

MODEL FOR SELECTING THE PORT CARGO HANDLING EQUIPMENT ON THE BASIS OF MODELING THE PORT TECHNOLOGICAL LINE

I. V. Zub, Yu. E. Ezhov, N. N. Stenin

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
Saint-Petersburg, Russian Federation

The issue of introducing a quality criterion by the port to ensure competitiveness in the market of loading and unloading services is considered in the paper. It is noted that the quality criteria can be provided if the characteristics of the port handling equipment correspond to the calculated data on performance and reliability. It is emphasized that the formation of a fleet of port handling equipment (optimization), which is necessary after identifying "weak" points in the operation process, is a key task of port management. Cargo turnover, cost of technological processes, port capacity and warehouse capacity depend on the port handling equipment (various technological schemes of port operation depend on the equipment). In order to determine the economic effect of the introduction of new technological solutions or technical re-equipment, expressed in complete or partial replacement of the port handling equipment fleet, not only the costs of purchasing new equipment, the costs associated with changing the loading and unloading technology, but also the operating costs of maintaining the port handling equipment in working order are taken into account. The choice of port handling equipment is a task on which the economic performance of the port depends. To select the port reloading equipment, a model of the operation of the technological line, built on the basis of the Petri net apparatus, is considered. This model formalizes the process of functioning the technological line and models logical connections between events. The model of functioning the port technological line considers solutions to conflict situations, the analysis of which shows that they are related to the technical condition of the port handling equipment fleet, its performance and technical conditions. It is concluded that the combination of solutions to conflict situations affects the economic efficiency of the port. The obtained simulation data are taken into account when selecting the port handling equipment. Based on the obtained performance data of port cargo handling equipment fleet, the annual cargo turnover of the port is planned and the main characteristics of the service quality (speed of vehicle service, average waiting time of vehicle service) are identified.

Keyword: port handling equipment, modeling, technological processes, cargo turnover, selection criteria.

For citation:

Zub, Igor V., Yuri E. Ezhov, and Nikolay N. Stenin. "Model for selecting the port cargo handling equipment on the basis of modeling the port technological line." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 12.6 (2020): 1016–1028. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1016-1028.

УДК 656.614.35; 656.613.1

МОДЕЛЬ ВЫБОРА ПОРТОВОГО ПЕРЕГРУЗОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПОРТА

И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов, Н. Н. Стенин

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

В статье рассмотрен вопрос введения портом критерия качества для обеспечения конкурентоспособности на рынке погрузочно-разгрузочных услуг. Отмечается, что критерии качества могут быть обеспечены при условии соответствия характеристик портового перегрузочного оборудования расчетным данным по производительности и надежности. Подчеркивается, что формирование парка портового перегрузочного оборудования (оптимизация), необходимое после выявления «слабых» мест в процессе эксплуатации, является ключевой задачей управления портом. От портового перегрузочного оборудования зависят различные технологические схемы работы порта, грузооборот, себестоимость технологических процессов, пропускная способность порта и емкость склада. В целях определения экономического эффекта от внедрения новых технологических решений или технического перевооружения, выраженного в полной

или частичной замене парка портового перегрузочного оборудования, учитываются не только расходы на закупку нового оборудования, издержки, связанные с изменением технологии погрузочно-разгрузочных работ, но и эксплуатационные расходы на поддержание портового перегрузочного оборудования в работоспособном состоянии. Выбор портового перегрузочного оборудования является задачей, от решения которой зависят экономические показатели порта. Для выбора портового перегрузочного оборудования рассматривается модель функционирования технологической линии, построенная на основе аппарата сетей Петри. Данная модель формализует процесс функционирования технологической линии и моделирует логические связи между событиями. В модели функционирования технологической линии порта рассматриваются решения конфликтных ситуаций, анализ которых показывает, что они связаны с техническим состоянием парка портового перегрузочного оборудования, его производительностью и техническим состоянием. Сделан вывод о том, что совокупность решений конфликтных ситуаций оказывает влияние на экономическую эффективность работы порта. Полученные данные моделирования учитываются при выборе портового перегрузочного оборудования. На основе полученных данных о производительности парка портового перегрузочного оборудования планируется годовой грузооборот порта и определяются основные характеристики качества обслуживания (скорость обслуживания транспортного средства, среднее время ожидания транспортным средством обслуживания).

Ключевые слова: портовое перегрузочное оборудование, моделирование, технологические процессы, грузооборот, критерии выбора.

Для цитирования:

Зуб И. В. Модель выбора портового перегрузочного оборудования на основе моделирования технологической линии порта / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов, Н. Н. Стенин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 6. — С. 1016–1028. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1016-1028.

Введение (Introduction)

Рост грузоперевозок и конкуренция между портами ужесточают требования к обслуживанию грузоперевозчиков и грузовладельцев. Для обеспечения качественного обслуживания вводится система менеджмента качества, устанавливающая основные критерии, одним из которых является скорость обслуживания транспортных средств (ТС), достигаемая следующими способами:

- увеличение количества портового перегрузочного оборудования (ППО);
- изменение технологии погрузочно-разгрузочных работ (ПРР);
- техническое перевооружение порта (замена ППО на более производительное).

Первый способ предполагает увеличения парка ППО с созданием резерва как по производительности, так и по количественному составу парка. При стратегическом планировании увеличения пропускной способности порта, которая зависит от суммарного потока входящих и выходящих грузопотоков и производительности ППО. Покупка резервного ППО должна иметь технико-экономическое обоснование. В то же время существует вероятность того, что имеющееся ППО можно использовать для существующей технологической схемы ПРР. При изменении технологии работы потребуется замена парка ППО.

Второй способ выполняется при изменении стратегических планов развития порта. Для данного варианта, связанного с изменением плана стратегического развития порта, имеются различные предпосылки: смена грузопотока, как по объему, так и по номенклатуре груза [1]. При этом парк ППО может остаться прежним или полностью быть заменен. Замена парка ППО требует капитальных вложений, поэтому этот процесс может продолжаться в течение длительного периода времени. Рисками при изменении технологии является временное снижение скорости обработки ТС и суммарного грузопотока из-за проведения реорганизационных мероприятий. Новая технология ПРР может изменять конфигурацию склада. При этом следует заметить, что под конфигурацией склада подразумевается расположение штабелей с грузом, при этом геометрические размеры терминала остаются прежними (S_{π}):

$$S_{\pi} = \text{const.} \quad (1)$$

Третий способ — техническое перевооружение порта — возможен при смене грузопотока и при моральном и физическом старении парка ППО.

При строительстве нового порта разрабатывается имитационная модель, на основе которой рассматриваются ситуации, при которых возможно появление рисков. На основе результатов анализа модели принимается решение об использовании в порту оптимальной технологической схемы, обеспечивающей скорость обработки ТС, сохранность груза и максимальный объем склада. На основе разработанной технологической схемы осуществляют выбор ППО.

Совершенствование работы порта базируется на изменении технологических схем ПРР, замены или модернизации ППО и реорганизации технической эксплуатации ППО. При разработке и обосновании работы технологических схем ПРР, как правило, выбирают ППО одной линейки, что позволяет сократить эксплуатационные расходы и, следовательно, себестоимость единицы обработанного груза (ТЕУ, т, м³ и др.). Для определения экономического эффекта от внедрения новых технологических решений или технического перевооружения, которое выражается в полной или частичной замене парка ППО, учитываются не только расходы на закупку нового оборудования, издержки связанные с изменением технологии ПРР, но и эксплуатационные расходы на поддержание ППО в работоспособном состоянии.

Парк ППО — это производственный потенциал терминала, необходимый для выполнения технологических операций ПРР, поэтому из возможного потенциала парка ППО планируются не только годовой грузооборот порта, но и сменно-суточный план ПРР. Выбор ППО — задача, от решения которой зависят экономические показатели порта. Ввиду того, что всегда существуют варианты выбора, так как ППО производятся несколькими производителями, для решения этой задачи применяются различные способы и методы.

Методы и материалы (Methods and materials)

Смена технологии ПРР производится при изменении стратегических задач развития порта. Весь процесс изменений разбивается на определенные отрезки времени и носит последовательный характер. Если для изменения технологии ПРР требуется замена ППО, то на каждый этап планируются финансовые расходы (Φ_n) и определяются средства и способы приобретения оборудования. На финансовые расходы накладываются ограничения сверх планового периода:

$$\Phi_n \leq R_j, \quad (2)$$

где R_j — расходы на заданный горизонт планирования j .

Планирование доходов зависит от грузооборота порта. Горизонт планирования по грузообороту порта (Q_n) представляет следующее множество:

$$(qp_1, qp_2, \dots, qp_i) Q, i = 1, 2, \dots, m. \quad (3)$$

Значения qp_i не зависят от предыдущего и последующего периода, грузооборот в i -й период не может быть точно определен, так как зависит от экономической ситуации и различных внешних воздействий. Для постановки задачи увеличения экономической составляющей порта ставится задача получения максимальной прибыли:

$$F_i(qp_1, qp_2, \dots, qp_i) \rightarrow \max. \quad (4)$$

Решение условия (4) зависит от Q_n на определенный плановый период, в течение которого функционал F_i будет иметь максимальные значения, достижимые только при наличии необходимых ресурсов ППО. Ресурс ППО по производительности зависит от технического состояния, которое обеспечивается системой технической эксплуатации. С увеличением наработки ППО расходы на обслуживание системы технической эксплуатации возрастают. Это объясняется старением деталей и узлов. Прибыль от эксплуатации ППО ($\Pi_{\text{эсп}}$) в зависимости от времени наработки ($t_{\text{нар}}$) определяется выражением

$$\Pi_{\text{эсп}}(t_{\text{нар}}) = D(t_{\text{нар}}) - Z(t_{\text{нар}}) - Ш(t_{\text{нар}}) \geq \Pi_{\text{мин}}, \quad (5)$$

где $D(t_{\text{нар}})$ — доход от эксплуатации ППО; $3(t_{\text{нар}})$ — затраты на поддержание ППО в работоспособном состоянии; $Ш(t_{\text{нар}})$ — штрафные санкции за простой ТС под погрузкой (при отказе ППО); Π_{\min} — минимальная граница прибыли.

Если неравенство (5) меняет знак на противоположный, то это свидетельствует о том, что парк ППО, если рассматривается парк в целом или отдельное оборудование, достиг предельного состояния и подлежит замене:

$$\Pi_{\text{эсп}}(t_{\text{нар}}) \leq \Pi_{\min}. \quad (6)$$

Кроме неравенства (6), при выборе ПТО рассматривается коэффициент (k_3), который показывает отношение стоимости единицы ППО ($СТ_0$) к затратам на эксплуатацию ($СТ_3$):

$$k_3 = \frac{СТ_3}{СТ_0} = \frac{СТ_{\text{эн}} v_{\text{эн}} + СТ_{\text{ТО и Р}} f(t_{\text{нар}})}{СТ_0}, \quad (7)$$

где $СТ_{\text{эн}}$ — стоимость единицы энергоносителя, причем для оборудования, работающего от электропитания, кВт/ч, для оборудования с ДВС — л/ч или кг/ч дизельного топлива; $СТ_{\text{ТО и Р}}$ — стоимость работ по техническому обслуживанию и ремонту (ТО и Р); $v_{\text{эн}}$ — потребляемое количество энергоносителей; $f(t_{\text{нар}})$ — функция, показывающая изменение расходов на эксплуатацию по мере наработка ППО:

$$f(t_{\text{нар}}) = \exp(k_c t) - 1, \quad (8)$$

где k_c — коэффициент, определяемый по статистическим данным.

Для окупаемости вложений в приобретение нового ППО задают целевую функцию

$$(\mathcal{E}\Phi_n) \rightarrow \max, \quad (9)$$

где $\mathcal{E}\Phi_n$ — эффективность работы порта является функциональной зависимостью:

$$\mathcal{E}\Phi_n = f(\Phi_n, D, T). \quad (10)$$

Здесь T — технология работы порта, являющаяся «вектором развития» на заданный плановый период.

Для определения технических ресурсов рассмотрим модель работы технологической линии порта (рис. 1), построенную при помощи использования аппарата сетей Петри. Использование последних обусловлено рядом специфических особенностей порта, а именно:

- в структуре порта выделяются подсистемы с обратными связями;
- оптимизация отдельных подсистем может приводить к конфликтным ситуациям, не обеспечивая системную оптимизацию;
- транспортные потоки и процесс обслуживания заявок стохастичны.

Позициями p_1 – p_3 обозначен морской грузовой фронт (МГФ). В позиции p_2 могут быть несколько фишек в зависимости от количества технологических линий на одном причале (это зависит от грузоподъемности и размеров судна). Для снижения динамических нагрузок на причал при перемещении фронтального оборудования устанавливают по одной единице на каждый трюм при обработке линейных судов и в зависимости от специализации порта. Например, если на МГФ установлены порталы краны, то необходимо учитывать минимальный и максимальный радиусы поворота стрелы. Срабатывание перехода π_1 возможно в том случае, когда три фишки из позиций p_1 – p_3 поступят на переход π_1 . Это означает, что причал не занят и готов к приему судна (позиция p_1), фронтальное ППО находится в исправном или работоспособном состоянии (позиция p_2), судно пришвартовано к причалу.

При количестве фишек в позиции p_2 больше одной разрабатывается встроенная сеть, поскольку в работе могут быть задействованы не все фишки, но в этом случае не сработает переход. В данном случае встроенная сеть помогает решить конфликтные ситуации. В позиции p_4 возникает конфликтная ситуация, груз находится на ППО в ожидании его передачи на складское оборудование

в том случае, если ППО не обладает достаточной производительностью или его количество меньше требуемого.

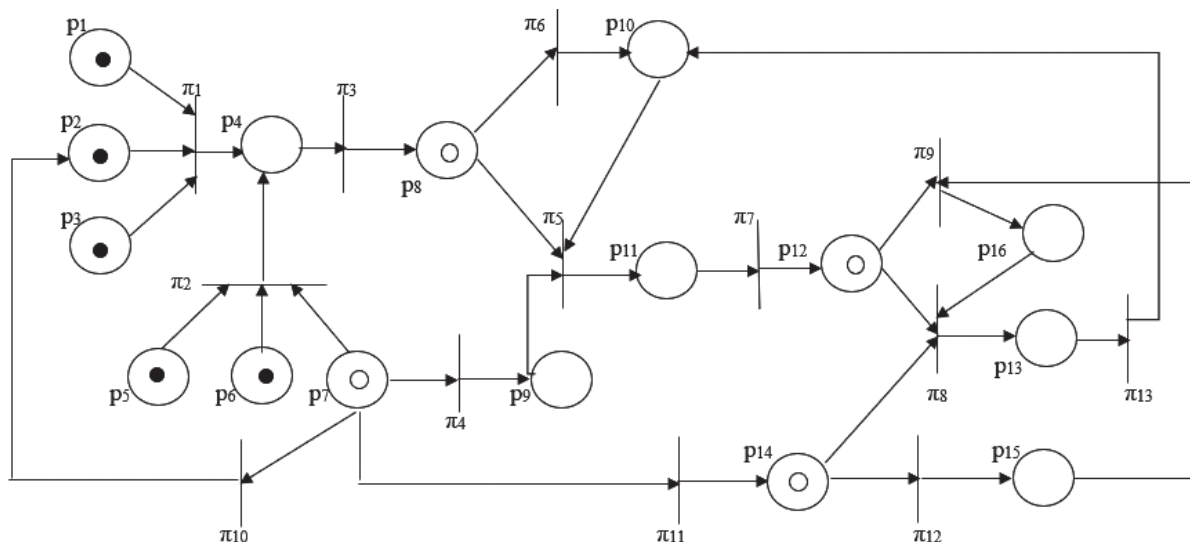


Рис. 1. Модель работы технологической линии порта:

- p_1 — причал; p_2 — причальное ППО; p_3 — судно; p_4 — выгрузка судна разрешена;
 p_5 — свободные места под складирование груза; p_6 — бригада докеров-механизаторов;
 p_7 — парк технологического ППО; p_8 — груз на фронтальном ППО; p_9 — груз на фронтальном ППО;
 p_{10} — технологическое ППО свободно; p_{11} — фронтальное ППО в ожидании;
 p_{12} — груз доставлен к месту хранения;
 p_{13} — груз на месте хранения; p_{14} — тыловое ППО свободно;
 p_{15} — тыловое ППО на месте выгрузки; p_{16} — ППО готов к выгрузке;
 π_1 — захват груза на судне; π_2 — формирование сменно-суточного плана;
 π_3 — выгрузка судна; π_4 — сдача технологического ППО в эксплуатацию;
 π_5 — погрузка транспортно-технологического ППО; π_6 — ожидание фронтальной
машины технологического ППО для погрузки; π_7 — транспортировка груза к месту хранения;
 π_8 — перегрузка груза на место хранения; π_9 — ожидание тылового ППО;
 π_{10} — выполнение ППО складских операций; π_{11} — перемещение тылового ППО
к месту выгрузки; π_{12} — убытие технологического ППО под погрузку

Для планирования всех технологических процессов в порту, касающихся возможности принятия груза (наличие свободных грузовых мест (позиция p_5)), оптимального распределения ресурсов (людских (позиция p_6) и технических (позиция p_7)), формируется сменно-суточный план (ССП). Позиция p_7 является конфликтной. Конфликт в этой позиции решается вложенной сетью (рис. 2), которая отображает организацию работ по технической эксплуатации парка ППО (рассматривается технологическое и тыловое ППО), так как ППО может находиться на профилактических работах (ТО и Р), выполнять функциональные задачи на различных грузовых фронтах, а также быть в резерве. При срабатывании переходов π_1 и π_2 фишки перемещаются в позицию p_4 , т. е. выгрузка судна разрешена.

Вложенные сети [2], [3] позволяют расширить возможности основной сети и найти решения конфликтных ситуаций на стадии моделирования. Вложенные сети Петри работают автономно и взаимодействуют с основной сетью.

В позиции p_7 позициях r_1-r_3 имеют фишки, значение которых $k = n$, где n — количество ППО. В сети Петри (см. рис. 2), позиции r_1-r_3 являются конфликтными. Вложенная сеть позиций r_1-r_3 имеет идентичный характер (рис. 3). В этой сети моделируются только плановые, регламентные работы, так как в данном исследовании не ставились задачи рассмотрения аварийных ремонтов и причин вывода ППО из эксплуатации. В модели на рис. 3 переходы tv_1 и tv_2 — «переходы с охраной» (согласно терминологии источника [2]), имеют временное значение.

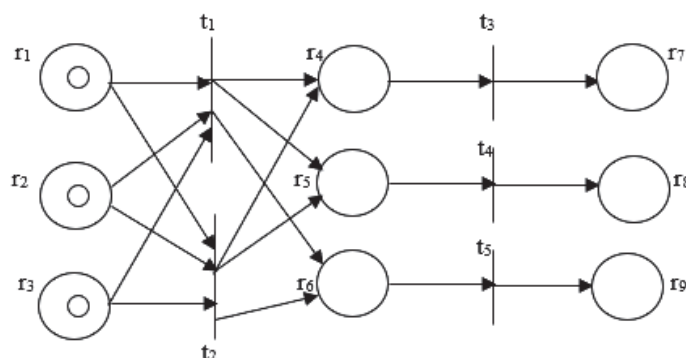


Рис. 2. Вложенная сеть Петри позиции p_7 :

r_1 — фронтальное ППО; r_2 — тыловое ППО; r_3 — транспортно-технологическое ППО;
 r_4 — фронтальное ППО на ТО; r_5 — тыловое ППО в работоспособном состоянии;
 r_6 — транспортно-технологическое ППО в работоспособном состоянии;
 r_7 — фронтальное ППО в работоспособном состоянии; r_8 — тыловое ППО в работоспособном состоянии; r_9 — транспортно-технологическое ППО в работоспособном состоянии; t_1 — вывод на ТО; t_2 — вывод на плановый ремонт;
 t_3 – t_5 — проведение регламентных работ

В переходе tv_1 время наработки ($T_{нар}$) меньше или равно наработке ($T_{ТО}$) на проведение технического обслуживания (ТО): $T_{нар} \leq T_{ТО}$. В переходе tv_2 наработка меньше или равна наработке на текущий ремонт ($T_{тр}$): $T_{нар} \leq T_{тр}$. Это означает, что переход tv_1 или tv_2 сработает при достижении ППО определенной наработки моточасов.

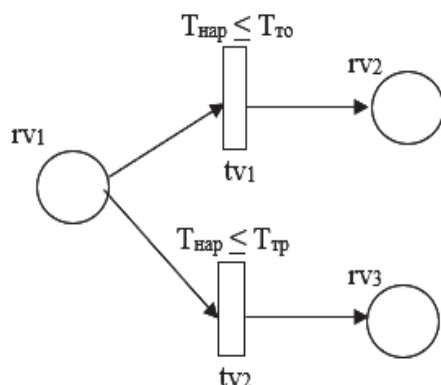


Рис. 3. Вложенная сеть

Петри позиций r_1 – r_3 ;
 rv_1 — ППО; rv_2 — ППО на ТО;
 rv_3 — ППО на ремонте;
 tv_1 — наработка на ТО;
 tv_2 — наработка на ремонт

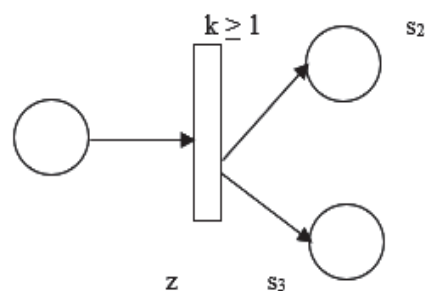


Рис. 4. Встроенная сеть позиции p_8 :

s_1 — груз на фронтальной машине;
 s_2 — транспортно-технологическое ППО под погрузкой; s_3 — отсутствие транспортно-технологического ППО;
 z — переход с охраной

В позиции p_8 — конфликтная ситуация (рис. 4), которая довольно часто встречается в порту при ошибках в расчете производительности всех звеньев технологической линии.

Встроенная сеть позиции p_8 разрешает возникшую конфликтную ситуацию следующим образом: переход z срабатывает только в том случае, когда в наличии транспортно-технологическое ППО (k). При $k > 1$ транспортно-технологическое ППО будет простаивать в ожидании подачи груза фронтальным ППО. В позиции p_{12} конфликтная ситуация идентична ситуации в позиции p_8 .

Имитационная модель (см. рис. 1), моделируя работу технологической линии порта, выявляет конфликтные ситуации и их решения. На основе этой модели строится алгоритм выбора ППО технологической линии. Модель работы МГФ рассматривалась и в работах [3], [4], что свидетельствует об актуальности данного аспекта работы порта. В работе [4] рассматривается модель МГФ

для определения достаточного количества причалов для обработки заданного грузопотока, но не рассматривается производительность ППО.

Основными данными в процессе технологического проектирования МГФ являются количество планируемых судозаходов и судовых технологических операций: *судно — склад, судно — автотранспорт, судно — судно* и в обратном порядке. В результате расчетов получают следующие параметры МГФ: пропускная способность порта (т/год, TEUs/год, м³/год), производительность оборудования, длина причальной линии, м [5], [6].

В случае технического перевооружения порта при выборе ППО ориентируются на грузооборот порта Q_p , который определяется в виде суммы грузопотоков, прибывающих в порт морским Q_m и сухопутным Q_c путями:

$$Q_p = Q_m + Q_c. \quad (11)$$

Все порты, за исключением терминалов для перегрузки сжиженного природного газа и терминалов для обработки насыпных грузов (угольные, зерновые), используют МГФ как для погрузки, так и для выгрузки судов. В свою очередь, грузооборот порта зависит от вместимости склада и заданных параметров хранения груза. В работе [7] рассматривается объем ПРР на складе. Если объем склада или определенная укрупненная единица хранения груза в порту (например, штабель на контейнерном или угольном терминале, резервуар для хранения углеводородов и др.) обслуживаются одной единицей ППО, то производительность установленного оборудования может быть меньше необходимой производительности, что потребует установки дополнительного оборудования.

Кроме МГФ, в порту функционирует железнодорожный и автомобильный грузовой фронты, которые характеризуются тем, что обслуживают определенные транспортные средства, имеют различные технологические процессы и ППО. На каждом грузовом фронте будут различные объемы ПРР и, следовательно, разные эксплуатационные затраты на ППО [8]. Для выполнения планового объема ПРР необходимо иметь производственный ресурс, зависящий от производительности ППО и выражающийся в машино-часах (машино-ч). Избыток мощности ППО приводит к его простоям, а недостаток — к простоям ТС, что отрицательно сказывается на конкурентоспособности порта [9].

При неопределенном или разнородном грузопотоке применяются универсальное ППО — порталные или мобильные краны [10]. Мобильные краны, ввиду того, что не привязаны к подкрановому рельсовому пути, могут использоваться практически в любой точке порта, а также имеют (в зависимости от модели) большую грузоподъемность, чем у порталных кранов. При закупке мобильно крана, как и для других видов ППО, лимитирующим параметром является давление аутигера ($F_{доп}$) на причал или складское покрытие:

$$F_{доп} < H_{доп. пр}, \quad (12)$$

где $H_{доп. пр}$ — допустимая нагрузка на причал.

Примечание. В случае мобильного крана допустимую нагрузку на причал определяют по распределенной нагрузке на аутигеры.

Ограничения по допустимой нагрузке ($F_{доп}$) на покрытие складской зоны являются общими для ППО различного назначения и моделей:

$$F_{доп} < H_{доп. ск}, \quad (13)$$

где $H_{доп. ск}$ — допустимая нагрузка на покрытие складской зоны.

При переходе с одного вида ППО на другой выполняется расчет соответствия покрытия нагрузок на покрытие складской зоны по неравенствам (12) и (13). При выборе ППО, нагрузки которого превышают допустимые, порт несет *прямые* убытки (Y) на ремонт причала ($P_{пр}$) и покрытия складской зоны ($P_{ск}$), а также *косвенные*, которые можно выразить в денежных единицах, так как при ремонте причала уменьшается количество судозаходов (SC), а при ремонте покрытия складской зоны ($CЗ$) появляются убытки от потери площади порта под складирование груза:

$$Y = P_{\text{пр}} + P_{\text{ск}} + SC + CZ_y. \quad (14)$$

В работе [11] предлагается выбор ППО производить по числу контейнеров, подлежащих складированию на площади 1 га. По нашему мнению, данный показатель не является критерием для выбора ППО, так как не ориентирован на *входящий* и *выходящий* потоки контейнеров. В работах [4], [12], [13] и др. моделируется работа порта посредством построения моделей, но в них не рассматривается выбор ППО, несмотря на то, что производительность ППО является важным аспектом в обработке заданного грузооборота и обеспечении пропускной способности [14].

Результаты (Results)

Алгоритм выбора ППО технологической линии порта является важной задачей, так как ППО должно сохранять работоспособность при заданных нагрузках по обработке грузопотока, что обеспечивает выполнение проектных расчетов. В то же время конструкция ППО должна отвечать требованиям Правил Ростехнадзора¹.

При выборе ППО необходимо ввести следующие ограничения:

1. Соблюдение температурного режима эксплуатации ППО — в зоне умеренного климата диапазон эксплуатационных температур $\pm 40^\circ$.
2. Грузоподъемность ($C_{\text{ар}}$) ППО должна превышать массу единицы груза.
3. Производительность ППО должна обеспечивать обработку планируемого или имеющегося грузопотока.

В настоящее время существует ряд производителей ППО, у которых заявленные технические характеристики ППО практически не имеют различий. Выбор ППО проводится методом экспертных оценок или при помощи модели. В первом случае выбор ППО зависит от опыта и предпочтений экспертов. Во втором случае выбор ППО основан на сравнении данных, используемых в модели. В построении модели используются данные, отражающие технические и эксплуатационные характеристики ППО.

Зная технические ресурсы и закон функционирования порта, можно прогнозировать, как будет работать порт при увеличении потока заявок, и определить основные характеристики качества (скорость обслуживания транспортного средства, среднее время ожидания транспортным средством обслуживания). На основании полученных данных портовый оператор будет планировать количество каналов обслуживания и состав парка ППО. При этом он ориентируется на следующие критерии:

– *критерий ограничения расходов на оказание погрузочно-разгрузочной услуги (Р):*

$$P = P_{\text{пт}} + P_{\text{обсл}} \rightarrow \min, \quad (15)$$

где $P_{\text{пт}}$ — расходы на приобретение ППО; $P_{\text{обсл}}$ — расходы на обслуживание ППО;

– *критерий наибольшего экономического эффекта ($\mathcal{E}_{\text{эфф}}$):*

$$\mathcal{E}_{\text{эфф}} = C_{\text{пост}} - C_c \rightarrow \max, \quad (16)$$

где $C_{\text{пост}}$ — поступающие средства (за вычетом налогов) от производства ППР; C_c — расходы на системы, обеспечивающие поступление средств.

С целью формализации технических аспектов введем следующие обозначения:

- модельное время t для суточного периода моделирования представим целочисленной переменной со значениями от 0 до 1080 (по минутная дискретизация);
- N — количество единиц ППО;
- n — количество типов ППО;
- $B(t) = \{b_1(t), \dots, b_k(t)\}$ — вектор технического состояния ППО в момент времени t .

¹ Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения. СПб.: ООО «ЦОТПБСППО», 2014. 124 с.

Состояние b_j описывается переменной, имеющей следующие значения:

0 — ожидание;

1 — занятость;

-1 — неисправность;

$x_i = (i = 1, \dots, n)$ — управляемые переменные — количество единиц ППО i -го типа;

$p_i = (i = 1, \dots, n)$ — суточная производительность единиц ППО i -го типа (TEU, т, м³ и др.);

$s_i = (i = 1, \dots, n)$ — себестоимость суточного содержания единицы ППО i -го типа, руб.;

d — средняя доходность обработки единицы груза;

Z — среднесуточное количество заявок на обслуживание транспортных средств, шт.;

r_{int} — средние потери доходов от суточной сверхплановой задержки обработки единицы груза, руб.;

r_{ext} — суточные потери предложения от суточной сверхплановой задержки обработки единицы груза, руб.;

V — емкость порта;

$\Pi = \{1, 2, \dots, k\}$ — множество производителей ППО, $k > 1$;

$\text{МК} \geq \max b$ — вылет морской консоли ППО, который должен быть равен или больше максимальной ширины судна (b);

$M = \{1, 2, \dots, n\}$ — множество моделей ППО у производителя Π , $n > 1$ (Выбор производится по требуемой грузоподъемности и производительности);

$g \geq \max h$ — максимальная глубина опускания грузозахватного приспособления ниже горизонта. (Зная проходные глубины порта, можно определить, с какой осадкой суда могут заходить в порт и, следовательно, выбрать параметр g).

Для ППО с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) учитываются следующие данные:

$D = \{1, 2, \dots, m\}$ — множество производителей ДВС, которыми комплектуется ППО, $m > 1$. При выборе ДВС для комплектования ППО учитываются ремонтпригодность, мощность и экологичность;

$B = \{1, 2, \dots, p\}$ — множество производителей ведущих мостов, которыми комплектуют ППО, $p > 1$;

$\text{Hyd} = \{1, 2, \dots, m\}$ — множество производителей гидравлических систем и гидравлических коробок передач, которыми комплектуют ППО, $m > 1$.

Для контейнерных терминалов в зависимости от технологии ПРР выбор может быть между ричстакером (RS) и козловым краном на пневмоходу (RTG). В работе [15] рассматривается вопрос о количестве RTG, которые должны использоваться на одном штабеле контейнеров с учетом производительности крана и в зависимости от технологической ситуации. При принятой на терминалах высоте складирования 3,5 яруса и полном складировании контейнеров в высоту, равную пяти ярусам, коэффициент загрузки штабеля равен 0,7. Зная техническую производительность, можно получить эксплуатационную производительность для пиковых нагрузок:

$$\text{ПР}_{\text{эк}} = ((3600 - t_{\text{об}} - t_{\text{ф}} - t_{\text{пер}}) / t_{\text{дв}}) 0,7, \quad (17)$$

где $t_{\text{об}}$ — время обеда; $t_{\text{ф}}$ — время, отпущенное на физиологические нужды; $t_{\text{пер}}$ — время, выделенное на приемку-сдачу смены, $t_{\text{дв}}$ — время движения, затраченное на перегрузку контейнера.

При обсуждении выбора RS используют следующие обозначения объектов и их характеристики:

$G = \{\text{emp}, w\}$, где emp — погрузчик для порожних контейнеров; w — погрузчик для груженых контейнеров;

RS — погрузчик с телескопической стрелой и различными грузовыми характеристиками, необходимыми для обработки контейнеров в первом и втором ряду стека;

$G_h = \{m_1, m_2, m_3\}$, где m_1, m_2, m_3 — грузоподъемность RS, соответственно, в первом, втором и третьем ряду.

При выборе RTG технологическими характеристиками являются выбор ширины пролёта и высоты складирования контейнеров. Стандартные RTG складывают под собой шесть рядов контейнеров по ширине (L), оставляя седьмой ряд свободным для проезда транспорта; в высоту (Y) складывается пять контейнеров, шестой ярус остается «проносным». Формула работы RTG записывается следующим образом: $L = 6 + 1$, $Y = 5 + 1$. Можно выбрать иную формулу для работы, однако это приведет к увеличению стоимости RTG.

Любое ППО в процессе эксплуатации подвергнуто внутренним и внешним воздействиям, которые приводят к изменению технического состояния оборудования. Для поддержания исправного или работоспособного технического состояния на любом техническом объекте проводятся регламентные работы, которые должны выполнять специалисты в соответствии с требованиями Правил Ростехнадзора. Если квалификация сотрудников порта не отвечает этим требованиям или по иным причинам, порт заключает с аутсорсинговой организацией договор на обслуживание ППО. В процессе решения вопроса о выборе между аутсорсинговыми организациями и штатным портовым ремонтным персоналом для обслуживания ППО используют *метод критериальных и экспертных оценок* [16]. Такой организацией может быть и дилер ППО, но в этом случае наличие сервисной службы (CS) у дилера рассматривается как один из критериев выбора ППО:

$$CS = \begin{cases} 1 & \text{— при наличии сервисной службы;} \\ 0 & \text{— при отсутствии сервисной службы.} \end{cases}$$

Еще одним критерием для рассмотрения ППО производителя является наличие у дилера склада запасных частей:

$$Sp = \begin{cases} 1 & \text{— при наличии склада запасных частей;} \\ 0 & \text{— при отсутствии склада запасных частей.} \end{cases}$$

От этого критерия зависит время простоя ППО в ожидании запасных частей в случае аварийной ситуации. Региональный склад (при наличии статистически обоснованного запаса запасных частей) сокращает период простоя ППО в ремонте.

В зависимости от модели ППО будут различные эксплуатационные затраты (Ξ_3):

- на техническое обслуживание (3_{TO});
- на текущие ремонты (3_p).

С экономической точки зрения лучшим вариантом выбора ППО будет тот, при котором соблюдается следующее условие:

$$\Xi_3 = (3_{TO} + 3_p) \rightarrow \min. \quad (18)$$

При появлении на рынке новых моделей ППО возникает ситуация неопределенности по эксплуатационной надёжности и ремонтнопригодности.

Модель выбора ППО представляет собой кортеж следующего вида:

$$M_{\text{ППО}} = \{MK, g, M_i, G_i, G_h, D_i, B_i, Hyd_i, CS, Sp\}.$$

После определения технических параметров ППО решается вопрос выбора варианта финансирования покупки:

$$\Phi П = \{C, 3, Л\}, \quad (19)$$

где C — собственные средства; 3_{cp} — заемные средства; $Л$ — лизинг.

Для решения задачи финансирования (19) необходимо понимание финансовых аспектов деятельности (Φ_d) порта с учетом ограничений (15), (16), (18) и кортежа управляемых переменных:

$$\Phi_d = \{p_i, s_i, d, Z, r_{in}, r_{ext}\}. \quad (20)$$

На кортеж финансовых управляемых переменных оказывают влияние переменные, отражающие техническое состояние ППО:

$$\text{Тех}_{\text{ППО}} = \{N, n, B(t), x_p\}. \quad (21)$$

Выбор ППО является сложной многовекторной задачей, которая решается посредством математического моделирования с учетом эмпирических знаний и опыта лица, принимающего решение.

Обсуждение (Discussion)

Различными специалистами рассматривались выбор ППО и работа порта путем построения моделей, но при этом не учитывались технические характеристики ППО, наличие в регионе сервисной службы и склада запасных частей, что оказывает влияние на время проведения ремонтных работ и простоя ППО в ожидании требуемых запасных частей. При выборе ППО должны учитываться не только технические характеристики, но и стратегия развития порта: если порт работает с одним грузопотоком, то приобретает специализированное ППО, если грузопоток неустойчив, и порт может его диверсифицировать, то приобретает универсальное ППО.

Рассмотрение работы технологической линии порта посредством сетей Петри позволило выявить конфликтные ситуации, которые показали, что возникающие конфликты в процессе эксплуатации технологической линии связаны с парком ППО. Это может быть как производительность, техническое состояние, так и количественный состав ППО. Проектирование посредством сетей Петри и вложенных сетей на этапе проекта могут определить конфликты и найти их решение.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В работе рассмотрена модель функционирования технологической линии при наличии постоянных грузопотока и емкости склада, а также рассчитана необходимая производительность ППО, которая обеспечит расчетную пропускную способность порта.
2. Для обеспечения технологических процессов обработки груза в порту основными параметрами ППО являются: производительность, геометрические размеры, а также возможность использования ППО с различными грузозахватными приспособлениями.
3. Для обеспечения работоспособности ППО детально рассматриваются следующие аспекты: наличие сервисной службы и склада запасных частей у дилера ППО, а также комплектация ППО узлами и механизмами, так как по желанию заказчика на ППО может быть установлено различное оборудование. Это позволит произвести комплектацию ППО, соответствующую условиям эксплуатации при условии соблюдения требований Правил [17].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов А. Л. Моделирование развития портов / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 3–1 (41). — С. 176–182.
2. Ломазова И. А. Вложенные сети Петри: моделирование и анализ распределённых систем с объективной структурой / И. А. Ломазова. — М.: Научный мир, 2004. — 208 с.
3. Дворянский Л. В. Имитационное моделирование и верификация вложенных сетей Петри с использованием CPNTools / Л. В. Дворянский, И. А. Ломазова // Моделирование и анализ информационных систем. — 2012. — Т. 19. — № 5. — С. 115–130.
4. 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.
5. Купцов Н. В. Разработка методики расчета оптимальной производительности морского грузового фронта для терминалов по экспортной перевалке угля на ранних стадиях проектирования / Н. В. Купцов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 925–940. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-925-940.
6. Валькова С. С. Методика оценки склада морского порта методами имитационного моделирования / С. С. Валькова, Ю. И. Васильев // Вестник Государственного университета морского и речного

флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 485–498. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-485-498.

7. Кузнецов А. Л. Разработка методики расчета потребности в ресурсах, необходимых для выполнения складских операций / А. Л. Кузнецов, В. Н. Щербакова-Слюсаренко, Я. Я. Эглит // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 724–734. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-724-734.

8. Рязанов А. Ю. Принципы гармонизации интересов сторон транспортного взаимодействия на основе теории игр / А. Ю. Рязанов // Вестник транспорта Поволжья. — 2009. — № 3 (19). — С. 22–24.

9. Ларин О. Н. Обоснование рациональных параметров погрузочно-разгрузочных комплексов в мультимодальных транспортно-логистических центрах / О. Н. Ларин, З. В. Альметова, Д. К. Шарапов // Инновационный транспорт. — 2014. — № 1 (11). — С. 6–12.

10. Синельщиков Е. В. Вопросы модернизации транспортно-логистической системы порта / Е. В. Синельщиков, М. С. Турпищева // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 1. — С. 127–132. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-1-127-132.

11. Горобец С. Путь к причалу. Новые технологии в портовых терминалах мира / С. Горобец // Склад и техника. — 2007. — № 1. — С. 52–56.

12. Проталинский О. М. Имитационная модель технологических процессов грузового порта / О. М. Проталинский, А. А. Ханова, И. О. Бондарева // Вестник Саратовского технического университета. — 2010. — Т. 4. — № 2 (50). — С. 134–144.

13. Проталинский О. М. Теоретико-множественная модель процессов грузового порта / О. М. Проталинский, А. А. Ханова, И. О. Григорьева // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. — 2009. — № 2. — С. 83–89.

14. Зуб И. В. Пропускная способность контейнерного терминала как функция технологии управления / И. В. Зуб // Высокие технологии, фундаментальные исследования, образование: сборник трудов Седьмой международной научно-практической конференции. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — С. 176–181.

15. Кузнецов А. Л. Влияние технических ограничений перегрузочного оборудования на производительность операций / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, В. П. Левченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 417–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-417-429.

16. Зуб И. В. Критерии выбора сервисной службы транспортного терминала / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2016: материалы Международной научно-практической конференции. 29–30 ноября 2016 г. — СПб.: ИПТ РАН, 2016. — Т. 2. — С. 78–84.

17. Технический регламент Таможенного союза. TP TC 010/2011. О безопасности машин и оборудования. — СПб.: ЦОТПБСППО, 2014. — 60 с.

REFERENCES

1. Kuznetsov, Alexander L., and Alexander V. Galin. "Port development simulation." *Marine intellectual technologies* 3–1(41) (2018): 176–182.
2. Lomazova, I. A. *Vlozhennye seti Petri: modelirovanie i analiz raspredelennykh sistem s ob'ektivnoi strukturoi*. M.: Nauchnyi mir, 2004.
3. Dworzański, L. W., and I. A. Lomazova. "CPN Tools-Assisted Simulation and Verification of Nested Petri Nets." *Automatic Control and Computer Sciences* 47.7 (2013): 393–402. DOI: 10.3103/S0146411613070201.
4. 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.
5. Kuptsov, Nikolay V. "Elaboration of calculation methods for optimum capacity of the marine side of export coal terminals on the early stages of design." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 9.5 (2017): 925–940. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-925-940.
6. Valkova, Svetlana S., and Yurii I. Vasil'ev. "A methodology for assessing the seaport warehouses using the imitation modeling methods." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 485–498. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-485-498.

7. Kuznetsov, Aleksandr L., Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko, and Yan Ya. Eglit. "The assessment of the operational resources needed for warehouse operations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 724–734. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-724-734.
8. Ryazanov, Alexey Yuryevich. "Harmonizing the interests of transport interaction parties based on game theory." *Vestnik transporta Povolzhya* 3(19) (2009): 22–24.
9. Larin, Oleg N., Zlata V. Almetova, and Denis K. Sharapov. "Justification of rational parameters of cargo handling complexes in multimodal transport and logistics centers." *Innotrans* 1(11) (2014): 6–12.
10. Sinelshchikov, Evgeny Vladimirovich, and Marina Semenovna Turpishcheva. "Aspekts of modernization of the transport-logistic system of the port." *Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2019): 127–132. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-1-127-132.
11. Gorobets, S. "Path to the pier. New technologies in the world's port terminals." *Sklad and technic* 1 (2007): 52–56.
12. Protalinsky, O. M., A. A. Khanova, and I. O. Bondareva. "Imitating model of technological processes of cargo port." *Vestnik of Saratov state technical university* 4.2(50) (2010): 134–144.
13. Protalinskiy, Oleg Miroslavovich, Anna Alexeevna Khanova, and Irina Olegovna Grigorieva. "Set-theoretical model of cargo port activity." *Vestnik of Astrakhan state technical university. Series: Management, computer science and informatics* 2 (2009): 83–89.
14. Zub, Igor V. "Capacity of a container terminal as a function of management technology." *High technologies, fundamental research, education: Proceedings of the Seventh international scientific and practical conference*. SPb.: Publishing house of Polytechnical Institute, 2009. 176–181.
15. Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Veronika P. Levchenko. "The influence of container handling equipment technical limitations on the operations productivity." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 417–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-417-429.
16. Zub, I. V., and Y. E. Ezhov. "Criteria for selection of service transport terminal." *Transport in Russia: problems and prospects – 2016. Materials of the International scientific and practical conference*. Vol. 2. SPb.: IPT RAN, 2016. 78–84.
17. *Tekhnicheskii reglament Tamozhennogo soyuza. TR TS 010/2011. O bezopasnosti mashin i oborudovaniya*. SPb.: TsOTPBSPPO, 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зуб Игорь Васильевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: zubiv@gumrf.ru, zubiv@mail.ru
Ежов Юрий Евгеньевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: ezhovye@gumrf.ru
Стенин Николай Николаевич — доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_texp@gumrf.ru, logist_nstenin@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zub, Igor V. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: zubiv@gumrf.ru, zubiv@mail.ru
Ezhov, Yuri E. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: ezhovye@gumrf.ru
Stenin, Nikolay N. — associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_texp@gumrf.ru, logist_nstenin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 9 декабря 2020 г.
Received: December 9, 2020.