

PARAMETRIC OPTIMIZATION OF STRUCTURAL ELEMENTS OF PORT HANDLING MACHINES

D. V. Dmitrienko

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

A method of parametric optimization of structural elements of the port handling equipment on the example of the unit moving cylinder. Power elements hydraulic and pneumatic movable cylinders serving to provide a reciprocating motion of the slide, widely used for water transport. Their technical condition largely determines the reliability and reliability of port cargo handling equipment, actuators of the valves gate gateway and other equipment. The power cylinders are the most expensive elements of reloading machines. To increase the reliability of their work possible, first of all, a decrease in maximum (peak) load value throughout the range of motion of the RAM. In terms of practical optimization is to solve the minimax problem, consisting in determining the maximum (peak) values of loads with variation of operating modes and then select from them the mode with minimum amplitude. The proposed numerical method of optimization, the developed model and established program codes in MatLAB to obtain numerical estimates. It is shown that the model possesses the property of forming host where the generated operating modes, the coordinates of which correspond to the minimax amplitude efforts in the slider. An example of a method of parametric optimization, confirming the correctness of the solutions.

Keywords: parametric optimization, handling machine, a movable cylinder, minimax, unimodality, model, technological limitations, reliability, design, mode selection, node, quantification.

For citation:

Dmitrienko, Dmitry V. "Parametric optimization of structural elements of port handling machines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 655–662. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-655-662.

УДК 681.5

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПОРТОВЫХ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ МАШИН

Д. В. Дмитриенко

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

Рассматривается способ параметрической оптимизации элементов конструкций портовой перегрузочной техники на примере механизма с подвижным цилиндром. Силовые элементы с гидравлическими и пневматическими подвижными цилиндрами, служащими для обеспечения возвратно-поступательного движения ползуна, широко применяются на водном транспорте. Их техническое состояние во многом определяет надежность и безаварийность работы портового перегрузочного оборудования, приводов створок ворот шлюзов и другого оборудования. Силовые цилиндры являются самыми дорогими элементами перегрузочных машин. Повысить надежность их работы можно прежде всего путем снижения максимального (амплитудного) значения нагрузки во всем диапазоне движения ползуна. В терминах практической оптимизации необходимо решить минимаксную задачу, состоящую в определении максимальных (амплитудных) значений нагрузок при вариации рабочих режимов с последующим выбором из них режима с минимальной амплитудой. Предложен численный способ оптимизации конструкции и выбора оптимальных геометрических параметров, обеспечивающих надежную работу ползунково-кривошипного механизма при любом положении его частей. На этой основе разработана математическая модель и произведено моделирование рабочих характеристик механизма с подвижным цилиндром для графического определения минимаксного режима. Для практической реализации модели создана программа в кодах MatLAB, позволяющая получить количественные оценки геометрических параметров конструкции ползунково-кривошипного механизма. Показано, что модель обладает свойством образования узла, в котором пересекаются генерируемые ра-

бочие режимы, координаты которого соответствуют минимаксу амплитуды усилия в ползуне. Приведен пример способа параметрической оптимизации, подтверждающий корректность решений.

Ключевые слова: параметрическая оптимизация, перегрузочная машина, подвижной цилиндр, минимакс, унимодальность, модель, технологические ограничения, надежность конструкции, выбор режимов, узел, количественная оценка.

Для цитирования:

Дмитриенко Д. В. Параметрическая оптимизация элементов конструкций портовых перегрузочных машин / Д. В. Дмитриенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 655–662. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-655-662.

Введение

Развитие численных методов и алгоритмов параметрической оптимизации технологических объектов водного транспорта с использованием современных вычислительных систем и микропроцессорной техники позволяет на качественно новом уровне решать задачи эффективного функционирования и повышения эксплуатационной надежности технических средств и оборудования различного назначения [1]. Практическое применение методов исследования операций для поиска эффективных эксплуатационных характеристик является важным научно-обоснованным направлением принятия решений по совершенствованию управления основными фондами на водном транспорте при минимальных материальных и денежных затратах [2], [3]. Реализация энергосберегающих технологий средствами моделирования и оптимизации должна осуществляться по завершении поиска резервов экономии на основе существующих методов оптимизации в различных условиях функционирования объектов с учетом технологических ограничений [4], [5]. Во многих случаях повышение эффективности функционирования объектов водного транспорта может достигаться путем параметрической настройки регуляторов существующих систем, выбора режимов работы методами спектрального анализа средствами параметрической оптимизации, базирующейся на применении промышленных ПИД-регуляторов, что реализуется практически без материальных затрат [6]. Эффективными могут быть решения по обеспечению динамических характеристик объектов методами пассивного демпфирования. Такие решения, как правило, основываются на теории фильтрации, фильтрах Чебышева, Баттервортса, а также спектров полиномов [7].

Численные методы оптимизации параметров конструкций могут служить механизмом концепции энергосберегающей приводной системы, позволяющей снизить расходы на эксплуатацию перегрузочного оборудования, о чем свидетельствуют проектные решения отечественных и зарубежных фирм [8]. Анализ конструкций современных погрузочных машин показывает, что одним из узлов привода стрелы с грузом в машинах является ползунково-кривошипный механизм с подвижным цилиндром (рис. 1).



Рис. 1. Самоходный погрузчик с ползунково-кривошипным механизмом

Эффективность и надежность работы механизмов с подвижным цилиндром можно повысить путем параметрического синтеза конструкции и выбора рабочих параметров [9]. Поскольку ползунково-кривошипный механизм с возвратно-поступательно движущимся ползунком, являющимся частью гидравлического или пневматического цилиндра, нашел широкое применение на объектах водного транспорта, в работе предложено численное решение задачи параметрической оптимизации. Отметим, что в портовой технике механизм используется на мобильных кранах с пневматическим шасси, ричстакерах, транспортных средствах для работы с контейнерами, сборными, насыпными и проектными грузами.

Механизм применяется на автоматических кранах — штабелерах, в автоматизированных транспортных средствах терминальной техники и др. [10], [11]. Ползунковые механизмы также применяются в приводах двухстворчатых ворот шлюзов, в рулевых приводах судов, на речных земснарядах для погружения и подъема рам с всасывающими наконечниками, плавучих кранах, промышленных и судовых робототехнических устройствах и управляемых комплексах различного назначения.

Методы и материалы

Силовой цилиндр, обеспечивающий возвратно-поступательные движения механизма, является основным и самым дорогим элементом привода [12]. Проектирование цилиндра включает процедуру выбора оптимальных геометрических параметров, обеспечивающих надежную работу механизма при любом положении его частей. Под режимом высокой надежности имеются в виду такие значения параметров, при которых минимизируется максимальное (пиковое) усилие в цилиндре во всем диапазоне перемещений механизма. Для решения задачи оптимального параметрического синтеза воспользуемся упрощенной моделью механизма, представленной на рис. 2.

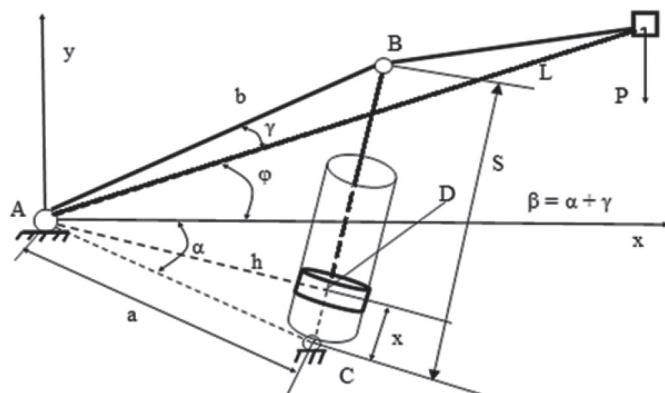


Рис. 2. Схема механизма подъема с подвижным цилиндром:
 L — длина стрелы, м; P — величина груза, кН; S — ход ползуна поршня, м;
 φ — поворот стрелы ползункового механизма, град;
 α — угол между осью абсцисс X и положением нижней части силового цилиндра;
 γ — угол между стрелой груза L и стороной b конструкции (поворотного устройства)

Предположим, что с помощью ползункового механизма поднимается груз P . Для расчетов примем $L = 4$ м, $P = 1000$ кН. Введем ограничения на амплитуду движения

$$\varphi_{\min} \leq \varphi \leq \varphi_{\max},$$

где $\phi_{\min} = -20^\circ$ и $\phi_{\max} = 80^\circ$.

Зададим минимальное и максимальное перемещение ползуна:

$$S_{\min} = 1 \text{ M}; S_{\max} = 1,8 \text{ M}.$$

Параметрическая оптимизация состоит в определении параметров a , b и угла β в условиях, когда механизм, перемещая ползун поршня гидроцилиндра в пределах от S_{\min} до S_{\max} в диапазоне

значений $\varphi_{\min} \leq \varphi \leq \varphi_{\max}$, развивал бы наименьшее пиковое (максимальное) усилие T в цилиндре. В терминах практической оптимизации необходимо решить минимаксную задачу: найти режим с минимальным значением $T_{\min \max}$ из всех возможных T_{\max} , обеспечиваемый с помощью надлежащего выбора параметров a, b и угла β при соблюдении введенных ограничений.

При составлении модели механизма, согласно обозначениям на рис. 2, рассмотрим нелинейную функцию:

$$T = f(a, b, \beta, b, \varphi, P). \quad (1)$$

Зависимость T от переменных состояния можно получить путем простых преобразований, если, например, воспользоваться теоремой косинусов применительно к ABC:

$$a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos(\varphi + \beta) = S^2. \quad (2)$$

Введем обозначения:

$$K_1 = 2ab; K_2 = a^2 + b^2. \quad (3)$$

Используя (2) и (3), можем записать:

$$K_2 - K_1 \cdot \cos(\varphi + \beta) = S^2. \quad (4)$$

Для нахождения усилия T в цилиндре воспользуемся равенством моментов, создаваемых P и T :

$$P \cdot L \cdot \cos \varphi = T \cdot h, \quad (5)$$

где плечо h определим из соотношения, полученного при совместном рассмотрении ACD и ABC:

$$x = \frac{S^2 - b^2 + a^2}{2S}. \quad (6)$$

В результате, с учетом соотношения (2), получим

$$x = \frac{a^2 + b^2 - b^2 + a^2 - 2ab \cdot \cos(\varphi + \beta)}{2S} = \frac{a^2 - ab \cdot \cos(\varphi + \beta)}{S} \quad (7)$$

и, следовательно, высота h определится по формуле

$$\begin{aligned} h &= \sqrt{a^2 - x^2} = \sqrt{a^2 - \left[\frac{a^2 - ab \cdot \cos(\varphi + \beta)}{S} \right]^2} = \\ &= \frac{\sqrt{a^2 S^2 - a^4 + 2a^3 b \cdot \cos(\varphi + \beta) - a^2 b^2 \cdot \cos^2(\varphi + \beta)}}{S} \end{aligned} \quad (8)$$

или после преобразований, с использованием (2) – (8), будем иметь

$$h = \frac{\sqrt{a^2 b^2 \cdot \sin^2(\varphi + \beta)}}{S} = \frac{ab \cdot \sin(\varphi + \beta)}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos(\varphi + \beta)}} = \frac{ab \cdot \sin(\varphi + \beta)}{\sqrt{K_2 - K_1 \cos(\varphi + \beta)}}. \quad (9)$$

Тогда формула (5) для T приобретет следующий вид:

$$T = \frac{PL \cdot \cos \varphi}{h} = \frac{PL \sqrt{K_2 - K_1 \cos(\varphi + \beta)}}{ab \cdot \sin(\varphi + \beta)} \cdot \cos \varphi. \quad (10)$$

Дальнейшие упрощения вычислений можно получить, если воспользоваться граничными условиями для угла φ и предельными перемещениями S_{\min} и S_{\max} . Введем ограничения, используя формулу (4):

$$\begin{cases} -S_{\min}^2 = K_1 \cos(\beta + \varphi_{\min}) - K_2; \\ -S_{\max}^2 = K_1 \cos(\beta + \varphi_{\max}) - K_2. \end{cases} \quad (11)$$

Решая (11), найдем:

$$K_1 = \frac{S_{\min}^2 - S_{\max}^2}{\cos(\beta + \varphi_{\max}) - \cos(\beta + \varphi_{\min})}; \quad (12)$$

$$K_2 = K_1 \cos(\beta + \varphi_{\max}) + S_{\max}^2. \quad (13)$$

В результате выполненных преобразований получено важное условие, согласно которому решение минимаксной задачи определяется только путем изменения угла β в уравнении (1).

Поскольку $K_1 = 2ab$ и $K_2 = a^2 + b^2$, то можно записать:

$$a = \frac{1}{2b} K_1, \quad b = \left(\frac{K_2 + \sqrt{K_2^2 - K_1^2}}{2} \right)^{0,5}. \quad (14)$$

В процессе вычислений максимальные (пиковые) усилия $T_{\max} = f(\beta)$ сначала выбираются из множества решений $T = f(\beta)$ при $P = \text{const}$ путем вариации угла β , и из них формируется вектор. Затем из всех элементов вектора $T_{\max} = f(\beta)$ с помощью функции минимизации определяется минимальное пиковое усилие $T_{\min \max}$ и соответствующий ему угол β_{opt} .

Результаты

Для численного решения минимаксной задачи составлена программа в кодах MatLAB и получены следующие результаты:

$$T_{\min \max} = 7080,6 \text{ кН}; \quad \beta_{\text{opt}} = 70,2^\circ; \quad b = 1,3359 \text{ м}; \quad a = 0,5476 \text{ м}.$$

На рис. 3 приведен фрагмент графика $T_{\max} = f(\beta)$, где минимаксный режим отмечен точкой.

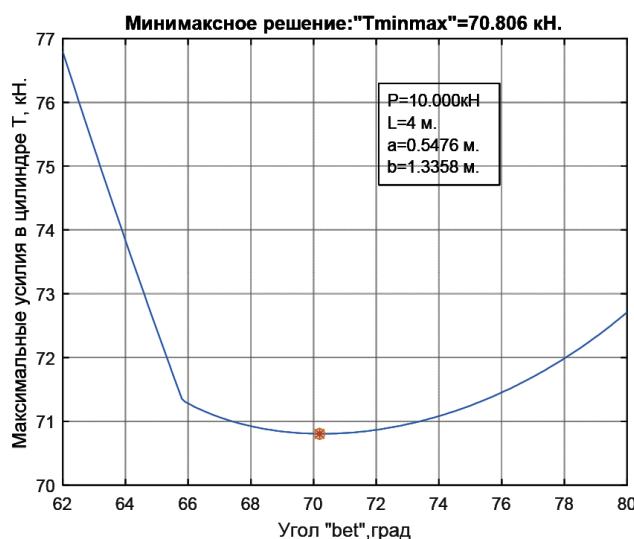


Рис. 3. Изменение максимума усилия в цилиндре в зависимости от угла β

Моделирование рабочих характеристик механизма позволило определить простой способ оценки минимакса. На рис. 4 представлены зависимости величины T от угла φ , рассчитанные по формулам (9) – (14) для различных значений β с шагом дискретности $\delta\beta = 0,1^\circ$ в рабочем диапазоне $62^\circ \leq \beta \leq 80^\circ$.

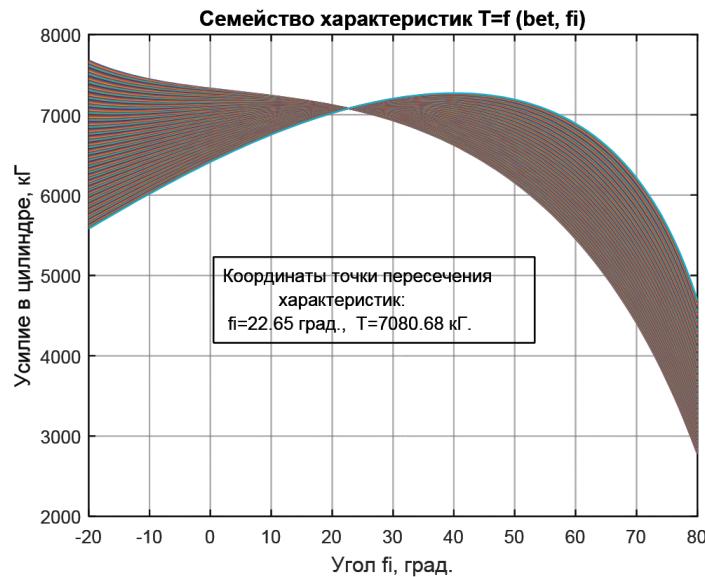


Рис. 4. Изменения усилий в цилиндре в функции угла φ

Обсуждение

В результате получено множество, состоящее из 181 кривых. Характеристики, приведенные на рис. 4, как следует из графических построений, имеют максимумы, расположенные слева и справа от точки пересечения. Поскольку искомая зависимость является унимодальной, минимум максимального значения должен соответствовать ординате самой точки пересечения [13]. Ее абсцисса соответствует углу поворота стрелы $\varphi = 22,65^\circ$, который определяется по расчетным данным с любым требуемым шагом дискретности. Важным обстоятельством является то, что все характеристики пересекаются в одной точке, образуя узел с координатами, соответствующими графическому решению минимаксной задачи, поэтому оценка проектируемых параметров и угла β при известных $T_{\min \max}$ и φ значительно упрощается.

Заключение

В работе на приведенном примере показано, что эффективность использования технических средств может быть повышена путем параметрической оценки характеристик, выполненной на моделях, адекватных исследуемым объектам. Используя технические возможности компьютерного моделирования и отрабатывая различные ситуации, встречающиеся на практике, получаем инструмент оценки различных проектов систем и принимаем обоснованные решения по совершенствованию оборудования, выбору режимов и общему планированию работы терминалов и их элементов. На базе моделей может быть создан механизм для обучения операторов и наглядной демонстрации взаимодействия эксплуатируемой техники на водном транспорте в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проников А. С. Параметрическая надёжность машин / А. С. Проников. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. — 560 с.
2. Аттетков А. В. Методы оптимизации / А. В. Аттетков, С. В. Галкин, В. С. Зарубин. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. — 440 с.
3. Rao S. S. Engineering optimization. Theory and practice / S. S. Rao. — John Wiley & Sons, Inc., 2009. — 840 p.
4. Анульев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. / В. И. Анульев. — М.: Машиностроение, 2001. — Т. 1. — 920 с.

5. Dawande M. Sequencing and Scheduling in Robotic Cells: Recent Developments / M. Dawande, H. N. Geismar, S. P. Sethi, C. Sriskandarajah // Journal of Scheduling. — 2005. — Vol. 8. — Pp. 387–426. DOI: 10.1007/s10951-005-2861-9.
6. Zhang H. Algorithm and stability of ATC receding horizon control / H. Zhang, J. Huang, F. L. Lewis // Adaptive Dynamic Programming and Reinforcement Learning, 2009. ADPRL'09. IEEE Symposium on. — IEEE, 2009. — Pp. 28–35. DOI: 10.1109/ADPRL.2009.4927522.
7. Сахаров В. В. Модели и алгоритмы оптимизации технологических процессов на объектах водного транспорта в среде MatLAB: монография / В. В. Сахаров, А. А. Кузьмин, А. А. Чертков. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 436 с.
8. Кузнецов А. Л. Перспективы автоматизации контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов // Морские порты. — 2010. — № 9 (90). — С. 50–55.
9. Иванов А. С. Конструируем машины: шаг за шагом: в 2 ч. / А. С. Иванов. — М: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. — Ч. 1. — 328 с.
10. Tanaka S. Dynamic optimization of the operation of single-car elevator systems with destination hall call registration: Part I. Formulation and simulations / S. Tanaka, Y. Uraguchi, M. Araki // European Journal of Operational Research. — 2005. — Vol. 167. — Is. 2. — Pp. 550–573. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.04.038.
11. Tanaka S. Dynamic optimization of the operation of single-car elevator systems with destination hall call registration: Part II. The solution algorithm / S. Tanaka, Y. Uraguchi, M. Araki // European Journal of Operational Research. — 2005. — Vol. 167. — Is. 2. — Pp. 574–587. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.04.039.
12. Шишко В. Б. Надёжность технологического оборудования: учебник / В. Б. Шишко, Н. А. Чиченев. — М.: Изд. дом МИСиС, 2012. — 1990 с.
13. Дмитриева Т. Л. Оптимальное проектирование пространственной металлической конструкции с использованием ПК ANSYS / Т. Л. Дмитриева, Ле Чан Минь Да // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. — 2014. — Т. 10. — № 2. — С. 79–84.

REFERENCES

1. Pronikov, A. S. *Parametricheskaya nadezhnost' mashin*. M.: MGTU im. N. E. Baumana, 2003.
2. Attetkov, A. V., S. V. Galkin, and V. S. Zarubin. *Metody optimizatsii*. M.: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2001.
3. Rao, S. S. *Engineering optimization. Theory and practice*. John Wiley & Sons, Inc., 2009.
4. Anur'ev, V. I. *Spravochnik konstruktora – mashinostroityelya. V 3-kh t. Vol. 1*. M.: Mashinostroenie, 2001.
5. Dawande, Milind, H. N. Geismar, S. P. Sethi, and C. Sriskandarajah. “Sequencing and scheduling in robotic cells: Recent developments.” *Journal of Scheduling* 8.5 (2005): 387–426. DOI: 10.1007/s10951-005-2861-9.
6. Zhang, Hongwei, Jie Huang, and Frank L. Lewis. “Algorithm and stability of ATC receding horizon control.” *Adaptive Dynamic Programming and Reinforcement Learning, 2009. ADPRL'09. IEEE Symposium on*. IEEE, 2009: 28–35. DOI: 10.1109/ADPRL.2009.4927522.
7. Saharov, V. V., A. A. Kuzmin, and A. A. Chertkov. *Modeli i algoritmy optimizacii tehnologicheskikh processov na obektaх vodnogo transporta v srede MATLAB: monografija*. Spb.: GUMRF imeni adm. S.O. Makarova, 2015.
8. Kuznetsov, A. L. “Perspektivny avtomatizatsii konteinerных terminalov.” *Morskie porty* 9(90) (2010): 50–55.
9. Ivanov, A. S. *Konstruiuem mashiny: shag za shagom. V 2-kh chastyakh*. Part 1. M: Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Baumana, 2000.
10. Tanaka, Shunji, Yukihiko Uraguchi, and Mituhiko Araki. “Dynamic optimization of the operation of single-car elevator systems with destination hall call registration: Part I. Formulation and simulations.” *European Journal of Operational Research* 167.2 (2005): 550–573. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.04.038.
11. Tanaka, Shunji, Yukihiko Uraguchi, and Mituhiko Araki. “Dynamic optimization of the operation of single-car elevator systems with destination hall call registration: Part II. The solution algorithm.” *European Journal of Operational Research* 167.2 (2005): 574–587. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.04.039.
12. Shishko, V. B., and N. A. Chichenev. *Nadezhnost' tekhnologicheskogo oborudovaniya: uchebnik*. M.: Izdatel'skii dom MISiS, 2012.
13. Dmitrieva, Tatiana Lvovna, and Le Tran Minh Dat. “Optimal design of space metal construction by using ANSYS.” *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering* 10.2 (2014): 79–84.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Дмитриенко Дмитрий Владимирович —
кандидат экономических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_osnipr@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Dmitrienko, Dmitry V. —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_osnipr@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 15 апреля 2017 г.

Received: April 15, 2017.