

Научная статья  
УДК 656.615  
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-102-114>

## Дискретно-событийное моделирование морского грузового фронта экспортного угольного терминала в среде Anylogic

Ольга Игоревна Мазуренко<sup>1✉</sup>, Игорь Александрович Русинов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова,  
Санкт-Петербург, Россия, [mazyrenko.olga@gmail.com](mailto:mazyrenko.olga@gmail.com)<sup>✉</sup>

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы компьютерного моделирования морского грузового фронта экспортного угольного терминала в среде Anylogic. Проанализированы основные этапы разработки и формализации модели. На основании статистических данных АО «Ростерминалуголь» и АО «Дальтрансуголь» определены зависимости дедвейта судов-балкеров от их длины, ширины и осадки. Сформирована общая классификация судов-балкеров по транспортно-технологическим характеристикам. В соответствии с данными статистики проведена оценка количества коносаментных партий и/или марок угля, загружаемых на суда-балкеры на морских угольных терминалах. Сформулированы требования по подбору судопогрузочного оборудования. Определены основные используемые сегодня виды причальных судопогрузочных машин. Установлено, что на большинстве экспортных угольных терминалов в основном устанавливаются судопогрузочные машины координатного типа с подъемной неповоротной стрелой. Проведен выбор компоновки и технологической схемы работы моделируемого морского фронта. За основу взят морской экспортный угольный терминал АО «Ростерминалуголь» в морском порту Усть-Луга. Приведено описание порядка построения дискретно-событийной имитационной модели морского грузового фронта в программном обеспечении компании Anylogic. Установлено, что разработанная имитационная модель позволяет рассчитывать показатели работы морского грузового фронта с несколькими различными вариантами компоновки: с одним или двумя причалами, а также с различной производительностью судопогрузочных машин. Результаты работы модели позволяют осуществлять выбор варианта компоновки фронта с требуемой годовой пропускной способностью причалов и без превышения заданного среднего времени стоянки судов под погрузкой. Представлены основные принципы работы модели, разъяснена функциональность всех блоков логики работы алгоритма имитационной модели. Проведено описание элементов управления конфигурацией модели грузового фронта, а также проиллюстрированы примеры результатов работы, сформулированы выводы.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, морские порты, угольные терминалы, морской грузовой фронт, судопогрузочные машины

**Для цитирования:** Мазуренко О. И., Русинов И. А. Дискретно-событийное моделирование морского грузового фронта экспортного угольного терминала в среде Anylogic // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 2. С. 102–114. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-102-114>.

Original article

## Discrete-event simulation of sea cargo front of export coal terminal in Anylogic environment

Olga I. Mazurenko<sup>1✉</sup>, Igor A. Rusinov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
Saint-Petersburg, Russia, [mazyrenko.olga@gmail.com](mailto:mazyrenko.olga@gmail.com)<sup>✉</sup>

**Abstract.** The article is focused on computer modeling of the sea cargo front of export coal terminal seaside in Anylogic environment. The main stages of development and formalization of the model have been analyzed. Using the statistical data on Rosterminalugol, JSC and Daltransugol, JSC, the dependences of the deadweight of bulk carriers on their length, width and draft were determined. A general classification of bulk carriers has been formed according to transport and technological characteristics. On the basis of statistical data, the number of bills of lading and/or grades of coal loaded onto bulk carriers at sea coal terminals have been assessed. Requirements for the selection of ship-loading equipment are formulated. The main types of berthing ship-loading machines used today are deter-

mined. Most export coal terminals use ship-loaders of the coordinate type with a lifting fixed boom. The choice of layout and technological scheme of the simulated sea front was carried out. The sea export coal terminal of Ros-terminalugol, JSC in the seaport of Ust-Luga was taken as a basis. There is given a description of constructing a discrete-event simulation model of the sea cargo front in Anylogic software. It has been stated that the developed simulation model allows calculating the performance of the sea cargo front with several different layout options: with 1 or 2 berths, as well as with different capacity of cargo-loading machines. The results of the model operation make it possible to select a front layout option with the required annual throughput of berths and without exceeding the specified average time of vessel stay under loading. There are shown the basic principles of the model operation, explained the functionality of all logic blocks of the simulation model algorithm. The configuration control elements of the cargo front model have been presented, as well as the results of the work and conclusions.

**Keywords:** simulation modeling, seaports, coal terminals, sea cargo front, cargo-loading machines

**For citation:** Mazurenko O. I., Rusinov I. A. 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.* 2022;2:102-114. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-102-114>.

### Введение

На морских угольных терминалах судабалкеры, используемые для международной морской перевозки угля, обслуживаются у причальной стенки на морских грузовых фронтах (МГФ) терминалов. Проектирование и строительство причальных стенок и установка судопогрузочных машин (СПМ) – дорогостоящие инвестиции, и поэтому требуют тщательных расчетов планируемых показателей. К тому же МГФ являются ключевыми узлами, обеспечивающими выполнение производственных показателей работы морских угольных терминалов [1].

### Методы и материалы исследования

Первый этап в процессе проектирования и моделирования МГФ угольных терминалов – определение транспортно-технических характеристик судов, которые будут обслуживаться у причалов. Длина судов определяет необходимую длину причалов и причальной стенки, ширина – потребность приобретения того или иного вида судопогрузочного оборудования с определенным вылетом и длиной стрелы. Важным показателем является и планируемая осадка судов, которая лимитируется природными условиями и глубиной акватории у проектируемых причалов. Требуемая длина причальной стенки морского угольного терминала должна соответствовать общему количеству и длине судов, которые планируется одновременно обрабатывать на терминале [2].

На основании статистических данных АО «Ростерминалуголь» и АО «Дальтрансуголь» была проведена оценка транспортно-технологических характеристик судов-балкеров, обработанных у причалов указанных терминалов за 6 месяцев 2020 г. Согласно результатам оценки определена зависимость дедвейта каждого судна  $D_w$ , тыс. т, от длины судна  $L_s$ , м (рис. 1). Дедвейт судна – это величина, равная сумме массы груза на судне, массы топлива и запасов, а также массы экипажа и продовольствия на борту.

На основании оценки полученных статистических данных была определена зависимость между длиной судна и его дедвейтом:

$$L_s = \alpha_1 \ln(D_w) - \alpha_2, \quad (1)$$

где  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – рассчитанные коэффициенты со значениями 65,5 и 50 соответственно. Также определена корреляция между формулой (1) и статистическими данными АО «Ростерминалуголь» и АО «Дальтрансуголь» об обработанных судах, которая может быть выражена коэффициентом детерминации:  $R^2 = 0,96$ .

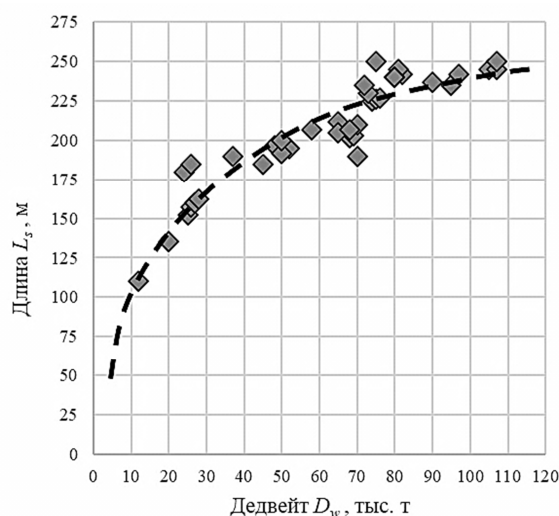


Рис. 1. Зависимость дедвейта судна от длины судна

Fig. 1. Dependence of the ship's deadweight on the length of the ship

В результате статистической оценки также определена зависимость дедвейта каждого судна  $D_w$ , тыс. т, от ширины судна  $B_s$ , м, и максимальной осадки  $d_s$ , м (рис. 2).

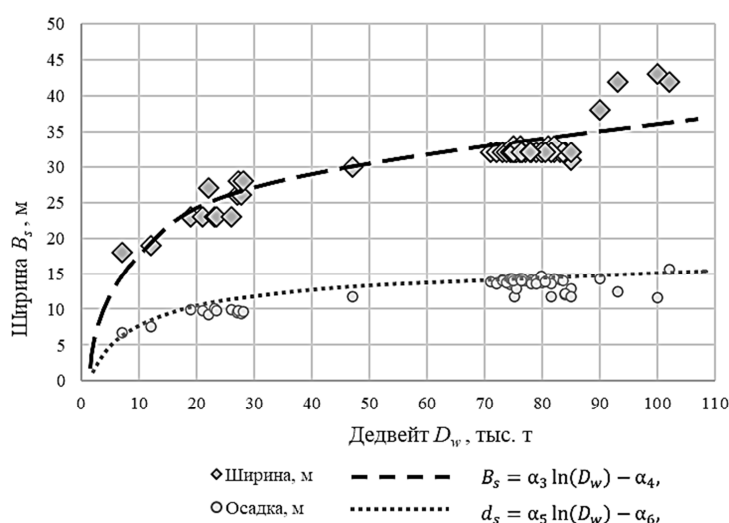


Рис. 2. Зависимость дедвейта судна от ширины судна и максимальной осадки

Fig. 2. Dependence of the ship's deadweight on its width and maximum draft

На основании статистических данных определена зависимость между шириной судна и его дедвейтом:

$$B_s = \alpha_3 \ln(D_w) - \alpha_4, \quad (2)$$

где  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$  – рассчитанные коэффициенты со значениями 12,7 и 20 соответственно. Определена корреляция между формулой (2) и статистическими данными АО «Ростерминалуголь» и АО «Дальтрансуголь» об обработанных балкерах, которая может быть выражена коэффициентом детерминации:  $R^2 = 0,9$ .

Далее на базе статистики определена зависимость между осадкой и дедвейтом судов:

$$d_s = \alpha_5 \ln(D_w) - \alpha_6, \quad (3)$$

где  $\alpha_5$ ,  $\alpha_6$  – рассчитанные коэффициенты со значениями 4,1 и 4 соответственно. Также определена корреляция между формулой (3) и статистикой АО «Ростерминалуголь» и АО «Дальтрансуголь» об обработанных балкерах, которая может быть выражена коэффициентом детерминации:  $R^2 = 0,86$ .

В настоящее время в транспортной отрасли сформирована общая градация судов-балкеров по размерам в зависимости от дедвейта. В табл. 1 приведены основные категории морских судов по увеличению дедвейта с указанием максимальной длины, ширины, осадки и количества трюмов [3].

Таблица 1

Table 1

### Классификация судов-балкеров по основным характеристикам

#### Classification of bulk carriers by general characteristics

Класс судов	Дедвейт, тыс. т	Длина, м	Ширина, м	Осадка, м	Количество трюмов
Handysize	10–35	125–200	18–28	7–11	3–6
Handymax	35–55	175–200	22–32,2	8–13	5–7
Panamax	55–90	200–225	< 32,31	12–15	5–9
Small Capesize	90–150	225–280	32,31–45	13–17	7–9
Large Capesize	> 150	280–365	45–65	16–22,5	7–10

В дальнейшем указанные средние значения транспортно-технических характеристик судов-балкеров будут использоваться при проведении имитационного моделирования МГФ угольного терминала.

Кроме того, учитывается количество консоментных партий и/или марок угля, погруженных на

суда-балкеры на морских угольных терминалах. Различные консоментные партии и/или марки угля должны транспортироваться на судах в разных трюмах во избежание смешивания (в случаях если смешивание или гомогенизация различных марок специально не оговорены покупателем).

Согласно статистическим данным АО «Ростерминалуголь» и АО «Дальтрансуголь» о судах-балкерах, погруженных у причалов указанных терминалов за 6 месяцев 2020 г., проведена оценка

количества коносаментных партий и/или марок угля на каждом из обработанных судов. Полученные результаты приведены на рис. 3.

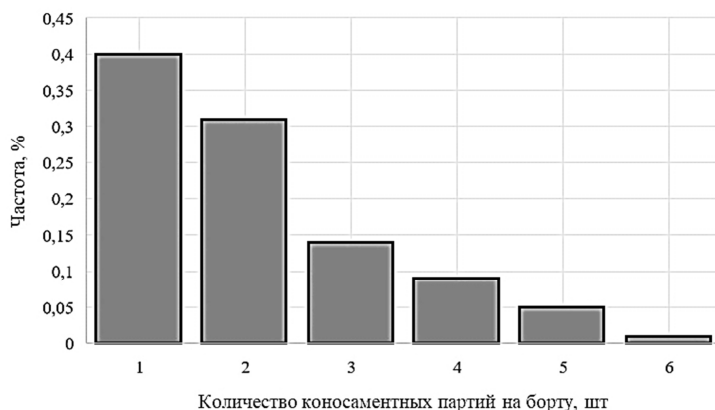


Рис. 3. Количество коносаментных партий на борту судов, загруженных на терминалах АО «Ростерминалуголь» и АО «Дальтрансуголь» за 6 месяцев 2020 г.

Fig. 3. Number of bills of lading on board ships loaded at the terminals of Rosterminalugol, JSC and Daltransugol, JSC for 6 months of 2020

Установлено, что порядка 40 % погруженных на указанных терминалах судов приняли на борт одну коносаментную партию и/или марку угля. При этом лишь 1 % судов приняли на борт более 6 различных коносаментных партий и/или марок угля (в смешанном или гомогенизированном виде).

Вторым этапом проектирования и моделирования МГФ угольных терминалов является подбор погрузочного оборудования и машин для обработки морских судов, которые будут обслуживаться у причалов. На складах экспортных морских угольных терминалов осуществляется накопление партий угля для их дальнейшей погрузки на морские суда-балкеры. Поступающий со склада терминала уголь по системе ленточных конвейеров попадает к причальной линии на кордонные конвейеры, соединенные непосредственно с СПМ [4].

Через телескопическую стрелу СПМ груз угля по ленточному конвейеру поступает в погрузочный рукав, установленный для уменьшения пыления груза при падении, а затем высыпается в трюм судна-балкера.

Причальные СПМ являются высокопроизводительным оборудованием. Так, на некоторых наиболее крупных мировых угольных терминалах производительность СПМ (преимущественно типа «квадрант») составляет 5 000–12 000 т/ч. Однако в основном на экспортных угольных терминалах устанавливаются СПМ координатного типа с подъемной неповоротной стрелой (рис. 4) с паспортной производительностью 3 000–4 000 т/ч. Равномерная подача груза на судопогрузочные

машины достигается путем синхронизации производительности и скорости движения ленточных конвейеров стакеров-реклаймеров, складской конвейерной сети и СПМ [5].

На рис. 4. приведены основные элементы СПМ координатного типа с подъемной неповоротной стрелой:

– *пилон* представляет собой ферменный каркас, поддерживающий кабину оператора и верхние канатные шкивы. Все необходимые лестницы и проходы закреплены на конструкции и обеспечивают доступ к узлам и системам СПМ;

– *канатная лебедка* состоит из двух независимых многоканальных канатных систем, соединенных с балансиром. Тросовая система рассчитана таким образом, что всего один трос может безопасно удерживать или поднимать стрелу в рабочем режиме;

– *передвижная каретка* поддерживает погрузочный рукав и движется вперед-назад по направляющим внутри стрелы для приспособления к разной ширине обслуживаемых судов;

– *погрузочный рукав* направляет уголь с ленточного конвейера стрелы в трюм судна. Различные типы погрузочных рукавов, используемых на СПМ, зависят от размеров обслуживаемых судов. Погрузочный рукав оснащается обрезным ковшем для направления выгружаемого угля в углы трюма;

– *стрела*, на которой установлена передвижная каретка, к которой подвешен ленточный конвейер стрелы и погрузочный рукав. Стрела поддерживается точками поворота в хвостовой части и канат-

ными шкивами, которые соединяют тросы с лебедкой подъема стрелы. Подъемные движения позволяют регулировать стрелу в соответствии с размером обслуживаемых судов, расположением люковых отверстий, осадкой и высотой относительно уровня воды;

– *погрузочная тележка* перемещает уголь с причального конвейера непосредственно на конвейер СПМ. Погрузочная тележка сама по себе неподвижна, но механически соединена с СПМ, которая тянет ее по рельсам;

– *рубка лебедки* (подъем и опускание стрелы осуществляется с помощью тросовой лебедки с электромеханическим приводом, механизм подъема стрелы размещен в закрытой рубке лебедки).

На практике эксплуатационная производительность большинства СПМ составляет порядка 2 200–2 800 т/ч, что обусловлено снижением производительности и временными затратами на перестановку СПМ между трюмами обрабатываемого судна. Вследствие этого наибольшая эксплуатационная производительность достигается при обработке судов типа Panamax, Small Capesize и Large Capesize.

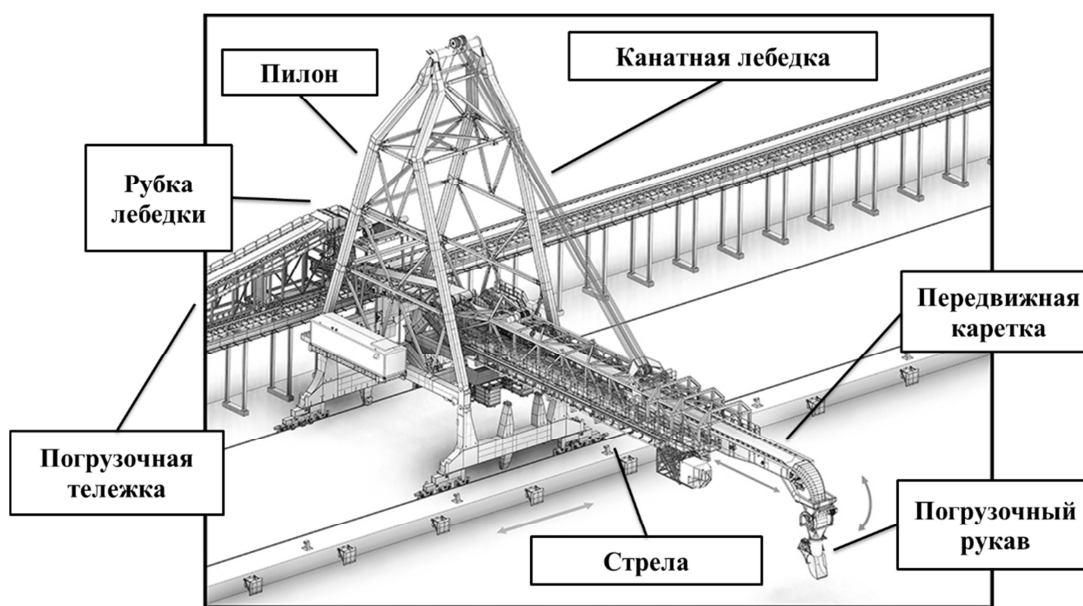


Рис. 4. Устройство и основные элементы судопогрузочной машины координатного типа с подъемной неповоротной стрелой

Fig. 4. The arrangement and main elements of the ship-loading machine of the coordinate type with a lifting fixed boom

*Третий этап* процесса проектирования и моделирования МГФ угольных терминалов – выбор компоновки и технологической схемы работы моделируемого фронта. Сооружение причального фронта и установка погрузочного оборудования являются дорогостоящими мероприятиями и требуют тщательных расчетов при определении итоговой компоновки и разработки технологической схемы [6]. При этом следует руководствоваться следующими основными принципами:

1. Характеристики судов, обслуживание которых планируется на терминале, определяют длину и глубину у причалов, а также характеристики погрузочного оборудования: вид и вылет стрелы СПМ;

2. Итоговое количество причалов, характеристики СПМ и производительность причальных конвейеров должны быть подобраны таким обра-

зом, чтобы обеспечить заданное среднее время стоянки судна в порту;

3. При достаточных глубинах акватории у терминала вариант непрерывной причальной линии, вдоль которой могут перемещаться СПМ и обслуживать несколько судов одновременно, является предпочтительным. Использование подобной компоновки причала ведет к сокращению общей длины причалов и более высоким показателям использования СПМ;

4. При устройстве акватории у причальной линии глубины у причала должны обеспечивать обслуживание наиболее вместительных возможных судов и допускать вероятность одновременного захода нескольких крупных судов;

5. В связи со значительным влиянием стохастических факторов на результаты работы МГФ при

проектировании и моделировании целесообразно использовать статистику по загрузке судов и интервалам их прибытия по данным аналогичных терминалов в регионе. В случае отсутствия статистических данных определение чувствительности разработанных моделей необходимо проводить с использованием известных распределений вероятностей (например, распределения Эрланга, Вейбулла, гамма-распределения) [7];

6. При выборе количества и производительности причальных конвейеров целесообразно, чтобы каждая СПМ обслуживалась своим собственным причальным конвейером соответствующей производительности;

7. В отдельных случаях, при необходимости уменьшения количества причальных конвейеров, допускается вариант, при котором несколько СПМ обрабатываются одним причальным конвейером. При этом производительность данного причального конвейера должна удовлетворять потребностям в обслуживании нескольких СПМ одновременно.

#### **Результаты исследования**

На основании вышеуказанных принципов в исследовании выбрана следующая компоновка и технологическая схема работы моделируемого МГФ:

- непрерывная причальная линия длиной 800 м

с двумя выделенными местами для швартовки судов (причал № 1 и 2) и двумя СПМ координатного типа с подъемной неповоротной стрелой (СПМ № 1 и 2);

- эксплуатационная производительность СПМ соответствует производительности складской конвейерной сети и стакеров-реклаймеров и может варьироваться в пределах 1 500–3 500 т/ч;

- у причалов обрабатываются суда дедвейтом от 50 тыс. до 100 тыс. т;

- целевая пропускная способность МГФ составляет ориентировочно 15–30 млн т/год (в зависимости от выбранных режимов и характеристик оборудования).

При выборе компоновки, оборудования и технологической схемы МГФ за основу был взят морской экспортный угольный терминал АО «Ростерминалуголь» в морском порту Усть-Луга.

Компоновка и технологическая схема работы МГФ угольного терминала АО «Ростерминалуголь» в морском порту Усть-Луга является типовой для перспективных проектируемых угольных терминалов России. Использование подобной компоновки и схемы (табл. 2, рис. 5) упростит верификацию получаемых при моделировании результатов с фактическим грузооборотом и показателями работы МГФ АО «Ростерминалуголь» [8].

Таблица 2

Table 2

### **Элементы плана моделируемого морского грузового фронта**

#### **Elements of the layout of the simulated sea cargo front**

<b>Элемент (рис. 5)</b>	<b>Описание</b>
1	Склад угольного терминала (модуль склада имитационной модели)
2	Складские ленточные конвейеры, соединяющие стакеры-реклаймеры и склады с СПМ через пересыпные станции
3	Причальные конвейеры, соединяющиеся со складскими конвейерами через пересыпные станции 41.02, 51.02. Осуществляют транспортировку угля со склада для подачи на СПМ
4	Причальная линия длиной 800 м с двумя оборудованными местами для стоянки судов
5	Судно-балкер дедвейтом 100 тыс. т у причала терминала (пример)
6	Судно-балкер дедвейтом 50 тыс. т у причала терминала (пример)
7	Судопогрузочные машины (СПМ) № 1 и 2 координатного типа с подъемной неповоротной стрелой, осуществляющие погрузку судов
8	Подкрановые рельсовые пути для СПМ

Средние показатели работы МГФ АО «Ростерминалуголь» за предыдущие отчетные 5 лет (2017–2021 гг.):

- пропускная способность МГФ специализированного угольного терминала составляет в среднем 25,2 млн т угля;

- у причалов ежегодно обрабатывается порядка 355 морских судов-балкеров;

- средний размер судовой партии составляет 71 тыс. т;

- доля обслуженных судов класса Panamax и Post-Panamax – 80 %.

Указанные показатели работы МГФ выбраны как целевые при проведении имитационного моделирования.

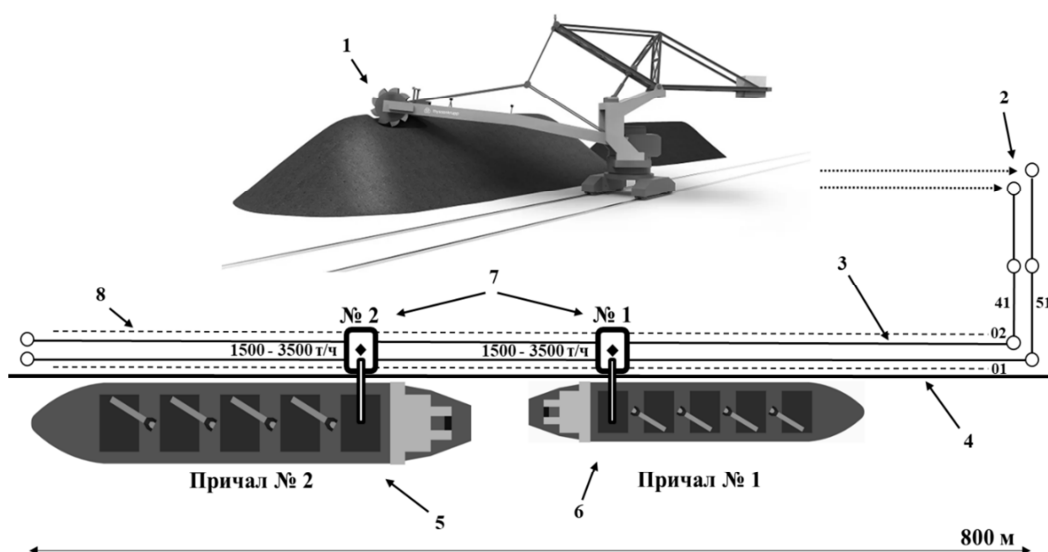


Рис. 5. План-схема МГФ моделируемого морского угольного терминала

Fig. 5. Layout of the sea cargo front of the simulated sea coal terminal

### Обсуждение результатов

Построение дискретно-событийной имитационной модели МГФ экспортного угольного терминала выполнено в программном обеспечении компании Anylogic (версия 8.7.9) [9]. В рабочем окне агента верхнего уровня *Main* реализовано следующее:

- в зоне *view2D* на основании схемы (рис. 5) выполнен графический план МГФ угольного терминала, нанесены основные элементы, машины и механизмы МГФ, а также прорисованы связи между элементами;
- в зоне *viewLogic* прописана логика поведения моделируемого МГФ, представленная с использованием встроенных блоков программного обеспечения Anylogic;
- в зоне *viewControl* реализовано управление основными параметрами МГФ, настраиваемыми флажками, переключателями и бегунками Anylogic;
- в зоне *viewStat* реализовано представление результатов работы модели МГФ в режиме реального

времени в виде графиков, а также организован подсчет итоговых показателей деятельности МГФ и терминала в целом.

Цель имитационного моделирования – создание цифрового двойника МГФ экспортного угольного терминала, позволяющего получать данные и сведения о показателях работы МГФ: суточной и годовой пропускной способности, времени обработки судна, количестве погруженных судов. Имитационная модель позволит рассчитать показатели работы нескольких различных вариантов компоновки МГФ – с одним или двумя причалами с различной производительностью СПМ, с целью выбора при проектировании варианта с максимальной требуемой годовой пропускной способностью причала и без превышения заданного среднего времени стоянки судов у причалов.

С помощью элементов разметки пространства Anylogic в зоне *view2D* прорисована композиционная структура и внутренние физические связи МГФ терминала (рис. 6).

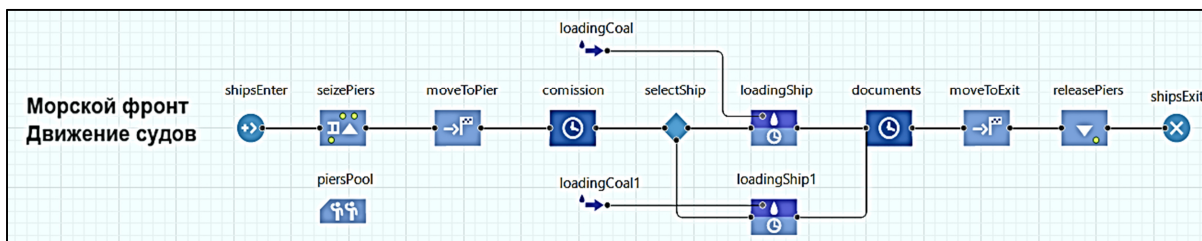


Рис. 6. Блок-схема логики работы имитационной модели МГФ экспортного угольного терминала

Fig. 6. Block diagram of the operation logic of the simulation model of the sea cargo front of the export coal terminal

В основе модели МГФ экспортного угольного терминала лежат алгоритмы логики, сформированные и представленные в зоне *viewLogic* с помощью Библиотеки моделирования процессов и Библиотеки моделирования потоков программного обеспечения AnyLogic. Алгоритм работы имитационной модели МГФ в зоне *viewLogic* задан при помощи стандартных блоков, которые дополнительно под-

страиваются имеющимися внутренними настройками и параметрами самих блоков, а также при помощи языка программирования Java.

Функциональность блоков логики работы алгоритма имитационной модели МГФ морского экспортного угольного терминала, указанных на рис. 6, подробно рассматривается в табл. 3.

Таблица 3

Table 3

**Функциональность блоков логики работы алгоритма модели морского грузового фронта**

**Functionality of blocks of logic of the algorithm of the sea cargo front model**

Блок логики	Функциональность
 <p>shipsEnter</p>	Осуществляет генерацию судов-балкеров в модели. Суда генерируются согласно вызовам метода <i>inject()</i> . После создания судно остается как заявка в системе. Популяция созданных судов добавляется в агент  <i>ships [-]</i>
 <p>seizePiers</p>	Захватывает для сгенерированного судна-балкера один статический ресурс – причал для погрузки из блока <i>piersPool</i>
 <p>piersPool</p>	Создает набор из двух статических ресурсов – причалов № 1 и 2 на МГФ в популяции  <i>ships [-]</i> . Количество доступных ресурсов в данном блоке определяет количество работающих причалов и СПМ на МГФ терминала
 <p>moveToPier</p>	Осуществляет физическое помещение судна-балкера в модель и направляет его из точки <i>shipEnter</i> к точке погрузки у одного из причалов – <i>pier1_point</i> или <i>pier2_point</i> по команде <i>ToPort.get(agent.Порт)</i> со скоростью 8 уз (14 км/ч)
 <p>comission</p>	Имитирует задержку судна на время проведения государственной комиссии контролирующими органами в порту. Время задержки зависит от параметра <i>timeSpentComission</i> , является стохастической величиной и задается по нормальному закону распределения <i>normal(1, 1/2*timeSpentComission)</i>
 <p>selectShip</p>	Оценивает, у какого из двух причалов находятся прибывшее под погрузку судно-балкер. Условие для выбора выхода <i>true: agent.Порт == 0</i>
 <p>loadingCoal</p>	Имитирует погрузку угля из погрузочного рукава СПМ № 1 на причале № 1. Блок соединен со входом <i>unloadToPier1</i> модуля склада терминала модели. Аналогичный по функционалу блок <i>loadingCoal1</i> имитирует погрузку угля из погрузочного рукава СПМ № 2 на причале № 2. Блок соединен со входом <i>unloadToPier2</i> модуля склада терминала имитационной модели
 <p>loadingShip</p>	Имитирует процесс погрузки угля на причале № 1 из СПМ № 1 в трюм судна-балкера и является связующим звеном с Библиотекой моделирования потоков, а также другими модулями модели – склада и тылового грузового фронта. Каждое загружаемое судно принимает на борт объем груза угля, заданный параметром <i>shipCapacity</i> . Блок задерживает в себе судно, пока не будет погружен весь объем угля <i>shipCapacity</i> . Скорость погрузки определяется производительностью СПМ и параметром <i>performanceRateSLM</i> . Аналогичный по функционалу блок <i>loadingShip1</i> имитирует погрузку судна на причале № 2 из СПМ № 2. Он соединен со входом <i>loadingCoal1</i>
 <p>documents</p>	Имитирует задержку судна на время оформления пакета товаросопроводительных документов. Время задержки зависит от параметра <i>timeSpentComission</i> , является стохастической величиной и задается по нормальному закону распределения <i>normal(1, 1/2*timeSpentComission)</i>
 <p>moveToExit</p>	Направляет загруженное судно-балкер из места стоянки у причала № 1 или 2 к точке выхода из модели <i>shipExit</i> со скоростью 8 уз (14 км/ч)
 <p>releasePiers</p>	Освобождаются ресурсы – причалы для погрузки из блока <i>piersPool</i> , захваченные блоком № 2, и открывается возможность поступления новых судов в модель в точку <i>shipEnter</i>
 <p>shipsExit</p>	Блок заканчивает алгоритм работы модуля МГФ имитационной модели и отвечает за удаление погруженных судов-балкеров из модели. Блок также ведет подсчет количества погруженных судов в модели



Как и железнодорожный (тыловой) грузовой фронт, морской фронт является системой массового обслуживания, обрабатывающей заявки на погрузку и обслуживание морских судов [10]. Вследствие этого при имитационном моделировании морского фронта в качестве потока заявок выступает движение агентов – судов-балкеров различной вместимости. Модельным отражением движения потока заявок являются сменяющиеся фазы инициирования, их прерывание, задержки и обработка на каждом участке движения внутри модели, а затем и покидание агентами среды с измененными итоговыми показателями. Генерация судов-балкеров в модели ведется блоком *shipsEnter*, который вызывает агентов методом *inject()*. Суда физически появляются в точке пространства *shipEnter*, соединенной с путями перемещения судов по акватории. Далее сгенерированные суда по одному захватывают ресурс *piersPool* – места стоянки у причалов № 1 и 2 на угольном терминале в точках пространства *pier1\_point* и *pier2\_point*. Далее сгенерированные суда по очереди физически перемещаются к захваченному ресурсу – местам стоянки для погрузки угля. В среде AnyLogic данный процесс реализован путем создания коллекции *toPort*, состоящей из двух элементов – причалов. В параметрах блока *moveToPier* за выбор узла, к которому направляется судно, отвечает функция *ToPort.get(agent.Порт)*; суда-балкеры перемещаются по акватории терминала со скоростью 8 уз (14 км/ч), замедляясь и ускоряясь при остановках и начале движения.

После постановки к выбранному причалу, согласно логике модели, судно-балкер проходит госкомиссию – таможенный, пограничный и санитарный контроль. За эти процессы отвечает блок логики типа *Delay – comission*. Сроки прохождения судном госкомиссии задаются стохастической величиной по нормальному закону распределения  $normal(1, \frac{1}{2} * timeSpentComission)$ . После окончания госкомиссии судно начинает прием угля в трюмы со склада терминала через блоки логики *loadingShip*. По условиям блока судно стоит у причала, пока не примет на борт объем груза, равный значению параметра *shipCapacity*. По окончании приема на борт объема груза, равного значению параметра *shipCapacity*, согласно логике модели, судно-балкер ожидает оформления пакета товаросопроводительных и транспортных документов. За эти процессы также отвечает блок логики типа *Delay – documents*. Сроки ожидания оформления пакета документов задаются стохастической величиной по нормальному закону распределения  $normal(1, \frac{1}{2} * timeSpentComission)$ . По окончании оформления документов судно отходит от причала и по заданному в блоке логики *moveToExit* пути

движения физически перемещается в точку пространства *shipExit*, забирая с собой весь погруженный объем угля, а затем освобождает захваченный ресурс *piersPool* – места стоянки у причала. После этого судно покидает модель через блок логики *shipsExit*. Далее весь вышеуказанный цикл повторяется вызовом судов методом *inject()*. Блоки логики модуля МГФ связаны непосредственно с модулем и логикой склада угольного терминала. Так, блоки *loadingCoal* и *loadingCoal1*, которые имитируют погрузку угля из СПМ № 1 и 2 на двух причалах, соединены с выходами *unloadToPier1* и *unloadToPier1* модуля склада терминала.

Основные блоки логики, направляющие материальные потоки сыпучего груза угля на МГФ терминала, соединены в нестандартном блоке (агенте) – *outConveyorNet*. В модуле склада угольного терминала сыпучий груз угля накапливается в штабелях – контейнерах-резервуарах *coal\_storage\_1*, *coal\_storage\_2*, *coal\_storage\_3* и *coal\_storage\_4*.

В каждом контейнере-резервуаре груз накапливается поочередно до достижения их максимальной вместимости. При достижении максимальной вместимости контейнер-резервуар активирует команду вызова агента (судна) методом *inject()*. После постановки судна к причалу для приема груза из заполненного контейнера-резервуара начинается выдача количества груза, равного вместимости морского судна *shipCapacity*, по конвейерам для сыпучих материалов *outStorage1*, ... , *outStorage4*. В нестандартный блок (агент) *OutConveyorNet* груз угля попадает через блоки логики *enterStorage1*, ... , *enterStorage4*. Направляемый для погрузки на судно груз угля физически попадает на конвейеры для сыпучих материалов *outBeltStorage1*, ... , *outBeltStorage4* и движется по ним со скоростью, заданной параметром *outConveyorSpeed*, и интенсивностью, заданной параметром *performaceRateSLM*. Через блоки-селекторы *pierSelect1*, ... , *pierSelect4* идет выбор направления дальнейшего движения груза в адрес причала, на котором будет осуществляться погрузка на судно-балкер. Внутренний алгоритм работы селекторов *pierSelect1*, ... , *pierSelect4* реализован таким образом, чтобы формировать маршрут движения угля именно к тому причалу, у которого физически находится загружаемое судно. В укрупненном агенте *OutConveyorNet* груз угля следует через блоки-соединители *enterPier1From1\_2*, *enterPier1From3\_4*, *enterPier2From1\_2*, *enterPier2From3\_4*, объединяющие потоки сыпучего груза из разных контейнеров-резервуаров. Затем уголь физически попадает на конвейеры для сыпучих материалов *outPier1* и *outPier2* через блоки логики *outPier1* и *outPier2* соответственно, после чего покидает логику укрупненного агента *OutConveyorNet*, перемещаясь далее в агент верхнего уровня *Main*

(рис. 7). В агенте верхнего уровня *Main* груз угля, направляемый со склада в адрес причалов, попадает в блоки логики *unloadToPier1* и *unloadToPier2*,

которые затем перенаправляют потоки в блоки – *loadingCoal* и *loadingCoal1*.

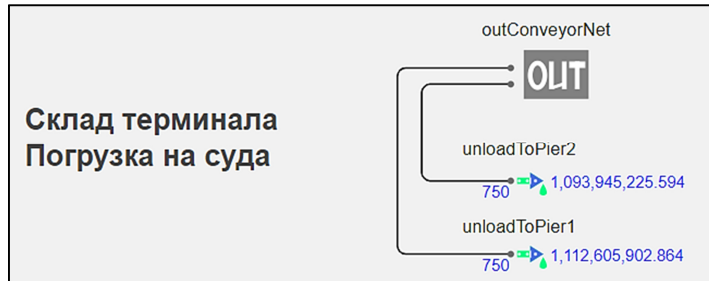


Рис. 7. Блок-схема связей логики укрупненного агента *OutConveyorNet*

Fig. 7. Block diagram of the connections of the logic of the enlarged agent *OutConveyorNet*

Дополнительные функции и подпроцессы реализованы в модели путем использования в рабочем окне агента верхнего уровня *Main* различных компонентов агентов, предусмотренных Anylogic, – переменных, параметров, функций, коллекций, сбора статистики. Для упрощения восприятия разработанной имитационной модели внутренняя функциональность дополнительных функций и коллекций будет являться «черным ящиком» (Black Box).

В имитационной модели в зоне *viewControl* реализованы элементы управления конфигурацией МГФ. Управление осуществляется ползунками и флажками, меняющими в режиме реального времени 4 основные параметра грузового фронта. Это дает возможность тонко настраивать до 48 сценариев поведения модели, исходя из требований экспериментов. Пользовательский интерфейс окна управления моделью представлен на рис. 8.

### Управление работой морского грузового фронта

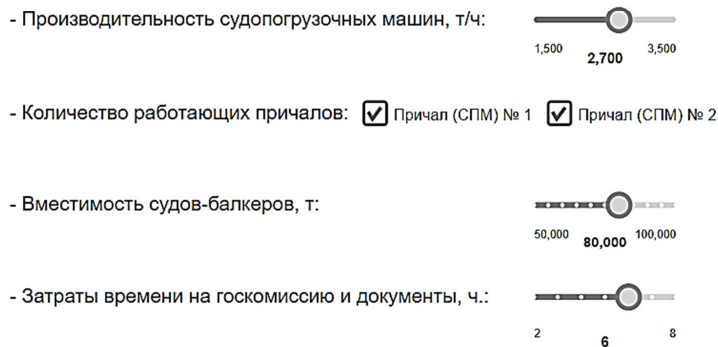


Рис. 8. Интерфейс окна управления имитационной моделью морского грузового фронта

Fig. 8. Interface of the control window for the simulation model of the sea cargo front

В зоне *viewStat* в режиме реального времени в виде графиков приводятся результаты работы имитационной модели, а также ведется подсчет итоговых показателей деятельности терминала. Интерфейс экрана результатов работы имитационной модели представлен на рис. 9.

На рис. 8 приведены параметры конфигурации модели, которые были использованы в тестах для

верификации и валидации созданной имитационной модели. На рис. 9 представлены полученные результаты, доказывающие адекватность работы модели и иллюстрирующие высокую сходимость результатов моделирования с результатами работы реальных российских морских угольных терминалов, таких как, например, АО «Ростерминалуголь».



Рис. 9. Интерфейс экрана результатов работы имитационной модели морского грузового фронта терминала (пример)

Fig. 9. Interface of the display of the results of the simulation model of the sea cargo front of the terminal (example)

Имитационная модель МГФ угольного терминала реализована в виде модуля и объединена с разработанными нами ранее моделями (модулями) склада терминала и тылового (железнодорожного) грузового фронта в рамках единой укрупненной дискретно-событийной модели [4, 11].

### Заключение

В результате проведенной работы по созданию модели МГФ экспортного угольного терминала в среде Anylogic сделаны следующие основные выводы:

1. Использование имитационного моделирования позволяет значительно повысить точность расчета показателей работы и пропускной способности МГФ угольного терминала, по сравнению со стандартными аналитическими методами;
2. Высокое качество и вариативность получаемой в модели статистики позволяет напрямую сравнивать итоговые результаты с реальными по-

казателями работы эксплуатируемых угольных терминалов;

3. Среда Anylogic является адекватным компьютерным инструментом, пригодным для выполнения расчетов показателей работы и пропускной способности МГФ угольного терминала, а также проведения анализа чувствительности факторов и показателей, влияющих на итоговые результаты его работы;

4. Использование имитационного моделирования в среде Anylogic позволяет получать прозрачные и наглядные результаты, гибко настраивая практически все возможные показатели и конфигурации моделируемого фронта;

5. Разработанная модель МГФ экспортного угольного терминала в среде Anylogic может быть использована в качестве прикладного расчетного продукта для морских угольных терминалов за счет возможностей по интеграции базы статистических показателей и выполнения наглядной проверки эффективности получаемых результатов.

### Список источников

1. Галин А. В., Кутцов Н. В., Кивилев М. Э. Обоснование применения стохастического метода для определения пропускной способности угольных терминалов // Трансп. дело России. 2020. № 4. С. 169–172.
2. Vianen van T. A., Mooijman D. L., Ottjes J. A., Negenborn R. R., Lodewijks G. Simulation-based operational control of a dry bulk terminal // Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC 2012), Beijing, China. 2012. N. 7. P. 263–281.
3. Кутцов Н. В. Исследование актуальных размеров балкеров для технологического проектирования морских портов // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2017. Т. 9. № 2. С. 323–336. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-323-336.
4. Мазуренко О. И., Русинов И. А. Моделирование тылового грузового фронта морского угольного терминала // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2021. Т. 13. № 5. С. 636–650. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-636-650.

5. Dragovic B., Park N. K., Radmilovic Z. Ship-berth link performance evaluation: simulation and analytical approaches // *Maritime Policy and Management*. 2006. N. 33 (3). P. 281–299.

6. Куцзов Н. В., Кузнецов А. Л., Шатилин А. В. Разработка модели вероятностной оценки пропускной способности морского грузового фронта экспортного угольного терминала // *Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова*. 2020. Т. 12. № 1. С. 17–34. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-17-34.

7. Мазуренко О. И. Оценка мирового опыта оснащения и эксплуатации экспортных перегрузочных комплексов по перевалке угля в морских портах // *Науч. обозрение. Техн. науки*. 2020. № 5. С. 48–57.

8. Кузнецов А. Л., Кириченко А. В., Семенов А. Д. Планирование работы тыловых грузовых фронтов морских контейнерных терминалов методами имитационного моделирования // *Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота*

им. адм. С. О. Макарова. 2019. Т. 11. № 2. С. 243–253. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-243-253.

9. Мазуренко О. И. Выбор IT платформы и программного обеспечения для проведения имитационного моделирования работы терминала морского порта // *Логистика: современные тенденции развития: материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 12–13 апреля 2018 г.)*. СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2018. С. 307–311.

10. Vianen van T. A., Ottjes J. A., Lodewijks G. Modeling the arrival process at dry bulk terminals // *Proceedings of the Bulk Ports, Terminals and Logistics 2012 Conference*, Amsterdam, The Netherlands. 2012. N. 1. P. 124–137.

11. Мазуренко О. И. Обоснование использования дискретно-событийного имитационного моделирования для планирования работы грузовых фронтов морских угольных терминалов // *Науч. обозрение. Техн. науки*. 2021. № 2. С. 11–15.

### References

1. Galin A. V., Kuptsov N. V., Kivilev M. E. Obosnovanie primeneniia stokhasticheskogo metoda dlia opredeleniia propusknoi sposobnosti ugol'nykh terminalov [Rationale for using stochastic method to determine capacity of coal terminals]. *Transportnoe delo Rossii*, 2020, no. 4, pp. 169-172.

2. Vianen van T. A., Mooijman D. L., Ottjes J. A., Negenborn R. R., Lodewijks G. Simulation-based operational control of a dry bulk terminal. *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC 2012)*, Beijing, China, 2012, no. 7, pp. 263-281.

3. Kuptsov N. V. Issledovanie aktual'nykh razmerenii balkerov dlia tekhnologicheskogo proektirovaniia morskikh portov [Studying actual dimensions of bulk carriers for technological design of seaports] *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2017, vol. 9, no. 2, pp. 323-336. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-323-336.

4. Mazurenko O. I., Rusinov I. A. Modelirovanie tylovogo грузового фронта морского угольного терминала [Modeling rear cargo front of sea coal terminal]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2021, vol. 13, no. 5, pp. 636-650. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-636-650.

5. Dragovic B., Park N. K., Radmilovic Z. Ship-berth link performance evaluation: simulation and analytical approaches. *Maritime Policy and Management*, 2006, no. 33 (3), pp. 281-299.

6. Kuptsov N. V., Kuznetsov A. L., Shatilina A. V. Razrabotka modeli veroiatnostnoi otsenki propusknoi sposobnosti morskogo грузового фронта экспортного угольного терминала [Developing model for probabilistic estimation of capacity of sea cargo front of export coal terminal]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2020, vol. 12, no. 1, pp. 17-34. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-17-34.

7. Mazurenko O. I. Otsenka mirovogo opyta osnashcheniia i ekspluatatsii eksportnykh peregruzochnykh kompleksov po perevalke uгля v morskikh portakh [Evaluating world experience in equipping and operating export transshipment complexes for coal transshipment in seaports]. *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki*, 2020, no. 5, pp. 48-57.

8. Kuznetsov A. L., Kirichenko A. V., Semenov A. D. Planirovanie raboty tylovykh грузовых фронтов морских контейнерных терминалов методами имитационного моделирования [Planning work of rear cargo fronts of sea container terminals by simulation methods]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 243-253. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-243-253.

9. Mazurenko O. I. Vybor IT platformy i programmnogo obespecheniia dlia provedeniia imitatsionnogo modelirovaniia raboty terminala morskogo porta. Logistika: sovremennye tendentsii razvitiia [Choosing IT platform and software for simulation of seaport terminal. Logistics: current development trends]. *Materialy XVII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Sankt-Peterburg, 12–13 aprelia 2018 g.)*. Saint-Petersburg, Izd-vo GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2018. Pp. 307-311.

10. Vianen van T. A., Ottjes J. A., Lodewijks G. Modeling the arrival process at dry bulk terminals. *Proceedings of the Bulk Ports, Terminals and Logistics 2012 Conference*, Amsterdam, The Netherlands, 2012, no. 1, pp. 124-137.

11. Mazurenko O. I. Obosnovanie ispol'zovaniia diskretno-sobytiinogo imitatsionnogo modelirovaniia dlia planirovaniia raboty грузовых фронтов морских угольных терминалов [Rationale for using discrete-event simulation for planning cargo front operation of sea coal terminals]. *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki*, 2021, no. 2, pp. 11-15.

**Информация об авторах / Information about the authors**

**Ольга Игоревна Мазуренко** – аспирант кафедры коммерческой эксплуатации водного транспорта; Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова; mazyrenko.olga@gmail.com

**Olga Igorevna Mazurenko** – Postgraduate Student of the Department of Commercial Operations of Water Transport; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; mazyrenko.olga@gmail.com

**Игорь Александрович Русинов** – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой коммерческой эксплуатации водного транспорта; Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова; RusinovIA@gumrf.ru

**Igor A. Rusinov** – Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Commercial Operations of Water Transport; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; RusinovIA@gumrf.ru

