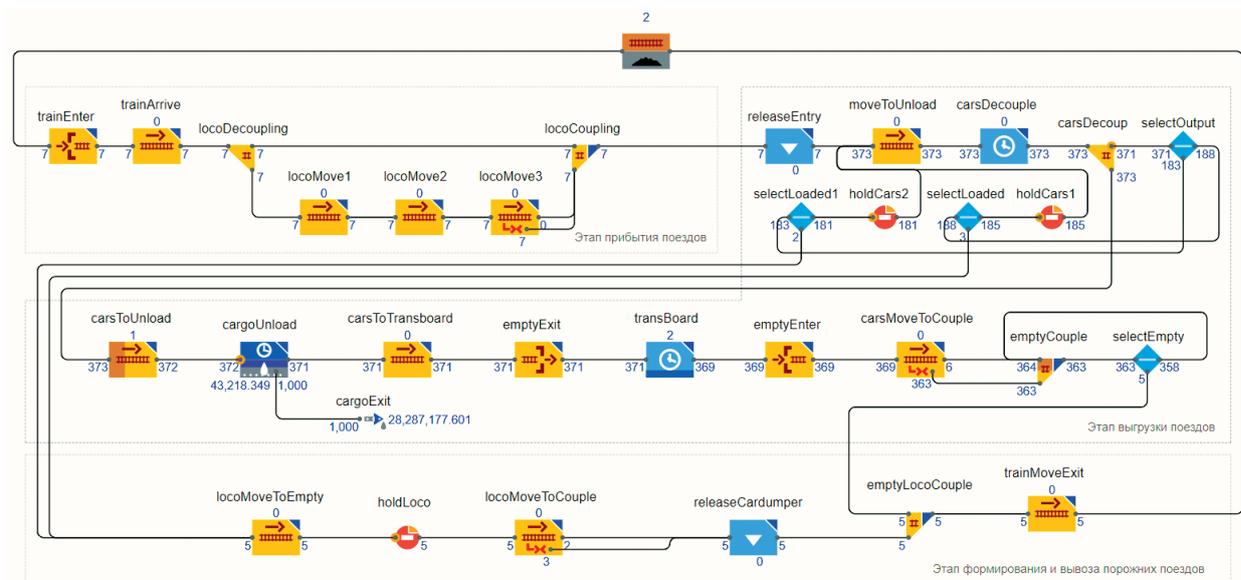
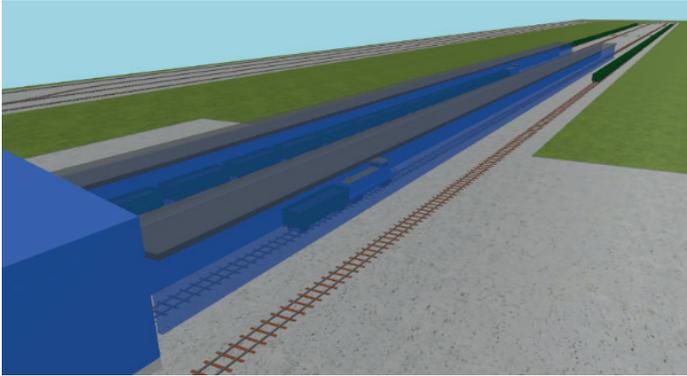


Рис. 7. Блок-схема алгоритма работы нестандартного блока *CarsMoveAndUnload*

Далее в модели вагоны возвращаются в исходное положение, затем путем использования автоматического крюкового захвата и силы инерции подаются на автоматические трансбордер, где переставляются на пути сбора порожних вагонов. На путях сбора вагоны собираются в порожние составы и вывозятся с территории терминала. С каждого из двух стендов вагоноопрокидывателей выгруженный уголь за счет силы тяжести падает в приемный бункер на металлическую сетку с дробилкой, которая позволяет получать выход в воронки питателей угля с фракцией до 50 мм.

Дробленый уголь через воронки питателя поступает на ленточный конвейер, установленный на глубине 15–16 м, и направляется на склад морского угольного терминала через весовое оборудование, измеряющего общую массу угля, поступившего железнодорожным транспортом и выгруженного на станции разгрузки вагонов. Частная 3D-визуализация момента подачи вагонов под выгрузку на станции разгрузки вагонов в имитационной модели тылового грузового фронта морского угольного терминала представлена на рис. 8.

а)



б)

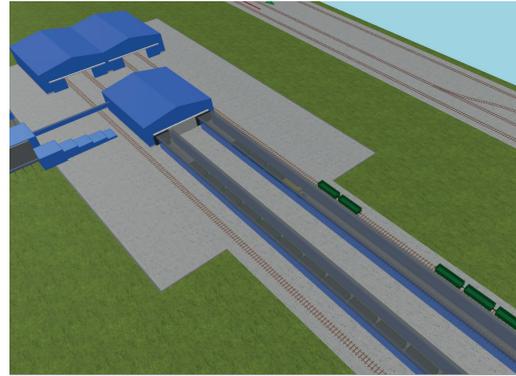


Рис. 8. 3D-визуализация подачи вагонов под выгрузку на СРВ в имитационной модели:  
 а — 3D-визуализация станции разогрева вагонов;  
 б — общий 3D-визуализация станции разгрузки вагонов

### Обсуждение (Discussion)

Функциональность модели и ее элементов достигается путем использования в рабочем окне агента верхнего уровня *Main* различных компонентов агентов, предусмотренных в среде *Anylogic*: переменных, параметров, функций, коллекций и сбора статистики. Все эти компоненты позволяют расширить функционал проводимых моделью действий. Для упрощения общего восприятия разработанной имитационной модели внутренняя функциональность системы всех представленных на рис. 9 компонентов будет являться «черным ящиком» (Black Box).

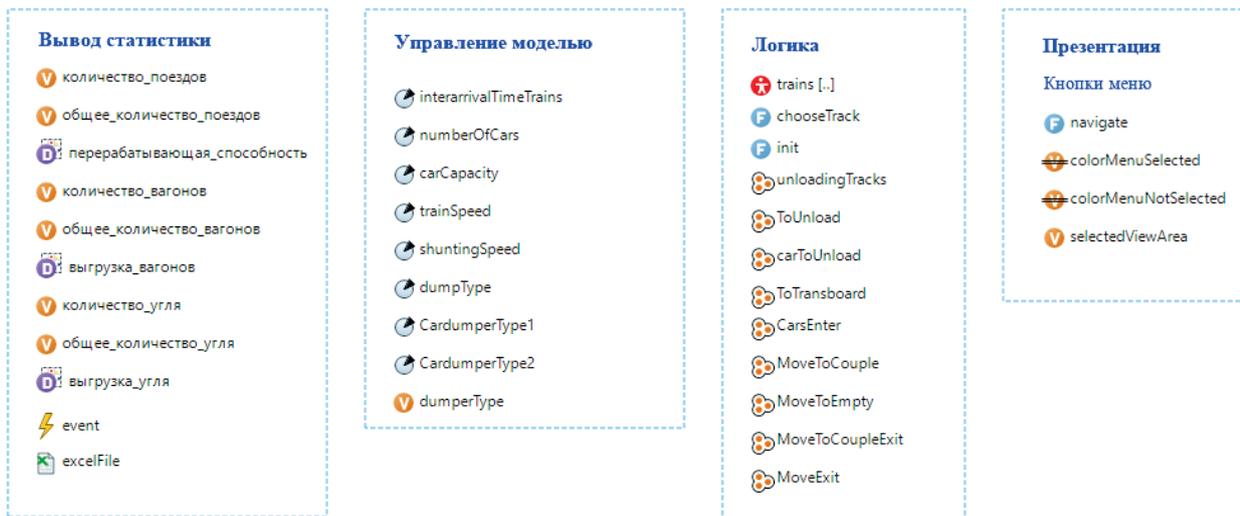


Рис. 9. Компоненты агентов, используемые в имитационной модели

В зоне *ViewControl* имитационной модели реализованы элементы управления ее конфигурацией и поведением. Управление осуществляется ползунками, флажками и переключателями, меняющими в режиме реального времени восемь основных параметров. Это дает возможность четко настраивать до восьмидесяти сценариев поведения модели, исходя из требования экспериментов. Пользовательский интерфейс окна управления моделью приведен на рис. 10. В зоне *ViewStat* в режиме реального времени в виде временных графиков представляются результаты работы имитационной модели, а также ведется подсчет итоговых показателей деятельности терминала. Пользовательский интерфейс экрана полученных результатов работы имитационной модели представлен на рис. 11.



Рис. 10. Интерфейс окна управления имитационной моделью

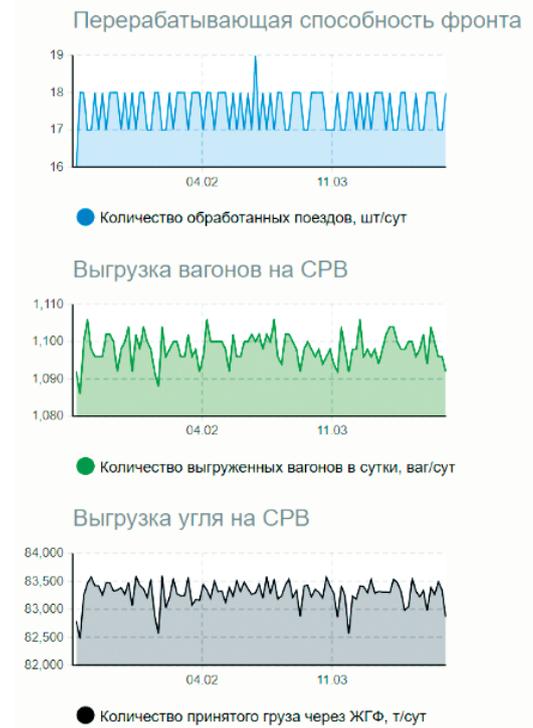


Рис. 11. Экран результатов работы имитационной модели

На рис. 10 приведены параметры модели, использованные при проведении эксперимента для установления адекватности созданной имитационной модели, на рис. 11 показаны полученные результаты, доказывающие адекватность модели и показывающие высокую сходимость результатов моделирования с результатами работы реальных отечественных морских угольных терминалов.

### Выводы (Summary)

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для превращения в полноценный инструмент, пригодный для использования при расчете показателей работы морского терминала, описанная имитационная модель тылового фронта морского угольного терминала объединена с разработанной в исследовании имитационной моделью склада терминала и моделью морского грузового фронта в единую модель.
2. Имитационная модель позволяет достаточно точно копировать поведение такой высокоорганизованной системы, как морской угольный терминал, и, в частности, тыловой железнодорожный фронт терминала [11].
3. Разработанная в среде Anylogic модель позволяет визуализировать и просчитать интенсивные процессы обработки груженых составов, выгрузки вагонов, перевалки угля на склады, формирования порожних составов и поездов.
4. Математическое моделирование работы терминала и эксперименты с моделями являются наглядным и удобным инструментом для проведения проектирования подобных транспортных объектов, выявления направлений повышения эффективности их работы, определения проблемных процессов, зон и участков, позволяя точно и обоснованно выдвигать предложения по модернизации техники и совершенствованию используемых технологий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов Г. С. Одноканальные системы массового обслуживания с неограниченной очередью в AnyLogic / Г. С. Осипов // Бюллетень науки и практики. — 2016. — № 8 (9). — С. 92–95. DOI: 10.5281/zenodo.60245.

2. Кошуняева Н. В. Теория массового обслуживания (практикум по решению задач) / Н. В. Кошуняева, Н. Н. Патронова. — Архангельск: САФУ им. М. В. Ломоносова, 2013. — 107 с.
3. Кузнецов А. Л. Имитационная модель в порту Тамань / А. Л. Кузнецов, И. М. Русу // Морские порты. — 2013. — № 7 (118). — С. 34–38.
4. Васин А. В. Моделирование оптимальной конфигурации морского порта / А. В. Васин, Д. С. Захаров, Л. В. Анненков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 662–669. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-662-669.
5. Федеральный закон РФ от 10 января 2003 года № 18-ФЗ «Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/19008> (дата обращения: 01.09.2021).
6. СП 350.1326000.2018. Нормы технологического проектирования морских портов. — М.: Стандартинформ, 2018. — 218 с.
7. Шеховцов А. И. Моделирование работы станций примыкания и подъездных путей предприятий, оборудованных вагоноопрокидывателями: сб. науч. тр.; Донецкий ин-тут ж.-д трансп. / А. И. Шеховцов. — 2017. — № 44. — С. 47–52.
8. Сампиев А. М. Применение метода Монте-Карло для оценки эффективности использования бюджета рабочего времени морского терминала / А. М. Сампиев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 68–77. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-68-77.
9. Минеев С. К. Влияние организации обслуживания судов на пропускную способность портов / С. К. Минеев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3. — С. 147–152.
10. Малыхин М. О. Обоснование исходных данных при моделировании вывоза контейнеров из порта на тыловой терминал с применением технологии «блок-трейн» / М. О. Малыхин, А. В. Кириченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 22–30.
11. 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.

## REFERENCES

1. Osipov, Gennadiy. “Single-channel queuing system with unlimited queue in AnyLogic.” *Bulletin of Science and Practice* 8(9) (2016): 92–95. DOI: 10.5281/zenodo.60245.
2. Koshunyaeva, N. V., and H. H. Patronova. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya (praktikum po resheniyu zadach)*. Arkhangel'sk: SAFU imeni M. V. Lomonosova, 2013.
3. Kuznetsov, A. L., and I. M. Rusu. “Imitatsionnaya model' v portu Taman'.” *Morskie porty* 7(118) (2013): 34–38.
4. Vasin, Andrei V., Dmitrii S. Zakharov, and Leonid V. Annenkov. “Modeling the optimal seaport configuration.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 662–669. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-662-669.
5. Federal'nyi zakon RF ot 10 yanvarya 2003 goda № 18-FZ «Ustav zheleznodorozhnogo transporta Rossiiskoi Federatsii». Web. 1 Sept. 2021. <<http://www.kremlin.ru/acts/bank/19008>>.
6. SP 350.1326000.2018. Norms for technological design of sea ports. M.: Standartinform, 2018.
7. Shekhovtsov, A. I. “Modeling of operation of connecting stations and approach lines of enterprises equipped by car dumpers.” *Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* 44 (2017): 47–52.
8. Sampiev, Adam M. “Monte-Carlo simulation for the efficiency assessment of marine terminal working time budget using.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 68–77. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-68-77.
9. Mineev, S. K. “Influence of vessels service organization on the ports capacity.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3 (2013): 147–152.
10. Malykhin, M. O., and A. V. Kirichenko. “Justification of the original data in the simulation of containers' carriage from sea terminal to dry port with the use of technology «block-train».” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(32) (2015): 22–30.

11. 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.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Мазуренко Ольга Игоревна** — аспирант  
*Научный руководитель:*  
Русинов Игорь Александрович  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [mazyrenko.olga@gmail.com](mailto:mazyrenko.olga@gmail.com),  
[kaf\\_kevt@gumrf.ru](mailto:kaf_kevt@gumrf.ru)  
**Русинов Игорь Александрович** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [makarovka@inbox.ru](mailto:makarovka@inbox.ru), [RusinovIA@gumrf.ru](mailto:RusinovIA@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Mazurenko, Olga I.** — Postgraduate  
*Supervisor:*  
Rusinov, Igor A.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [mazyrenko.olga@gmail.com](mailto:mazyrenko.olga@gmail.com),  
[kaf\\_kevt@gumrf.ru](mailto:kaf_kevt@gumrf.ru)  
**Rusinov, Igor A.** —  
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: [makarovka@inbox.ru](mailto:makarovka@inbox.ru), [RusinovIA@gumrf.ru](mailto:RusinovIA@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 13 сентября 2021 г.  
Received: September 13, 2021.*