

# ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-629-640

EDN CCXMJX

## PROSPECTS FOR THE USE OF ELECTRIC CYLINDERS IN LIFTING AND TRANSPORT EQUIPMENT

**I. V. Zub, Yu. E. Ezhov, N. Yu. Bobyr**

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

*Based on an analysis of scientific publications, this review article substantiates the need to implement effective technologies aimed at reducing greenhouse gas emissions, primarily carbon dioxide, which have a detrimental impact on global climate change. Particular attention is given to the negative environmental effects of lifting and transport equipment and terminal tractors used at large terminals. It is noted that, in this context, terminal operators are increasingly adopting hybrid engines, environmentally friendly fuels, or electrically powered equipment. Evidence is presented that the transition to lifting and transport equipment powered by electric energy sources can not only reduce greenhouse gas emissions during port operations but, due to the simpler mechanical design of electric drives, also improve equipment uptime and lower maintenance costs. In addition to replacing internal combustion engines, it is necessary to modernize hydraulic systems — particularly in reach stackers, which are among the most complex types of handling equipment (the hydraulic systems of reach stackers contain approximately 800 liters of hydraulic fluid). It is proposed to replace hydraulic cylinders, which are the main consumers of hydraulic energy during cargo handling operations, with electric cylinders. These components are comparable in operational loads to hydraulic cylinders; moreover, when internal combustion engines are replaced by battery systems, the total cost of ownership is reduced and positioning accuracy is improved.*

*Keywords: lifting and transport equipment, electric cylinders, hydraulic cylinders, energy efficiency, environmental sustainability, materials handling engineering, hybrid drive, cyclic operation, high-speed performance, positioning accuracy.*

### For citation:

Zub, Igor V., Yu. E. Ezov and N. Yu. Bobyr “Prospects for the use of electric cylinders in lifting and transport equipment.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.5 (2025): 629–640. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-629-640.

**УДК 62–835: 627.352.2**

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЦИЛИНДРОВ ДЛЯ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Зуб И. В., Ежов Ю. Е., Бобырь Н. Ю.**

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

*В обзорной статье на основе анализа научных публикаций дано обоснование необходимости внедрения эффективных технологий, способствующих снижению выбросов парниковых газов, в первую очередь углекислого газа, оказывающих отрицательное влияние на изменение климата на Земле. В частности, обращается внимание на негативное влияние подъемно-транспортного оборудования и терминальных тягачей, используемых на крупных терминалах. Отмечается, что в связи с этим терминальные операторы переходят на гибридные двигатели, экологичные виды топлива или электрическое оборудование. Приведены доказательства того, что переход на использование подъемно-транспортного оборудования, оснащенного электрическими источниками энергии, не только снизит выбросы парниковых газов в атмосферу при работе в порту, но и благодаря более простой механической конструкции электроприводов увеличит время безотказной работы оборудования, а также позволит сократить затраты на его техническое обслуживание.*

Обоснована необходимость кроме замены двигателя внутреннего сгорания, произвести замену элементов гидравлической системы, в частности, на ричстакерах, которые являются наиболее сложными устройствами (объем гидравлической жидкости в гидравлических системах ричстакера составляет порядка 800 л). Предлагается замена гидравлических цилиндров как основных потребителей гидравлической энергии при выполнении погрузочно-разгрузочных работ на электроцилиндры, так как они не отличаются по эксплуатационным нагрузкам от гидравлических цилиндров, и в случае замены двигателей внутреннего сгорания на аккумуляторные батареи снижаются эксплуатационные расходы (стоимость владения), а также обеспечивается точность позиционирования.

**Ключевые слова:** подъемно-транспортное оборудование, электроцилиндры, гидроцилиндры, энергоэффективность, экологичность, подъемно-транспортное машиностроение, гибридный привод, циклическое действие, быстродействие, точность позиционирования.

**Для цитирования:**

Зуб И. В. Перспективы использования электроцилиндров для подъемно-транспортного оборудования / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов, Н. Ю. Бобырь // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 5. — С. 629–640. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-629-640. — EDN CCXMXJX.

### Введение (Introduction)

Снижение выбросов парниковых газов, в первую очередь углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), рассматривается как одно из направлений борьбы с изменением климата на Земле. Модификация подъемно-транспортного оборудования (ПТО), использующего в качестве источника энергии электроэнергию, является актуальной задачей подъемно-транспортного машиностроения. ПТО с электроприводом не только сокращает углеродный след, снижает выбросы  $\text{CO}_2$  на 120 т/год для одного терминала, но и является экономически выгодным: совокупные затраты на электроэнергию оказываются на 40 % ниже, чем расходы на дизельное топливо [1, 2]. Кроме гибридных приводов, используемых в оборудовании циклического действия, применение находит электропривод, обладающий высокой точностью позиционирования и быстродействием. В свою очередь электрические и гибридные приводы заменяют гидравлические приводы [3].

В настоящее время на терминалах находятся в эксплуатации электрофицированные ричстакеры и терминальные тягачи, которые в качестве источников энергии используют аккумуляторные батареи (АКБ). Используемая электроэнергия АКБ практически не выделяет углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) и вызывает интерес к использованию электрофицированного подъемно-транспортного оборудования (ПТО). В качестве АКБ применяют литий-ионные батареи, основными недостатками которых являются снижение емкости в процессе заряда-разряда, длительный процесс заряда, саморазряд при хранении при пониженных температурах, склонность к саморазогреву в результате нарушения температурного режима [4].

Замена источника энергии с дизельного на электрический не снижает экологической безопасности, так как ПТО остаются оборудованными гидравлическими системами, которые являются источником экологических и эксплуатационных рисков и затрат. Утечки гидравлической жидкости, необходимость обслуживания элементов гидравлической системы, а также влияние температуры на вязкость рабочей жидкости снижают надежность оборудования [5].

Замена гидравлического оборудования на электромеханическое происходит во многих производственных областях: станкостроении, горнодобывающем и транспортном оборудовании. Наиболее распространенным электромеханическим приводом является *электроцилиндр* [6–11]. Несмотря на то, что стоимость гидравлических цилиндров ниже чем электроцилиндров, для приведения их в движение необходимо дополнительное оборудование [12, 13]. При работе ричстакера с крупнотоннажными контейнерами гидравлические цилиндры демпфируют пиковые нагрузки, замедляя раскачивание спредера с подвешенным крупнотоннажным контейнером. При проектировании электроцилиндров используются серийно развитые узлы, в то время как при проектировании гидравлических цилиндров существует гораздо большее количество вариантов для конструкторского решения [9].

Целью работы является исследование вопросов анализа и обоснования замены гидравлических цилиндров на электроцилиндры для ПТО на основе имеющихся данных отечественной и зарубежной научно-технической литературы.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Терминальные операторы решают вопросы модернизации ПТО для повышения их экономической эффективности и соответствия экологическим стандартам [14]. Основные затраты в процессе эксплуатации ПТО связаны с техническим обслуживанием и ремонтом (ТО и Р) гидравлических систем и двигателей внутреннего сгорания. Переход на электродвигатели и замена гидроцилиндров на электроцилиндры (рис. 1) позволяют снизить стоимость владения (в частности, расходы на поддержание техники в работоспособном состоянии) за счет сокращения затрат на ТО и Р, сократить вредные выбросы в атмосферу от сгорания дизельного топлива, при этом отпадает необходимость утилизации гидравлического масла [15]. При работе электрофицированного ПТО возможна рекуперация электроэнергии, которая при стандартных условиях работы может увеличить время автономной работы ПТО на 15–20 %. Рекуперация осуществляется при скольжении и при торможении. Низкое энергопотребление снижает эксплуатационные расходы и, соответственно, себестоимость погрузочно-разгрузочных работ.

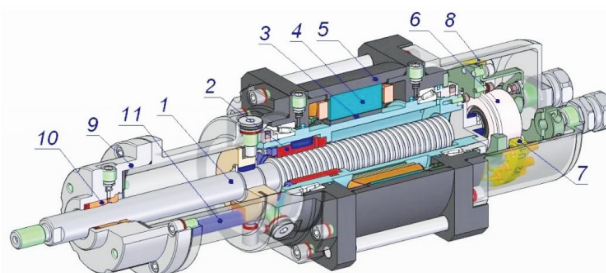


Рис. 1. Устройство электроцилиндра 1 — шток; 2 — гайка; 3 — магнит;

4 — статор встроенного электродвигателя; 5 — наружный корпус;

6 — резольвер (датчик углового положения); 7 — клемма присоединения кабеля силового преобразователя для управления вращением гайки; 8 — клемма присоединения кабеля датчика

углового положения; 9 — крышка штока; 10 — бронзовый подшипник скольжения;

11 — направляющая для предотвращения проворачивания штока

([https://elektromehanicka.narod.ru/HTMLsEN/3\\_4en.html](https://elektromehanicka.narod.ru/HTMLsEN/3_4en.html))

Переход на электромеханическое оборудование представляет собой комплексное решение, сочетающее экологическую безопасность, энергоэффективность и экономическую целесообразность. Однако для успешной реализации таких проектов необходима разработка единых нормативов, регулирующих проектирование и техническую эксплуатацию электроцилиндров [14, 16]. Электроцилиндры, в отличие от гидравлических аналогов, полностью исключают использование нефтепродуктов, что соответствует глобальной тенденции на внедрение «зеленых» технологий. Они обеспечивают высокую точность позиционирования (до 1 мк), низкий уровень шума и вибраций, а также устойчивость к температурным колебаниям — допустимый рабочий температурный диапазон для электроцилиндров от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+100^{\circ}\text{C}$  [8, 16].

Оснащенное электродвигателями ПТО функционирует за счет преобразования электрической энергии в механическое движение. Электроэнергия для заряда ПТО рассчитывается по формуле [17]:

$$N_{\text{ср}} = \frac{\Theta_{\text{АБ}}}{(1 - \Delta\Theta_{\text{СН}})(1 - \Delta\Theta_{\text{сети}})(1 - \Delta\Theta_{\text{АБ}})T_{\text{г}}}, \quad (1)$$

где  $\Theta_{\text{АБ}}$  — годовая энергия заряда аккумуляторных батарей электротранспорта;  $T_{\text{г}}$  — число часов в году;  $\Delta\Theta_{\text{АБ}}$  — потери электроэнергии на электрозаправочной станции;  $\Delta\Theta_{\text{сети}}$  — потери электроэнергии при передаче в электрических сетях;  $\Delta\Theta_{\text{СН}}$  — расход электроэнергии на собственные нужды электростанции.

Анализ российских [10, 16, 18–22] и зарубежных [1, 2, 23–27] источников показал преимущества электроцилиндров по сравнению с гидроцилиндрами. Электроцилиндр оснащен преобразователем, который служит в качестве датчика скорости и положения. Нарботка на отказ электроцилиндров составляет 70–200 тыс. ч (8–25 лет) при минимальных требованиях к техническому обслуживанию. Скорость выдвижения штока составляет до 1,5 м/с, при усилии до 1000 кН (100 т) ход штока составляет до 9 м. Важной особенностью электроцилиндров является точность позиционирования, которая составляет единицы микрон, а КПД электроцилиндра — более 85 % (порядка 90 %). При изменении нагрузки изменяется потребление тока. При постоянной нагрузке потребление электроэнергии ПТО минимальное [18].

Срок службы электроцилиндра ( $L_n$ ) зависит от нагрузки и циклов перемещения:

$$L_n = \frac{L}{60n_m}, \quad (2)$$

где  $n_m$  — средняя скорость вращения [мин<sup>-1</sup>];  $L$  — срок службы электроцилиндра, об.

Срок службы электроцилиндра  $L$ , об., определяется в виде

$$L = \left( \frac{C}{1,1F} \right)^3 10^6, \quad (3)$$

где  $C$  — номинальная динамическая нагрузка [Н], которая зависит от модели электроцилиндра.

Средняя нагрузка  $F$ , Н, определяется по формуле

$$F = \sqrt[3]{F_1^3 \frac{q_1}{100} + F_2^3 \frac{q_2}{100} + \dots + F_n^3 \frac{q_n}{100}}, \quad (4)$$

где  $F_1$ – $F_n$  — усилие подачи при перемещении электроцилиндра [Н];  $q_1$ – $q_n$  — доля времени в процентах от общего времени погрузочно-разгрузочных работ.

На ричстакерах объем гидравлической жидкости в среднем составляет 800 л в зависимости от модели ричстакера. Гидравлическая система, несмотря на проверенную временем надежность, требует регулярной замены масла в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя, через 2000 мото-ч. В среднем в течение года происходит две замены контроля качества гидравлической жидкости и ремонта элементов, что увеличивает эксплуатационные расходы на 20–30 % [28, 29].

Отработанную гидравлическую жидкость необходимо утилизировать. На отказы гидравлической системы ПТО по статистике приходится 40 %. Главным преимуществом электрических систем является их автономность. В отличие от гидравлики, где рабочая жидкость требует регулярной замены и утилизации, электроцилиндры используют только электроэнергию, которая может быть получена из возобновляемых источников. Это позволяет не только снизить зависимость от природных ресурсов, но и минимизировать риски загрязнения окружающей среды на всех этапах жизненного цикла оборудования.

Электромеханический цилиндр представляет собой линейный механический привод, состоящий из двух частей: серводвигателя и датчика обратной связи, в котором использована роliko-винтовая или шарико-винтовая передача [13] (рис. 2). Принцип работы устройства заключается в преобразовании вращательного движения электродвигателя в поступательное перемещение штока.

Шарико-винтовая передача (ШВП) по своим характеристикам уступает роliko-винтовой передаче (РВП), так как шарики контактируют друг с другом, что вызывает паразитное трение, их износ и нагрев. При частоте вращения 1000 мин<sup>-1</sup> возникает вибрация. Еще одним недостатком ШВП является непригодность к пиковым нагрузкам и проведению мероприятий по техническому обслуживанию. Планетарная РВП, как и ШВП, является передачей *винт – гайка*. Контактная поверхность планетарных роlikов РВП при работе в 15 раз больше, они передают усилия, бо́льшие,



чем в ШВП. Такие электроцилиндры обладают высоким КПД и точностью позиционирования 0,1 мм [6, 7, 13].

Управление электродвигателем осуществляется частотным преобразователем, обеспечивающим регулирование скорости вращения вала, что, в свою очередь, определяет скорость перемещения штока цилиндра. В конструкции электроцилиндров предусмотрены дисковые тормоза с электромагнитным приводом [1], обеспечивающие дополнительную безопасность и надежность системы.

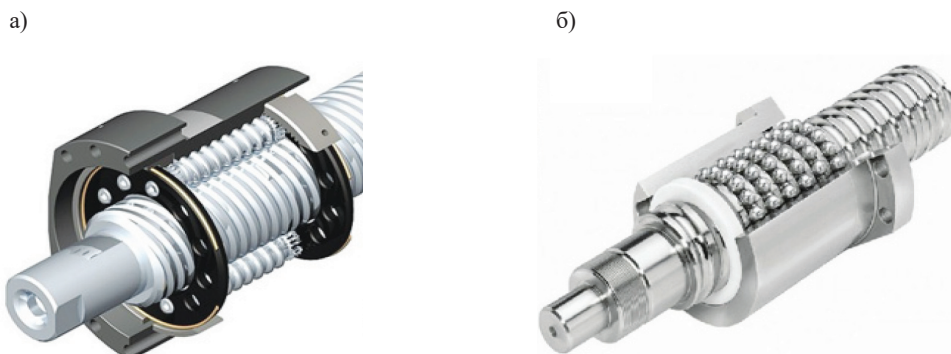


Рис. 2. Электромеханический привод:  
а — ролик-винтовая передача; б — шарико-винтовая передача

Сравнивать электро- и гидроцилиндры можно только в случае их идентичных технических характеристик, к которым относится развиваемое усилие  $F$ , скорость движения  $S$ , точность позиционирования  $\Pi_t$ . При выборе электро- или гидроцилиндра будет использован критерий выбора  $k_b$ , отвечающий следующим условиям:

$$k_b = \begin{cases} F \rightarrow \max; \\ S \rightarrow \max; \\ \Pi_t \rightarrow 10^{-6} \text{ м.} \end{cases} \quad (5)$$

Основные преимущества электроцилиндров по сравнению с гидроцилиндрами заключаются в следующем:

- высокая точность позиционирования штока, что важно для управления процессами погрузочно-разгрузочных работ;
- эксплуатация в диапазоне температур от  $-40^\circ\text{C}$  до  $+100^\circ\text{C}$ ;
- одинаковые скорости перемещения на втягивание и выдвигание штока ввиду отсутствия различий в площадях штоковой и поршневой полостей;
- отсутствие утечки гидравлической жидкости, что положительно сказывается на экологической безопасности.

### Результаты (Results)

Для анализа эффективности замены гидравлических цилиндров на электроцилиндры рассмотрим электрический ричстакер грузоподъемностью 45 т (рис. 3). Для полной замены гидравлических элементов на электроприводы необходимо модернизировать все компоненты ричстакера. В базовой версии работу гидравлической системы ричстакера обеспечивают следующие гидравлические элементы, которые можно заменить на электрические эквиваленты:

1. Два гидромотора поворота спредера  $\delta$ .
2. Гидроусилитель руля [30].
3. Гидроцилиндры:
  - два гидроцилиндра подъема стрелы  $I$ ;
  - два гидроцилиндра наклона спредера (демпферная система успокоения колебаний спредера);

- гидроцилиндр выдвижения стрелы 6;
- гидроцилиндр двойного действия 7 (рулевой гидроцилиндр);
- два гидроцилиндра поворота штыков;
- два гидроцилиндра позиционирования спредера 9;
- два гидроцилиндра выдвижения телескопических секций (лап) спредера.

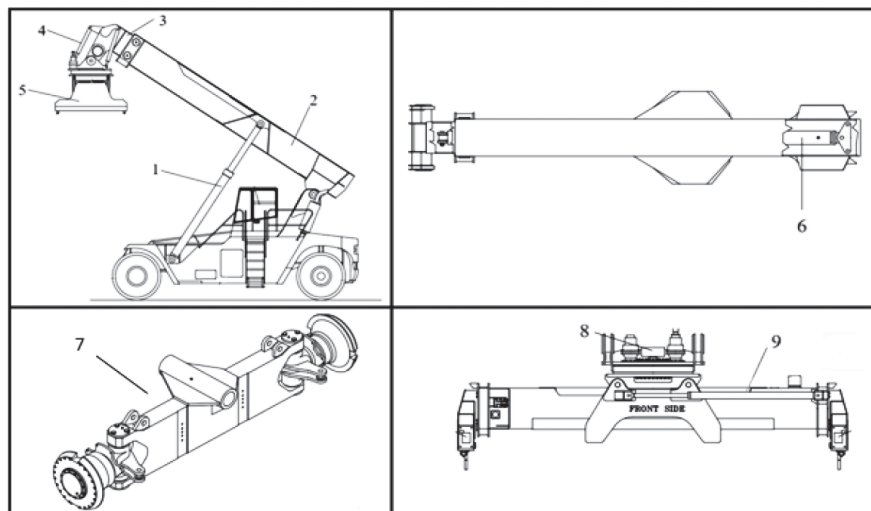


Рис. 3. Общий вид ричстакера и узлов гидросистемы с указанием его гидроцилиндров:  
1 — гидроцилиндры подъема стрелы; 2 — первая секция телескопической стрелы;  
3 — вторая секция телескопической стрелы; 4 — гидроцилиндры наклона спредера;  
5 — спредер; 6 — гидроцилиндр выдвижения стрелы; 7 — гидроцилиндр двойного действия  
(рулевой гидроцилиндр); 8 — гидромотор редуктора поворота спредера;  
9 — гидроцилиндры позиционирования спредера  
(<https://xcmg-rf.ru/product/richstaker-xcmg-xcs453le3>)

Гидроцилиндры наклона спредера 4 (см. рис. 3) выполняют роль демпфера — гасят колебания спредера при транспортировке крупнотоннажного контейнера. При наведении спредера для захвата контейнера, поверхность которого не имеет параллельности с горизонтом, гидроцилиндры наклона спредера обеспечивают необходимую степень свободы для наклона спредера на требуемый для захвата контейнера угол. При замене гидроцилиндров наклона на электроцилиндры без дополнительно оборудования спредер не будет обладать необходимой эксплуатационной гибкостью, что вызовет снижение скорости обслуживания транспортных средств. Для устранения этого недостатка электроцилиндры оборудованы лазерными датчиками [31, 32], установленными на спредере и определяющими расстояние до поверхности контейнера. При наличии разности расстояний подается сигнал на электроцилиндры, которые обеспечивают горизонтальное положение спредера относительно поверхности контейнера. В этом случае на паре штыков внешней или внутренней стороны спредера будет увеличенная нагрузка. На штыки устанавливаются датчики нагрузки, от которых сигнал поступает в систему управления электроцилиндрами наклона, спредер возвращается в горизонтальное положение, и нагрузка от контейнера равномерно распределяется между штыками.

При замене двенадцати гидроцилиндров практически все они парные. Для замены гидравлических цилиндров необходимы электроцилиндры с различным развиваемым усилием и длиной выдвижения штока. Начальная стоимость таких электроцилиндров будет выше стоимости гидравлических цилиндров, но дальнейшая эксплуатация окупит начальные вложения. Проблемы возникнут при модернизации системы управления, поскольку на рулевом мосту установлен гидроцилиндр двойного действия, для замены которого необходимы конструктивные изменения.

За один час работы гидравлическая система ричстакера расходует 70 % на рабочие операции подъем / опускание и выдвижение / втягивание стрелы. Остальное время идет на поддержание рабочего давления, требующего 15 % пиковой мощности насоса.

Мощность гидравлического насоса  $N_n$  в кВт определяется по формуле

$$N_n = \frac{Qp}{612\eta}, \quad (6)$$

где  $Q$  — подача масла, л/мин;  $p$  — рабочее давление, бар; 612 — переводной коэффициент;  $\eta$  — КПД насоса.

Следовательно, среднее потребление в час электроэнергии в кВт для всех насосов ричстакера:

$$N_{HP} = \sum_1^n (N_n \alpha + N_n^2 + N_n \nu), \quad (7)$$

где  $n$  — количество насосов,  $n = 3$ ;  $\alpha$  — время, затраченное на рабочие операции;  $\beta$  — время, затраченное на поддержание рабочего давления в гидравлической системе;  $\nu$  — время работы насосов для поддержания рабочего давления.

Общее потребление гидравлической системы в кВт:

$$N_{GC} = N_{HP} + N_{г.р} + N_{спр}, \quad (8)$$

где  $N_{г.р}$  — энергопотребление гидроусилителя руля, кВт;  $N_{спр}$  — энергопотребление гидроцилиндров выдвижения спредера и гидромотора редуктора поворота спредера, кВт.

Мощность в кВт для электроцилиндров:

$$N_{э} = \frac{M\omega}{9550\eta}, \quad (9)$$

где  $M$  — требуемый момент при максимальной нагрузке, Н;  $\omega$  — скорость вращения двигателя, об/мин; 9550 — переводной коэффициент;  $\eta$  — КПД.

Следовательно, среднее потребление в час электроэнергии для всех электроцилиндров  $N_{эц}$  в кВт:

$$N_{эц} = \sum_1^n (P_{э} \alpha), \quad (10)$$

где  $n$  — количество электроцилиндров;  $\alpha$  — коэффициент времени, затраченного на рабочие операции.

Общее потребление электроэнергии электрической системы ричстакера  $N_{эс}$  в кВт:

$$N_{эс} = N_{эц} + N_{э.р} + N_{спр}, \quad (11)$$

где  $N_{э.р}$  — энергопотребление электроусилителя руля, кВт;  $N_{спр}$  — энергопотребление электроцилиндров выдвижения и электромотора редуктора поворота спредера, кВт.

Электрические цилиндры одновременно могут управлять положением, задавать ускорение штока, точно устанавливая величину усилия. По сравнению с гидравлическими цилиндрами в электрических больший КПД, так как исключена постоянная работа гидравлического насоса, который имеет привод от двигателя внутреннего сгорания. Это снижает выбросы выхлопных газов в атмосферу, вибрацию и шум, исключая тем самым вредные воздействия на оператора ричстакера.

### Заключение (Conclusion)

Электромеханический привод имеет возможность интеграции в автоматизированные системы управления, что является особенно актуальным в условиях современной экономики, процессов импортозамещения и повышения требований к качеству погрузочно-разгрузочных работ [16]. Внедрение таких решений на терминалах позволит не только оптимизировать погрузочно-разгрузочные процессы, но и обеспечить конкурентоспособность терминала, способствуя его устойчивому развитию и достижению стабильных финансовых результатов за счет снижения эксплуатационных расходов.

На основе результатов проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- электроцилиндры представляют собой наиболее перспективную, экономичную и надежную альтернативу гидравлическим цилиндрам.
- для обеспечения эффективного проектирования и выбора рабочих параметров электроцилиндров для ПТО необходим единый нормативный документ, учитывающий особенности эксплуатации;
- использование электроцилиндров позволит снизить эксплуатационные затраты, компенсирующие высокую начальную стоимость.

В свою очередь, гидравлический цилиндр имеет ряд преимуществ по сравнению с электрическим, в частности по номинальной тяге. При установке гидроаккумулятора поглощается пульсирующее гидравлическое давление и обеспечивается высокая мощность гидравлического цилиндра, он обладает демпфирующими свойствами, конструктивно прост, что положительно отражается на его первоначальной стоимости.

Использование электроцилиндров без соответствующих технических характеристик, установленных в едином нормативном документе, может привести к негативным последствиям. При этом современные достижения в области быстродействующей электроники и снижение ее стоимости позволяют решить данную проблему. Однако для оптимизации проектирования и выбора рабочих параметров электроцилиндров необходим единый нормативный документ, который позволит минимизировать финансовые и временные затраты, а также повысить уровень безопасности ПТО.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев В. К.* Перспективы перехода эксплуатации от дизельных ричстакеров к электрическим ричстакерам / В. К. Васильев // Развитие инфраструктуры внутреннего водного транспорта: традиции, инновации (РИВВТ-2023): сборник трудов межвузовской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 05 декабря 2023 года. — Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2024. — С. 73–77. — EDN EZRFJC.
2. *Zeng Y.* Analysis of Carbon Emission Reduction at the Port of Integrated Logistics: The Port of Shanghai Case Study / Y. Zeng, X. Yuan, B. Hou // Sustainability. — 2023. — Vol. 15. — Is. 14. DOI: 10.3390/su151410914.
3. *Карамгужинова А. Е.* Анализ перспективы развития мехатронных систем на примере электрогидроцилиндра повышенной эффективности / А. Е. Карамгужинова, В. Н. Кузнецова, В. В. Савинкин, Д. А. Коптяев // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. — 2020. — Т. 17. — № 1(71). — С. 22–31. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-22-31. — EDN SOUIAI.
4. *Козлов А. В.* Оценка жизненного цикла силовых установок на аккумуляторной батарее, водородных топливных элементах, двигателе внутреннего сгорания для городских автобусов в условиях московского региона / А. В. Козлов, А. В. Порсин, Ю. А. Добровольский [и др.] // Журнал прикладной химии. — 2021. — Т. 94. — № 6. — С. 784–804. DOI: 10.31857/S004446182106013X. — EDN RLJNAW.
5. *Ланин А. П.* Опасное и вредное воздействие нефти и нефтепродуктов на окружающую среду / А. П. Ланин, А. Н. Новиков, А. В. Глухов, Р. Р. Садыков // Мир транспорта и технологических машин. — 2009. — № 1(24). — С. 98–106. — EDN TELAAP.
6. *Архипенко В. С.* Сравнительные характеристики электромеханических и гидравлических цилиндров / В. С. Архипенко, В. А. Жукова // Современные проблемы машиностроения: Труды XII Международной научно-технической конференции, Томск, 28 октября — 01 2019 года — Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет. — 2019. — С. 362–365. — EDN XPYFCH.
7. *Дунаев В. И.* Определение точек контакта резьбовых деталей планетарной роликвинтовой передачи / В. И. Дунаев, И. М. Егоров, И. А. Тулькова [и др.] // Наука и бизнес: пути развития. — 2015. — № 11(53). — С. 15–22. — EDN VJOCHB.
8. *Липчанская Ю. Г.* Электроцилиндры — альтернатива гидроприводу / Ю. Г. Липчанская // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова, посвященная 160-летию со дня рождения В. Г. Шухова, Белгород, 01–20 мая 2013 года. — Белгород: шухова, 2013. — С. 1182–1187. — EDN SJHKN.



9. Наупарац Д. Сравнение электрических и гидроцилиндров: применение приводов движения гидро-механического оборудования на плотинах и судоходных шлюзах / Д. Наупарац // Гидротехника. — 2021. — № 3(64). — С. 11–14. — EDN YHTBJX.

10. Несмиянов И. А. Перспективы использования электроцилиндров в погрузчиках / И. А. Несмиянов, М. Е. Николаев, Е. Н. Захаров, Н. В. Карева // Сельский механизатор. — 2019. — № 7. — С. 28–29. — EDN VNXXMH.

11. Ряховский О. А. Планетарный роliko-винтовой механизм преобразования вращательного движения в поступательное, выполненный по «перевернутой» схеме / О. А. Ряховский, А. Н. Воробьев, А. С. Марохин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2013. — № 9. — С. 44–48. — EDN RCDDXL.

12. Ивлев В. И. Сравнительные технико-экономические характеристики пневматических и электрических приводов / В. И. Ивлев // Гидравлика. — 2023. — № 20. — С. 21–35. — EDN QKAKQS.

13. Измайлов А. Ю. Электромеханическая альтернатива гидравлическому и пневматическому приводу / А. Ю. Измайлов, А. Ф. Жук, В. А. Жук // Сельскохозяйственные машины и технологии. — 2009. — № 3. — С. 9–13. — EDN KDNDLJ.

14. Зуб И. В. Современные требования к правилам технической эксплуатации портового перегрузочного оборудования / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов, В. А. Сидоренко // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1152–1161. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1152-1161. — EDN YYEIUH.

15. Крупнов П. А. Исследование применения альтернативных двигателей для портовой перегрузочной техники / П. А. Крупнов, И. О. Огнев // Транспортное дело России. — 2019. — № 4. — С. 114–117. — EDN OKBRRV.

16. Петрова М. В. Модернизация системы автоматического управления электроцилиндрами / М. В. Петрова, И. А. Васильев // Вузовская наука в современных условиях: сборник материалов 57-й научно-технической конференции, Ульяновск, 23–28 января 2023 года. Том Часть 1. — Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2023. — С. 157–159. — EDN LHBGGW.

17. Гашо Е. Приоритеты энергоперехода на транспорте: электротяга или повышение экологического класса углеводородного топлива? / Е. Гашо, С. Белобородов, А. Ненашев // Энергетическая политика. — 2024. — № 1(192). — С. 58–69. DOI: 10.46920/2409-5516\_2024\_1192\_58. — EDN HIVEBJ.

18. Гаджиалиева И. В. Применение современных электроцилиндров в управлении оборудованием гидроэнергетики / И. В. Гаджиалиева, А. М. Любичкий, М. В. Любичкий [и др.] // Sciences of Europe. — 2021. — № 69–1(69). — С. 61–64. DOI: 10.24412/3162-2364-2021-69-1-61-64. — EDN YVSVHF.

19. Гладышев Г. Замена гидравлики на электромеханику: зачем и как это делают. Часть 1 / Г. Гладышев // Control Engineering Россия. — 2021. — № 4(94). — С. 40–44. — EDN FBTTIM.

20. Гладышев Г. Замена гидравлики на электромеханику: зачем и как это делают. Часть 2 / Г. Гладышев // Control Engineering Россия. — 2021. — № 5(95). — С. 36–40. — EDN UDHJIK.

21. Максименко А. Н. Определение основных выходных параметров гидрофицированных строительных и дорожных машин на этапе эксплуатации их жизненного цикла / А. Н. Максименко, Е. В. Заровчатская, С. В. Масловская // Наука и техника. — 2014. — № 5. — С. 60–66. — EDN SYNDZL.

22. Саушев А. В. Электроцилиндр как перспективный тип электромеханического привода основных двустворчатых ворот судоходных шлюзов России / А. В. Саушев, А. А. Темкин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 628–637. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-628-637. — EDN JTZKLM.

23. Lee S-U. Control of a heavy-duty robotic excavator using time delay control with integral sliding surface / S-U. Lee, P. H. Chang // Control Engineering Practice. — 2002. — Vol. 10. — Is. 7. — Pp. 697–711. DOI: 10.1016/S0967-0661(02)00027-8.

24. Mirza J. Joint seals for hydraulic structures in severe climates / J. Mirza // Journal of Civil Engineering and Management. — 2014. — Vol. 20. — Is. 1. — Pp. 38–46. DOI: 10.3846/13923730.2013.799092.

25. Rankka A. Procedure of developing more energy efficient and electrified hydraulic systems for loader cranes / A. Rankka, A. Dell'Amico // Frontiers in Mechanical Engineering. — 2024. — Vol. 10–2024. DOI: 10.3389/fmech.2024.1494642.

26. Romero-Abad D. The electric potential of an infinite conducting cylinder with an n-cusped hypocycloidal cross-section / D. Romero-Abad, R. Suárez-Córdova // European Journal of Physics. — 2022. — Vol. 43. — Is. 3. — Pp. 035205. DOI: 10.1088/1361-6404/ac5e7e.

27. Zhou J. Analytical and experimental research on stability of large slenderness ratio horizontal hydraulic hoist / J. Zhou, D. W. Shi, Z. L. Sun, T. Bi, X. H. Cheng, D. Chen, Y. Lu // *Advances in Mechanical Engineering*. — 2018. — Vol. 10. — Is. 10. — Pp. 1687814018803472. DOI: 10.1177/1687814018803472.

28. Виноградов Д. Н. Основные проблемы в гидравлических системах и их влияние на работу оборудования / Д. Н. Виноградов, Я. Д. Высоцкий, Е. Ю. Мирошник, Е. И. Мальцева // *Сибирская деревня: 70 лет с начала освоения целинных и залежных земель в России: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию с начала освоения целинных и залежных земель в России, Омск, 06 июня 2024 года*. — Омск: Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина, 2024. — С. 488–491. — EDN NFBSNH.

29. Гаврюшенко Я. В. Условия эксплуатации и техническое обслуживание гидравлических систем / Я. В. Гаврюшенко // *Актуальные аспекты развития воздушного транспорта (Авиатранс-2019): Материалы международной научно-практической конференции, приуроченной к 50-летию со дня основания Ростовского филиала МГТУ ГА. В двух томах, Ростов-на-Дону, 21–23 июня 2019 года. Том 2*. — Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью «Фонд науки и образования», 2019. — С. 687–692. — EDN HVNHZA.

30. Пахомин С. А. Электропривод рулевого механизма / С. А. Пахомин, Л. С. Пахомин, А. А. Лазарев // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. — 2017. — № 4(196). — С. 53–56. DOI: 10.17213/0321-2653-2017-4-53-56. — EDN ZWHBYR.

31. Щемелев В. Л. Автоматизация работы спредера при обработке крупнотоннажных контейнеров в условиях крена и дифферента судна / В. Л. Щемелев, И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2023. — № 2. — С. 101–107. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-2-101-107. — EDN AYVDGS.

32. Щемелев В. Л. Алгоритм обучения спредера с возможностью стабилизации для совершенствования технологии перегрузки контейнеров в условиях крена и дифферента судна / В. Л. Щемелев, И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов // *Транспортное дело России*. — 2023. — № 4. — С. 223–227. DOI: 10.52375/20728689\_2023\_4\_223. — EDN UNHPJD.

## REFERENCES

1. Vasil'ev, V. K. "Prospects for the transition from diesel-powered reachstackers to the operation of electric versions." *Razvitie infrastruktury vnutrennego vodnogo transporta: traditsii, innovatsii (RIVVT-2023): Sbornik trudov mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, Sankt-Peterburg, 05 dekabrya 2023 goda*. Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova, 2024: 73–77.

2. Zeng, Y., X. Yuan and B. Hou. "Analysis of Carbon Emission Reduction at the Port of Integrated Logistics: The Port of Shanghai Case Study." *Sustainability* 15.14 (2023). DOI: 10.3390/su151410914.

3. Karamguzhinova, A. E., V. N. Kuznetsova, V. V. Savinkin and D. A. Koptyaev. "Electrohydrocylinder of increased efficiency: prospects for the development of mechatronic systems." *The Russian Automobile And Highway Industry Journal* 17.1(71) (2020): 22–31. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-1-22-31.

4. Kozlov, A. V., A. V. Porsin and Yu. A. Dobrovol'skiy et al. "Life cycle assesment of powertrains based on a battery, hydrogen fuel cells, and internal combustion engine for urban buses under the conditions of moscow oblast." *Zhurnal Prikladnoi Khimii* 94.6 (2021): 784–804. DOI: 10.31857/S004446182106013X.

5. Lanin, A. P., A. N. Novikov, A. V. Glukhov and R. R. Sadykov. "Opasnoe i vrednoe vozdeystvie nefiti i nefteproduktov na okruzhayushchuyu sredu." *World Of Transport And Technological Machines* 1(24) (2009): 98–106.

6. Arkhipenko, V. S. and V. A. Zhukova. "Sravnitel'nye kharakteristiki elektromekhanicheskikh i gidravlicheskikh tsilindrov." *Sovremennye problemy mashinostroeniya: Trudy XII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Tomsk, 28 oktyabrya — 01 2019 goda* Tomsk: Natsional'nyy issledovatel'skiy Tomskiy politekhnicheskii universitet, 2019: 362–365.

7. Dunaev, V. I., I. M. Egorov and I. A. Tul'kova et al. "Determination of contact points of epicyclic roller drive threaded parts." *Science And Business: Ways Of Development* 11(53) (2015): 15–22.

8. Lipchanskaya, Yu. G. "Elektrotsilindry — al'ternativa gidroprivodu." *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh BGTU im. V. G. Shukhova, posvyaschennaya 160-letiyu so dnya rozhdeniya V. G. Shukhova, Belgorod, 01–20 maya 2013 goda*. Belgorod: shukhova, 2013: 1182–1187.

9. Nauparats, D. "Comparison of electric and hydraulic cylinders-application of motion drives for hydro-mechanical equipment on dams and navigation locks." *Gidrotekhnika* 3(64) (2021): 11–14.
10. Nesmiyanov, I. A., M. E. Nikolaev, E. N. Zakharov and N. V. Kareva. "Prospects for the use of electric cylinders in loaders." *Sel'skiy mekhanizator* 7 (2019): 28–29.
11. Ryakhovskiy, O. A., A. N. Vorob'ev and A. S. Marokhin. "An inverted planetary roller screw mechanism for converting rotary motion into linear." *Bmstu Journal Of Mechanical Engineering* 9 (2013): 44–48.
12. Ivlev, V. I. "Comparative technical and economic characteristics of pneumatic and electric actuators." *Gidravlika* 20 (2023): 21–35.
13. Izmaylov, A. Yu., A. F. Zhuk and V. A. Zhuk. "Elektromekhanicheskaya al'ternativa gidravlicheskomu i pnevmaticheskemu privodu." *Agricultural Machinery And Technologies* 3 (2009): 9–13.
14. Zub, I. V., Yu. E. Ezhov and V. A. Sidorenko. "Modern requirements to the rules of technical operation of port handling equipment." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1152–1161. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1152-1161.
15. Krupnov, P. A. and I. O. Ognev. "Research of application of alternative engines for port transshipment equipment." *Transport Business Of Russia* 4 (2019): 114–117.
16. Petrova, M. V. and I. A. Vasil'ev. «Modernizatsiya sistemy avtomaticheskogo upravleniya elektrotsilindrami.» *Vuzovskaya nauka v sovremennykh usloviyakh: sbornik materialov 57-y nauchno-tehnicheskoy konferentsii, Ul'yanovsk, 23–28 yanvarya 2023 goda. Tom Chast' I.* Ul'yanovsk: Ul'yanovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2023: 157–159.
17. Gasho, E., S. Beloborodov and A. Nenashev. "Priorities of energy consumption in transport: electric traction or an increase in the ecological class of hydrocarbon fuels?" *Energy Policy* 1(192) (2024): 58–69. DOI: 10.469 20/2409-5516\_2024\_1192\_58.
18. Gadzhialieva, I. V., A. M. Lyubitskiy and M. V. Lyubitskiy et al. "Application of modern electric cylinders in the management of hydropower equipment." *Sciences Of Europe* 69–1(69) (2021): 61–64. DOI: 10.24412/3162-2 364-2021-69-1-61-64.
19. Gladyshev, G. "Zamena gidravliki na elektromekhaniku: zachem i kak eto delayut. Chast' 1." *Control Engineering Rossiya* 4(94) (2021): 40–44.
20. Gladyshev, G. "Zamena gidravliki na elektromekhaniku: zachem i kak eto delayut. Chast' 2." *Control Engineering Rossiya* 5(95) (2021): 36–40.
21. Maksimenko, A. N., E. V. Zarovchatskaya and S. V. Maslovskaya. "Determination of main output parameters for hydroficated construction and road-building machines at operational stage of their life cycle ." *Science And Technique* 5 (2014): 60–66.
22. Saushev, A. V. and A. A. Temkin. "Electric cylinder as a promising type of electromechanical drive of the main double-leaf gates of shipping locks in russia." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 14.4 (2022): 628–637. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-628-637.
23. Lee, S-U. and P. H. Chang. "Control of a heavy-duty robotic excavator using time delay control with integral sliding surface." *Control Engineering Practice* 10.7 (2002): 697–711. DOI: 10.1016/S0967-0661(02)00027-8.
24. Mirza J. "Joint seals for hydraulic structures in severe climates." *Journal of Civil Engineering and Management* 20.1 (2014): 38–46. DOI: 10.3846/13923730.2013.799092.
25. Rankka, A. and A. Dell'Amico. "Procedure of developing more energy efficient and electrified hydraulic systems for loader cranes." *Frontiers in Mechanical Engineering* 10–2024 (2024). DOI: 10.3389/fmech.2024.1494642.
26. Romero-Abad, D. and R. Suárez-Córdova. "The electric potential of an infinite conducting cylinder with an n-cusped hypocycloidal cross-section." *European Journal of Physics* 43.3 (2022): 035205. DOI: 10.1088/1361-6404/ac5e7e.
27. Zhou, J., Y. Lu, et al. "Analytical and experimental research on stability of large slenderness ratio horizontal hydraulic hoist." *Advances in Mechanical Engineering* 10.10 (2018): 1687814018803472. DOI: 10.1177/1687814018803472.
28. Vinogradov, D. N., Ya. D. Vysotskiy, E. Yu. Miroshnik and E. I. Mal'tseva. "Main problems in hydraulic systems and their impact on equipment operation." *Sibirskaya derevnya: 70 let s nachala osvoeniya tselinnykh i zaleznykh zemel' v Rossii: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyaschennoy 70-letiyu s nachala osvoeniya tselinnykh i zaleznykh zemel' v Rossii, Omsk, 06 iyunya 2024 goda.* Omsk: Omskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet im. P. A. Stolypina, 2024: 488–491.
29. Gavryushenko, Ya. V. "Usloviya ekspluatatsii i tekhnicheskoe obsluzhivanie gidravlicheskikh sistem." *Aktual'nye aspekty razvitiya vozdušnogo transporta (Aviatrans- 2019): Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, priurochennoy k 50-letiyu so dnya osnovaniya Rostovskogo filiala MGTU GA.*

*V 2-kh tomakh, Rostov-na-Donu, 21–23 iyunya 2019 goda. Tom 2.* Rostov-na-Donu: Obschestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu «Fond nauki i obrazovaniya», 2019: 687–692.

30. Pakhomin, S. A., L. S. Pakhomin and A. A. Lazarev. “Electric drive of the steering mechanism.” *Bulletin Of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences* 4(196) (2017): 53–56. DOI: 10.17213/0321-2653-2017-4-53-56.

31. Schemelev, V. L., I. V. Zub and Yu. E. Ezhov. “Automation of spreader operation in handling large size containers at ship’s list and trim.” *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering And Technologies* 2 (2023): 101–107. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-2-101-107.

32. Schemelev, V. L., I. V. Zub and Yu. E. Ezhov. “Spreader learning algorithm with the possibility of stabilization to improve the technology of container handling in conditions of roll and trim of the ship.” *Transport Business Of Russia* 4 (2023): 223–227. DOI: 10.52375/20728689\_2023\_4\_223.

#### 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](mailto:zubiv@gumrf.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](mailto:ezhovye@gumrf.ru)

**Бобырь Николай Юрьевич** — инженер

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [nik14845@mail.ru](mailto:nik14845@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](mailto:zubiv@gumrf.ru)

**Ezhov, Yurii 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](mailto:ezhovye@gumrf.ru)

**Bobyry' Nikolaj Yu.** — engineer

Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [nik14845@mail.ru](mailto:nik14845@mail.ru)

*Статья поступила в редакцию 03 июля 2025 г.*

*Received: July 03, 2025.*