

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1168-1174

ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF THE FORMULAS THE CALCULATION OF THE LOSS OF SHIPS SPEED DUE TO WIND AND WAVES

A. M. Boyarinov, A. A. Ershov, S. M. Pylayev

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

The article deals with the current issue of calculating ship speed loss due to wave and wind resistance. With this problem faced by all participants in the Maritime transport of cargo from navigators and engineers of ships, which the knowledge of the speed of the ship, it is necessary to calculate parameters of voyage and calculate fuel reserves to the transfer to the ship owners for solving problems of commercial effectiveness and logistics. The opening of Russia's traffic on the Northern sea route, full of winds and storm events increases the urgency of the problem of the forecast of speed of vessels in conditions of wind and sea waves. Wind and waves on the ocean surface caused by the wind are among those hydrometeorological factors navigators often come across when operating a vessel. The International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers (STCW) requires that hydrometeorological factors should be taken into account in navigation. Wind and wave effects cause wettability and slamming (wave impact on the ship bottom) which lead to ship speed loss. Slamming conditions can be calculated using Froude coefficient and wettability contours. Ship speed at which slamming is eliminated can be calculated on the basis of known parameters of wind driven wave length and height as well as vessel draft. Frequency of enforced speed loss increases with the increase of wind velocity and wave height and can be taken into consideration through repeatability factor. In case a ship is not forced to decrease her speed repeatability factor value is equal to zero. When it comes to 100 % cases that a ship is forced to decrease speed at gale and under rolling sea conditions repeatability factor value is equal to one. Speed loss due to wind and wave effect is the sum total of speed loss as a result of enforced deceleration and as a result of additional resistance to motion caused by wind and wave factors. Mathematical formalism to calculate total speed loss due to wind and wave effect varies greatly. There are numerous formulae to estimate ship speed reduction due to wind and wave effects. In the article the comparative analysis of the practical applicability of the most commonly used formulas for calculating wind and wave loss of speed of the marine vessel. The need for comparative analysis of the practical applicability of these formulas is because most of them were obtain quite long ago based on studies traditional for that time types and displacements of the vessels and some of them give unacceptable results in cases where weather parameters exceed set values. Based on the results of the study this article provides recommendations on the practical use of the considered formulae of wind and wave loss of speed of ships.

Keywords: speed loss due to wind and wave effects, ship speed calculation, formula applicability analysis.

For citation:

Boyarinov, Alexander M., Andrey A. Ershov, and Sergey M. Pylayev. "Analysis of the applicability of the formulas the calculation of the loss of ships speed due to wind and waves." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Mararova* 9.6 (2017): 1168–1174. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1168-1174.

УДК 502.51

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ФОРМУЛ РАСЧЕТА ВЕТРО-ВОЛНОВЫХ ПОТЕРЬ СКОРОСТИ ХОДА МОРСКИХ СУДОВ

А. М. Бояринов, А. А. Ершов, С. М. Пылаев

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

Статья посвящена актуальной проблеме расчета ветро-волновых потерь скорости хода морских судов. С этой задачей сталкиваются все участники процесса морской перевозки груза — от судоводителей и судомехаников морских судов, которым знание скорости хода судна необходимо для расчета параметров рейса и запасов топлива, до судовладельцев при решении задач коммерческой эффективно-

сти рейса и логистики. Открытие Россией интенсивного движения судов по Северному морскому пути, особо подверженному ветрам и штормовым явлениям, дополнительно повышает актуальность проблемы прогнозирования скорости морских судов в условиях ветра и волнения. Ветер и волнение, вызванное воздействием ветра на поверхность океана, относятся к гидрометеорологическим факторам, с которыми наиболее часто приходится сталкиваться судоводителям при эксплуатации морского судна. Учет этих гидрометеорологических факторов в судовождении предписывается Международной конвенцией ПДНВ. Обращается внимание на то, что воздействие ветра и волнения на морское судно вызывает возникновение таких явлений, как заливаемость и слеминг (удары волн в днище носовой части судна), что приводит к вынужденному снижению скорости хода судна судоводителями. В настоящее время существуют методы для определения условий возникновения заливаемости с использованием числа Фруда и контуров заливаемости. По известным параметрам длины и высоты ветровой волны, а также осадки судна может быть рассчитана скорость хода, при которой явление слеминга будет отсутствовать. Отмечается, что повторяемость вынужденного снижения скорости морских судов возрастает с увеличением скорости ветра и высоты волны, которая может быть учтена с помощью коэффициента повторяемости. Если судно вынужденно не снижает скорость, то значение коэффициента повторяемости равно нулю. Когда судно в 100 % случаев вынуждено снижать скорость при штормовом ветре и волнении, коэффициент повторяемости равен единице. К ветро-волновым потерям скорости обычно относят суммарные потери морского судна от вынужденного снижения скорости хода и от потери скорости в результате дополнительного сопротивления движению из-за ветра и волнения. Исследованы математические зависимости для расчета суммарных ветро-волновых потерь скорости хода морских судов при ветре и волнении. В настоящей статье выполнен сравнительный анализ практической применимости наиболее часто используемых формул расчета ветро-волновых потерь скорости хода морского судна. Подтверждена необходимость сравнительного анализа в случае практического применения данных формул, вызванная тем, что большинство из них были получены достаточно давно на основе исследования движения судов традиционных для своего времени обводов, типов и водоизмещений. При этом отмечается, что часть из них дает неприемлемые результаты в тех случаях, когда погодные параметры превышают определенные значения. На основании результатов исследования даны рекомендации по практическому использованию рассмотренных формул расчета ветро-волновых потерь скорости хода морских судов.

Ключевые слова: ветро-волновые потери, расчет ветро-волновых потерь, формулы ветро-волновых потерь.

Для цитирования:

Бояринов А. М. Анализ применимости формул расчета ветро-волновых потерь скорости хода морских судов / А. М. Бояринов, А. А. Ершов, С. М. Пылаев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1168–1174. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1168-1174.

Введение (Introduction)

Во время движения морского судна при ветре и взволнованной поверхности моря, особенно при встречных курсовых углах ветра и ветрового волнения морское судно испытывает дополнительное сопротивление своему движению, что приводит к потерям скорости хода. Наиболее интенсивные потери скорости наблюдаются при одновременном усилении скорости ветра и увеличении высоты волны. Эти потери резко возрастают, когда высота волны превышает 3 м, и могут составлять более 25 % скорости судна на тихой воде.

При неизменных и совпадающих курсовых углах ветра и ветрового волнения, а также постоянной частоте вращения гребного вала волновые потери скорости хода судна ΔV_h определяются как функция высоты волны h степенной зависимостью

$$\Delta V_h = ah^b. \quad (1)$$

Увеличение скорости ветра W при неизменной высоте и курсовом угле волны, а также постоянной частоте вращения гребного вала приводят к потерям скорости хода судна ΔV_w , которые определяются логарифмической зависимостью:

$$\Delta V_w = a \lg W - b. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) коэффициенты a и b зависят от типа судна. Зависимость ветровых потерь ΔV_w и волновых потерь ΔV_h от курсовых углов ветра и волнения q_w и q_h носит более сложный характер и отличается большим разнообразием используемых для этой цели формул, приведенных в исследованиях различных авторов.

Учет гидрометеорологических факторов при плавании судов обязателен для судоводителей [1] и недооценка этого важнейшего компонента при проработках маршрута перехода [2], [3] может привести к катастрофическим последствиям [4]. Многие авторы в той или иной степени посвятили свои работы проблеме влияния ветра и волнения на ходкость судов [5] – [8].

Целью исследования настоящей статьи является поиск ответа на вопрос о том, каким формулам для расчета ветро-волновых потерь скорости хода современных судов следует отдать предпочтение.

Методы и материалы (Method and Materials)

Формулы для расчета ветро-волновых потерь скорости хода морских судов можно разделить на три группы:

1-я группа — полученные на основании натуральных наблюдений на морских судах после соответствующей статистической обработки этих наблюдений;

2-я группа — полученные в результате испытаний моделей морских судов в лабораторных условиях;

3-я группа — выведенные на основе законов аэро- и гидродинамики и теории морского волнения.

Представление об изменении скорости судов, происходящих под воздействием ветровых волн различной высоты и разных курсовых углов волнения, дает диаграмма Г. Верплогга. Известна также номограмма В. С. Красюка для расчета потерь скорости хода в зависимости от высоты и курсового угла волны с учетом водоизмещения судна. Авторами для сравнительного анализа применимости были выбраны наиболее известные формулы расчета ветро-волновых потерь ходкости судов [6] – [10].

Формула В. В. Дремлюга:

$$\Delta V_w = V_0 - \left[\frac{V_0^2(1 + K_q) - K_q W^2}{1 + K_q} \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{K_q W}{1 + K_q} \cdot \cos q_w, \quad (3)$$

где ΔV_w — потери скорости судна из-за ветра, уз; V_0 — скорость судна на тихой воде, уз; W — скорость истинного ветра, м/с; q_w — курсовой угол истинного ветра, град; $K_q = \frac{c_x \cdot S}{81\xi \cdot \Omega}$ — ветровой коэффициент; c_x — коэффициент воздушного сопротивления для соответствующего курсового угла ветра; S — площадь проекции подводной части судна на плоскость миделя, м²; ξ — коэффициент полного сопротивления воды подводной части судна; Ω — смоченная поверхность судна, м².

Формула Б. И. Сайфуллина и Б. А. Андрианова:

$$V = V_0 - (ah + bh^2) + kq_h h, \quad (4)$$

где V — скорость судна на волнении, уз; V_0 — скорость судна на тихой воде, уз; a, b, k — эмпирические коэффициенты, определяемые для каждого типа судна; h — высота волны 3 %-й обеспеченности, м; q_h — курсовой угол волны, град.

Формула А. Н. Крылова:

$$\Delta V_h = A^2 p h^2 c^2 + 2 A p h^2 c (0,5 c \cdot \cos q_h + V_0) - A p h^2 B, \quad (5)$$

где $A = 0,03\delta LB/D$; $A = 1 - \exp(-4\pi T/\lambda)$; ΔV_h — волновая составляющая потерь скорости судна; p — плотность морской воды, т/м³; h — средняя высота волн, м; c — фазовая скорость волн, м/с;

q_h — курсовой угол волн, град; B — ширина судна, м; L — длина судна, м; D — водоизмещение судна, т; λ — вероятнейшая длина волны, соответствующая высоте волны этой обеспеченности, м.

Формула П. М. Хохлова:

$$V = V_0 - (0,745h - 0,275q_h h)(1 - 1,35 \cdot 10^{-6} DV_0), \quad (6)$$

где V — скорость судна на волнении, уз; V_0 — скорость судна на тихой воде, уз; h — высота волны 3 % обеспеченности, м; q_h — курсовой угол волны, рад; D — водоизмещение судна, т.

Формула В. М. Шапаева:

$$R_B = C_x \frac{\rho_B \cdot w^2}{2} S, \quad (7)$$

где R_B — сопротивление движению судна от ветра, кН; C_x — безразмерный коэффициент сопротивления воздуха надводной части корпуса и надстроек судна, обдуваемых ветром; ρ_B — плотность воздуха, т/м³; w — скорость кажущегося ветра, м/с; S — площадь проекции надводной части судна с надстройками рангоутом на плоскость мидель-шпангоута, м².

Формула Давидсона:

$$\Delta R_h = \frac{\rho(V_0 + c)}{2} \frac{Bh}{\pi} (1 - \cos \varphi_n), \quad (8)$$

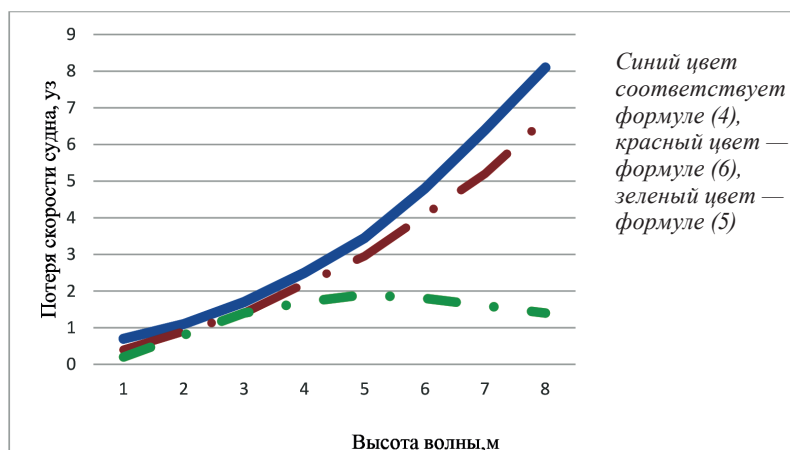
где ΔR_h — дополнительное сопротивление воды из-за встречного регулярного волнения (зыбь), кН; V_0 — скорость на тихой воде, м/с; B — ширина судна, м; h — высота волны, м; φ_n — угол входа носовой ветви ватерлинии, град; ρ — плотность воды, т/м³; c — скорость бега волны, м/с.

Формула Д. В. Дорогостайского:

$$\Delta R_h = l_h \rho h^2 \frac{B^2}{4L}, \quad (9)$$

где ΔR_h — дополнительное сопротивление на регулярном волнении (зыбь), кН; L — длина судна, м; l_h — коэффициент дополнительного сопротивления, определяемый произведением шести функций, аргументами которых являются основные размерения судна и параметры волнения.

Необходимость сравнительного анализа применимости приведенных формул ветро-волновых потерь ходкости морских судов для различных диапазонов погодных параметров вызвана тем, что некоторые формулы дают неприемлемые результаты, когда погодные параметры превышают определенные значения. Для проведения такого анализа использовалась следующая методика. В исследуемую формулу расчета ветро-волновых потерь подставлялись значения соответствующих погодных параметров (скорость ветра, высота ветровой волны) с определенным шагом — от возможных минимальных значений параметров до возможных максимальных. Затем строилась кривая ветро-волновых потерь (либо жестко связанные с этими потерями величины) в зависимости от изменения того или иного погодного параметра. Пример сравнения потерь скорости, рассчитанных по формулам (4) – (6) для транспортного судна «Краснодар», представлен на рисунке.



Сравнение потерь скорости, рассчитанных по формулам (4) – (6) для транспортного судна «Краснодар» (курсвой угол волнения $q_h = 0$)

В заключение было выполнено сравнение результатов вычислений с результатами, полученными на основе результатов натурных испытаний для конкретного судна. Результаты, полученные на основе натурных испытаний (наблюдений) для конкретного судна, принимались за «истинные». Была выполнена подстановка параметров этого конкретного судна и погодных параметров в исследуемые формулы, а также сравнение результатов вычислений с «истинными».

Результаты (Results)

По результатам исследования характера кривой ветро-волновых потерь можно сделать вывод о степени применимости формулы в том или ином диапазоне погодных параметров. В качестве основных критериев при исследовании кривой ветро-волновых потерь использовались следующие. При увеличении (уменьшении) значений погодных параметров при встречных и боковых курсовых углах ветро-волновые потери также должны возрастать (уменьшаться). При этом вид этой зависимости не имеет значения. Совпадение или сходство кривых, рассчитанных по разным формулам, также является подтверждением пригодности этих формул для данного диапазона. Диапазон изменения значений скорости ветра составил 5 – 30 м/с с дискретностью 5 м/с, высота волн — от 1 м до 10 м с дискретностью 1 м.

По приведенной в данном исследовании методике были проанализированы формулы (3) – (9) для различных диапазонов погодных параметров. В результате было установлено, что формулы (4), (6) – (9) дают удовлетворительные результаты по всему исследуемому диапазону скоростей ветра и высоты волнения. Формула (5) оказалась неприемлемой, а формула (8) приемлема лишь при высоте волн до 6 м включительно.

Помимо этого была установлена возможность уточнения формул (4), (6), например, с использованием соответствующих коэффициентов по результатам замера потерь скорости в каждом рейсе в условиях воздействия конкретного ветра и волнения, а также с учетом конкретных параметров загрузки судна. Все это дает возможность судоводителям, судомеханикам, судовладельцам, а также другим участникам транспортного процесса использовать уточненные формулы для расчета потерь скорости хода конкретных современных судов.

Обсуждение (Discussion)

Приведенные в статье формулы ветро-волновых потерь [6] – [10] были проанализированы на предмет возможности их практического применения в случае, когда известны лишь основные параметры судна. При этом дополнительно решался вопрос и о том, какая из формул предпочтительнее, исходя из достоверности получаемых результатов. При решении вопроса о том, какую из формул предпочесть, результаты вычислений сравнивались с результатами, полученными по натурным испытаниям для конкретного судна. Результаты, полученные на основе натурных испытаний для конкретного судна, принимались за «истинные». Параметры этого конкретного судна и погодные параметры подставлялись в испытываемые формулы, и результаты вычислений сравнивались с «истинными». Наибольшее приближение к «истинным» имели результаты, полученные по формуле (6). Несколько «хуже» оказались результаты, полученные по формуле (4), так как они завышались по сравнению с натурными данными.

Выводы

На основании анализа приведенных в статье формул расчета ветро-волновых потерь можно сделать следующие выводы.

1. Формулы (4), (6) – (9) могут использоваться для практического расчета ветро-волновых потерь скорости хода судов. Однако с точки зрения универсальности (по типу судов), диапазона погодных параметров, простоты используемых судовых параметров и надежности получаемых результатов следует отдать предпочтение формуле (6), так как эта формула может легко быть реализована в программном алгоритме для автоматического расчета ветро-волновых потерь судна.

2. Установлена возможность уточнения формул (4), (6) по результатам замера потерь скорости в каждом рейсе в условиях воздействия конкретного ветра и волнения, а также с учетом конкретных параметров загрузки судна. Это дает возможность судоводителям, судомеханикам, судовладельцам, а также другим участникам транспортного процесса использовать уточненные формулы для расчета потерь скорости хода конкретных судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты. — Лондон: ИМО, 2013. — 413 с.
2. Смоленцев О. И. Методы расчета вынужденных потерь скорости судна на встречном волнении, связанные с нормированием слеминга и заливаемости / О. И. Смоленцев // Электронный вестник. — 2011. — № 4. — С. 18–25.
3. Дмитриев В. И. Справочник капитана / В. И. Дмитриев, В. Л. Григорян, С. В. Козик [и др.]. — СПб.: Элмор, 2009. — 816 с.
4. Ершов А. А. От «Титаника» до «Costa Concordia» неиспользованные возможности для спасения: монография / А. А. Ершов. — Saarbrücken, Deutschland: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2013. — 146 с.
5. Темникова А. А. Определение скорости ледоколов на «чистой» воде, эксплуатируемых на Северном Каспии / А. А. Темникова, А. Р. Рубан // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 27–36. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-27-36.
6. Львов В. Е. Компенсация волнового и ветрового воздействий на систему управления курсом судна / В. Е. Львов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 25–29.
7. Крюков Н. Д. Рекомендации для судов при плавании в условиях тропических штормов северной Атлантики / Н. Д. Крюков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 31–38.
8. Стецюк Т. Г. К вопросу о расчетном определении падения скорости судна в штормовых условиях плавания / Т. Г. Стецюк, В. Г. Сизов // Судовождение. — 2010. — С. 22–27.
9. Лубковский В. К. Определение веторо-волновых потерь скорости судов смешанного плавания с помощью ортогонально-линейного волномера / В. К. Лубковский // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2007. — № 1. — С. 68–73.
10. Тарасенко Т. В. Определение сопротивления движению судна при движении на волнении с учетом курсового угла / Т. В. Тарасенко // Вестник Одесского национального морского института. — 2013. — С. 49–59.

REFERENCES

1. *Mezhdunarodnaya konvetsiya o podgotovke i diplomirovanii moryakov i nesenii vakhty*. London: IMO, 2013.
2. Smolentsev, O. I. “Metody rascheta vynuzhdennykh poter’ skorosti sudna na vstrechnom volnenii, svyazannye s normirovaniem sleminga i zalivaemosti.” *Elektronnyi vestnik* 4 (2011): 18–25.
3. Dmitriev, V. I., V. L. Grigoryan, S. V. Kozik, V. A. Nikitin, L. S. Rassukovanyi, G. G. Fadeev, and Yu. V. Tsitrik. *Spravochnik kapitana*. Sankt-Peterburg: Elmor, 2009.
4. Ershov, A. A. *Ot «Titanika» do «Costa Concordia» neispol’zovannye vozmozhnosti dlya spaseniya: monografiya*. Saarbrücken, Deutschland: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2013.
5. Temnikova, Alena A., and Anatoliy R. Ruban. “Determination of the icebreakers’ speed in ice free water operated in the Northern Caspian sea.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 27–36. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-27-36.
6. L’vov, V. E. “Compensation of wave and wind effects on the ship’s course management system.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(29) (2015): 25–29.
7. Kryukov, N. D. “Rekomendatsii dlya sudov pri plavanii v usloviyakh tropicheskikh shtormov severnoy Atlantiki.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 31–38.

8. Stetsyuk, T. G., and V. G. Sizov. "K voprosu o raschetnom opredelenii padeniya skorosti sudna v shtormovykh usloviyakh plavaniya." *Sudovozhdenie* (2010): 22–27.
9. Lubkovskii, V. K. "Opredelenie vetoro-volnovykh poter' skorosti sudov smeshannogo plavaniya s pomoshch'yu ortogonal'no-lineechnogo volnomera." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* 1 (2007): 68–73.
10. Tarasenko, T. V. "Opredelenie soprotivleniya dvizheniyu sudna pri dvizhenii na volnenii s uchetom kursovogo ugla." *Vestnik Odesskogo natsional'nogo morskogo instituta* (2013): 49–59.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бояринов Александр Михайлович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О.Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: bojarinovam@gumrf.ru

Ершов Андрей Александрович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: ershov_63@mail.ru, kaf_mus@gumrf.ru

Пылаев Сергей Михайлович —
кандидат педагогических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О.Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_fk@gumrf.ru

INFORMANION ABOUT THE AUTORS

Boiarinov, Aleksandr M. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: bojarinovam@gumrf.ru

Ershov, Andrey A. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: ershov_63@mail.ru, kaf_mus@gumrf.ru

Pylaev, Sergey M. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_fk@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 4 октября 2017 г.

Received: October 4, 2017.