

И.К. Бородай, С.Г. Живица, В.Г. Платонов
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

МОРЕХОДНОСТЬ КОРАБЛЯ И ПУТИ ЕЕ ИЗУЧЕНИЯ (К 50-ЛЕТИЮ ЛАБОРАТОРИИ МОРЕХОДНОСТИ)

Объект и цель научной работы. Цель настоящей работы – указать основные направления учения о мореходности корабля в контексте той последовательности, в которой они формировались в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова и, далее, в Крыловском государственном научном центре. Анализируются узловые характеристики, определяющие мореходность корабля: качка, волновые силы, заливаемость, слеминг, опасность опрокидывания.

Материалы и методы. В теоретических решениях задач мореходности используются, в основном, методы гидродинамической теории качки, а также методы линейной и нелинейной теории колебаний. При решении нетрадиционных задач – модельные испытания в мореходном бассейне на волнении с заданными параметрами.

Основные результаты. Разработанные методы позволяют для конкретного корабля определить количественные характеристики его мореходности применительно к заданным режимам плавания в условиях реального волнения.

Заключение. Степень совершенства корабля в отношении мореходности определяется совокупностью параметров, которые являются ее комплексной характеристикой. При этом учитываются задачи, решаемые кораблем, и условия их выполнения.

Ключевые слова: мореходность, волнение, качка, кинематика корабля, успокоители качки, опытовый бассейн.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Бородай И.К., Живица С.Г., Платонов В.Г. Мореходность корабля и пути ее изучения (к 50-летию лаборатории мореходности). Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 2(384): 147–152.

УДК 629.5.017

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-147-152

I. Boroday, S. Zhivitsa, V. Platonov
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

SHIP SEAKEEPING AND THE WAYS OF STUDYING IT (TO THE 50TH ANNIVERSARY OF SEAKEEPING LABORATORY)

Object and purpose of research. The purpose of this work is to outline the main fields of ship seakeeping science, in the historical succession of their formation at Krylov Centre. This paper discusses main parameters that determine ship seakeeping performance: motions, wave-induced forces, deck wetness, slamming, capsizing risk.

Materials and methods. Theoretical solutions to seakeeping problems are mainly based on the methods of hydrodynamic motions theory, as well as on the methods of linear and non-linear oscillation theory. Non-conventional tasks are solved through seakeeping model tests in waves with specified parameters.

Main results. This methods enable, for specific ship, quantitative determination of her seakeeping parameters for given navigation conditions in real waves.

Conclusion. Seakeeping performance of ship is determined by a number of parameters being its complex characteristic. Seakeeping studies are performed taking into account operational tasks and conditions of given ship.

Key words: seakeeping, waves, motions, ship kinematics, motion dampers, test tank.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Boroday I., Zhivitsa S., Platonov V. Ship seakeeping and the ways of studying it (to the 50th anniversary of Seakeeping Laboratory). Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 2(384): 147–152 (in Russian).

UDC 629.5.017

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-147-152



Одной из важнейших характеристик корабля как инженерного сооружения, определяющей степень эффективности его использования, является мореходность – комплексная характеристика поведения корабля в условиях волнения. Прежде всего это относится к степени подверженности корабля качке. Наиболее достоверные данные о качке могут быть получены на основе модельных испытаний в опытовом бассейне, оснащенный системой генерирования волнения с заданными параметрами. Вместе с тем, для кораблей с близкими к традиционным обводами на основе теоретических разработок создаются программы, позволяющие надежно прогнозировать их поведение на волнении.

Изучение мореходности кораблей стало необходимым еще в 30-х гг. в институтах НИИВК и НИИС, послуживших основой для создания ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова (1938). Это было связано с проектированием крупных советских кораблей – линкора по проекту 23, тяжелого крейсера по проекту 69 и крейсера по проекту 26 («Киров»). Была создана группа специалистов, которые занимались проблемами мореходности и управляемости. В послевоенные годы эта группа послужила исходной для создания в 1946 г. отдела (лаборатории) динамики кораблей. Отделу был присвоен номер 13 и возглавил его Г.А. Фирсов. Позже из 13 отдела были образованы лаборатория управляемости и лаборатория мореходности, первым руководителем которой стал А.В. Герасимов.

Принципиальной проблемой при изучении мореходности корабля является создание математической модели его качки, при разработке которой необходимо решить две задачи [1]: составление представительных уравнений, описывающих кинематику корабля на волнении, и определение параметров (гидродинамических коэффициентов) этих уравнений, что в результате позволит получать количественные данные о движении рассматриваемого объекта [2].

Наряду с этими задачами усилия с целью получения данных для проектирования были направлены на совершенствование систем стабилизации корабля на волнении. Естественно, что прежде всего речь идет о бортовой качке. Известные в судостроении пассивные успокоительные цистерны, в принципе, являются подходящим средством стабилизации для режимов плавания без хода или при малых скоростях движения [3]. Их конструкции (как одноярусного, так и многоярусного типа) разрабатывались Г.М. Хорошанским, Г.А. Фирсовым, А.В. Герасимовым [4]. При сохранении эффективности успоко-

ителя последнего типа его использование позволяет при проектировании уменьшить объем, предназначенный для размещения цистерны.

Как существенный вклад в проблему умерения бортовой качки следует рассматривать разработанную В.А. Мореншильдт теорию действия так называемых «квазистатических» многоярусных цистерн [5], а также теорию цистерн Фрама 1-го рода, учитывающую циклическое движение судна при качке на волнении. Эта теория в наиболее полном виде была разработана Г.А. Фирсовым [6].

С начала 60-х гг. интенсивно проводятся исследования в области успокоителей активного типа – бортовых управляемых рулей. Разработанный В.А. Мореншильдт на основе этих исследований инженерный метод оценки эффективности успокоителя давал возможность оптимизировать размеры, профиль, место их расположения на корпусе корабля, а также сформировать закон управления переключением рулей, отвечающий требованиям к параметрам бортовой качки и режимам плавания корабля [7].

Создание лаборатории мореходности совпало с интенсивным развитием и внедрением в практику проектирования вероятностных методов описания мореходности, основы которых были заложены в 50-х гг. работами А.И. Вознесенского и Г.А. Фирсова [8, 9]. Это направление деятельности лаборатории, результаты которого широко использовались при проектировании новых кораблей, развивались в последующее десятилетие Ю.А. Нецветаемым, Н.Н. Рахманиным, И.К. Бородаем. Речь идет о многообразных аспектах мореходности применительно к условиям плавания на нерегулярном волнении. К ним и сегодня, если говорить укрупненно, относятся:

- определение параметров качки;
- оценка условий заливания и возникновения слеминга;
- установление кинематических параметров фиксированных точек корпуса на волнении (перемещения, скорости, ускорения);
- определение характеристик разного рода силового воздействия волн (силы волнового дрейфа, нагрузки в корпусе и т.п.);
- оценка дополнительного сопротивления движению корабля на волнении.

По существу, все явления, возникающие при плавании объекта на волнении, рассматривались с вероятностных позиций, отражающих случайный характер воздействия. Именно в это время была подготовлена монография «Качка судов на морском

волнении» (авторы И.К. Бородай, Ю.А. Нецветав) – первая отечественная книга, посвященная методам описания и расчетов качки в условиях нерегулярного волнения [10].

В решении одного из важнейших вопросов – выбора представления спектральной плотности исходного процесса, т.е. нерегулярного волнения, была предложена форма спектра, разработанная Н.Н. Рахманиным на базе аппроксимаций корреляционных функций ординат морских волн. «Спектр Рахманина» долгие годы являлся основой для выполнения расчетов и моделирования нерегулярной качки [11]. Этому способствовала удачно выбранная аналитическая форма корреляционной функции, использующая, кроме дисперсии, два параметра: характеристику степени случайности процесса и частоту максимума спектра.

Наряду с разработкой теоретических и расчетных путей оценки мореходности в лаборатории развивалась и совершенствовалась техника мореходного эксперимента. Это совершенствование осуществлялось непрерывно, отвечая возникающим задачам и требуемой глубине их решения. Так, в начале 1968 г. была опробована, а затем и реализована разработанная С.Б. Абатуровым система создания нерегулярного волнения в маневренно-мореходном (так называемом «квадратном», 35×20 м) бассейне. При создании волнопродуктора нерегулярного волнения было использовано представление случайного процесса с позиции метода огибающих. В соответствии с этим методом колебания – в данном случае щита волнопродуктора – представлялись в виде гармоник с медленно меняющейся во времени случайным образом амплитудой и фиксированной частотой (периодом) [12]. Таким образом, в «квадратном» бассейне впервые в отечественной практике было реализовано нерегулярное волнение с заданными параметрами. Естественно, что такой алгоритм работы волнопродуктора определенным образом ограничивал формы воспроизводимых спектров. Даже использование метода огибающих в полной мере (случайные амплитуда и частота) позволяет, строго говоря, описывать лишь процессы, обладающие узким и однопиковым спектром. Более эффективным оказалось использование так называемой частотной модуляции, когда колебания щита волнопродуктора происходят в виде гармоник с неизменной амплитудой и медленно меняющимися друг за другом периодами (частотами). Именно такой метод, базирующийся на разработанном С.Л. Ивановским алгоритме [13], в 1998 г. был реализован в мореходном бассейне. Дальнейшее совершенствование волнообразующей

системы бассейна, произведенное в 2012 г. по инициативе К.Д. Корнилова, существенно расширило диапазон моделирования волновых условий и обеспечило возможность производить мореходные испытания моделей. Это усовершенствование было основано на классическом представлении случайного процесса в виде суммы гармонических составляющих со случайными амплитудами и фазами [14].

Кроме работ по модернизации волнопродуктора, в лаборатории осуществлялось также и расширение номенклатуры измерительной аппаратуры. Так, для регистрации кинематических параметров модели на волнении стали применяться оптические системы, позволяющие фиксировать ее движение по шести степеням свободы [15]. Для выполнения силовых измерений широкое распространение получили высокоточные динамометры с широким диапазоном регистрируемых нагрузок, изготовленные специализированными фирмами [16]. Все это позволило лаборатории выполнять уникальные экспериментальные работы и исследования, касающиеся не только мореходности отдельных объектов различного назначения, но и связанные с решением более сложных задач. К таким задачам относилось, в частности, изучение волновых условий базирования и возможности стоянки у причалов объектов океанотехники [17]. Аналогичная проблема заключалась в определении нагрузок при стоянке плавучей регазификационной установки и танкера-газовоза у причала за волноломом в акватории Калининградского терминала.

Деятельность лаборатории за все время ее существования была направлена на решение прикладных задач в обеспечение проектирования и проведение научных исследований, включающих разработку математических моделей и соответствующих алгоритмов их реализаций. Вместе с тем глубокое изучение качки в условиях сильного волнения потребовало отхода от линейной теории и создания методов, учитывающих нелинейные факторы при интенсивной качке. Особенно сложной оказалась разработка прикладных методов применительно к условиям нерегулярного волнения. В середине 70-х гг. этой проблемой занимался А.В. Герасимов, изложивший результаты многочисленных исследований в монографии [18]. Изучение нелинейной качки на основе взаимосвязанных уравнений движения привело к результату, позволяющему описывать и оценивать случаи возникновения так называемых параметрических (субгармонических) бортовых колебаний. Детальное изучение их интенсивности и условий вовлечения

судна в такого рода качку были проанализированы Г.В. Виленским [17].

По существу, к области нелинейной бортовой качки относится и проблема безопасности мореплавания. Для корабля в штормовых условиях безопасность определяется, в первую очередь, его подверженностью качке, характеру заливаемости, а также, в случае аварийного состояния, влиянием динамики попавшей внутрь отсеков воды на его остойчивость. Большой вклад в решение проблемы изучения качки аварийного корабля внес Н.Н. Рахманин, создавший расчетный аппарат для оценки безопасности аварийного судна [19, 20]. Решение задачи о безопасности судна при качке для случая, когда его остойчивость находится на пределе или вообще потеряна, получено С.Г. Живицей [21]. Это решение дает возможность оценивать максимальные наклонения потерявшего остойчивость судна в условиях волнения. В целом проблема остойчивости судна, движущегося на нерегулярном волнении, была рассмотрена И.К. Бородаем, предложившим схему вероятностной оценки крена судна при действии на него ветровой нагрузки [22].

Работы в области нелинейной качки дали основание подытожить полученные на предыдущем этапе результаты для разработки прикладных методов расчета различных видов качки кораблей и судов, базирующихся на линейной теории. Эти методы были сведены в единый документ, определенный как Отраслевой стандарт «Методика расчета качки водоизмещающих кораблей и судов». (ОСТ 5.1003-80). Создание ОСТ под руководством В.А. Мореншилдт и Ю.А. Нецветаева было в определенном смысле знаменательным событием. Именно ОСТ на многие годы стал руководящим материалом для расчетной оценки мореходности проектируемых кораблей в конструкторских бюро.

Степень совершенства корабля в отношении мореходности определяется совокупностью параметров, которые являются ее комплексной характеристикой. Именно такая характеристика была предложена Ю.А. Нецветаевым [23]. Она дала возможность объективно оценивать мореходность, имея в виду задачи, решаемые кораблем и условия их выполнения. Дальнейшая разработка комплексных критериев мореходности была выполнена В.Г. Платоновым, детально исследовавшим, в частности, условия заливания рыболовных судов и предложившим удобные для практики диаграммы качки [24, 25].

Сегодня необходимость всестороннего изучения динамики на волнении объектов океанотехники является очевидной. Однако еще в 1972 г. в составе лаборатории мореходности был организован сектор динамики технических средств освоения океана. Задачами сектора были исследования и разработка методов оценки поведения разнообразных плавучих сооружений в морских условиях. Возглавил сектор А.В. Иванов, который вместе с А.Н. Куликовой разработал комплекс экспериментальных и расчетных средств определения гидродинамических нагрузок, волновых сил и качки для разнообразных типов объектов океанотехники [17]. Для моделей сооружений, стоящих на грунте, измеряется окружающее волновое поле, данные о котором, в первую очередь, необходимы для обеспечения безопасности морских операций, в том числе подхода к стационарному сооружению судов обслуживающего флота.

Проведение все более сложных экспериментов в мореходном бассейне требовало усовершенствования систем обеспечения работы экспериментального оборудования и обработки получаемых результатов. Автоматизированная система «Волна», вступившая в строй в 1980 г., явилась первой отечественной бортовой (установленной на буксировочной тележке) вычислительной системой, позволяющей получать в темпе эксперимента основные характеристики пятидесяти процессов, определяющих кинематику и динамику модели на волнении. Идеологами этой системы были С.Б. Абатуров и К.Д. Корнилов при технической поддержке Ю.А. Нецветаева и В.Г. Платонова, ее разработку выполняли Н.С. Вельгорская и А.П. Савельев. В последующие годы система «Волна» совершенствовалась, а в 2017 г. она была дополнена многофункциональной системой, позволяющей производить расширенную обработку результатов измерений.

За годы своего существования лаборатория сформировалась как объединение, обладающее мощными теоретическими и экспериментальными средствами для решения большого круга задач мореходности. Особая заслуга в этом принадлежит Н.Н. Рахманину, руководившему лабораторией с 1979 по 2005 г. С 2006 по 2014 г. во главе лаборатории стоял Ю.С. Кайтанов, который направил усилия специалистов на совершенствование и создание новых динамометрических систем. Отличительной особенностью таких динамометров является их многоканальность, что позволяет проводить измерения составляющих нагрузок, действующих как на модель в целом, так и на ее элементы.

Свидетельством высоких достижений и авторитета лаборатории мореходности в мировой судостроительной науке являются многочисленные заказы от отечественных и зарубежных организаций, плодотворные контакты с иностранными специалистами.

Библиографический список

References

1. *Благовецкий С.Н.* Качка корабля. Л.: Судостроение, 1954. [*S. Blagoveshensky. Ship motions. Leningrad: Sudostroyeniye, 1954. (in Russian).*]
2. *Луговский В.В.* Качка корабля. СПб: СПбГМТУ, 1999. [*V. Lugovsky. Ship motions. St. Petersburg: St. Petersburg State Maritime Technical University, 1999. (in Russian).*]
3. *Шмырёв А.Н., Моренильдт В.А., Ильина С.Г., Гольдин А.И.* Успокоители качки судов. Л.: Судостроение, 1972. [*A. Shmyrev, V. Morenschildt, S. Ilyina, A. Goldin. Ship motion dampers. Leningrad: Sudostroyeniye, 1972 (in Russian).*]
4. *Моренильдт В.А.* Выбор типа и элементов успокоителей бортовой качки судна, оценка эффективности их действия // Судостроительная промышленность. Сер. Проектирование судов. 1988. Вып. 9. С. 3–14. [*V. Morenschildt. Selection of type and elements of ship rolling dampers and assessment of their efficiency // Sudostroitelnaya promyshlennost. Proektirovaniye sudov (Shipbuilding Industry. Ship design). 1988; 9: 3–14. (in Russian).*]
5. *Моренильдт В.А.* Теоретическое исследование бортовой качки судна, снабжённого многоярусной «квасистатической» успокоительной цистерной // Вопросы судостроения. Сер. Проектирование судов. 1978. Вып. 18. С. 55–67. [*V. Morenschildt. Theoretical study on rolling of ship fitted with multi-tier “quasistatic” stabilizing tank // Voprosy sudostroyeniya. Proektirovaniye sudov (Shipbuilding matters. Ship design). 1978; 18: 55–67. (in Russian).*]
6. *Фирсов Г.А.* Теория пассивных успокоительных цистерн, учитывающая циклическое движение судна // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 1959. Вып. 136. С. 23–63. [*G. Firsov. Theory of passive stabilizing tanks, taking into account cyclic movement of ship // Transactions of the Krylov State Research Centre. 1959; 136: 23–63. (in Russian).*]
7. *Моренильдт В.А.* Метод расчёта бортовой качки судна, снабжённого успокоителями с бортовыми управляемыми рулями // Вопросы судостроения. Сер. Проектирование судов. 1981. Вып. 27. С. 32–45. [*V. Morenschildt. Rolling calculation method for ship fitted with dampers based on anti-roll fins // Voprosy sudostroyeniya. Proektirovaniye sudov (Shipbuilding matters. Ship design). 1981; 27: 32–45. (in Russian).*]
8. *Вознесенский А.И., Фирсов Г.А.* Методика расчёта качки корабля на нерегулярном волнении // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 1956. Вып. 103. С. 5–36. [*A. Voznesensky, G. Firsov. Calculation theory of ship motions in irregular waves // Transactions of the Krylov State Research Centre. 1956; 103: 5–36. (in Russian).*]
9. *Вознесенский А.И., Фирсов Г.А.* О некоторых вопросах, связанных с изучением мореходных качеств кораблей // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 1957. Вып. 120. С. 3–24. [*A. Voznesensky, G. Firsov. On some aspects of ship seakeeping studies // Transactions of the Krylov State Research Centre. 1957; 120: 3–24. (in Russian).*]
10. *Бородай И.К., Нецветаев Ю.А.* Качка судов на морском волнении. Л.: Судостроение, 1969. [*I. Boroday, Yu. Netsvetayev. Ship motions in sea waves. Leningrad: Sudostroyeniye, 1969. (in Russian).*]
11. *Рахманин Н.Н.* Эмпирический спектр морского волнения // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 1958. Вып. 126. С. 20–36. [*N. Rakhmanin. Empirical spectrum of sea waves // Transactions of the Krylov State Research Centre. 1958; 126: 20–36. (in Russian).*]
12. *Абатуров С.Б.* Исследование возможности создания нерегулярного волнения в бассейне с помощью щитового волнопродуктора // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 1966. Вып. 232. С. 66–75. [*S. Abaturov. Feasibility study of irregular wave generation in the test tank equipped with flap-based wave maker. Transactions of the Krylov State Research Centre. 1966; 232: 66–75. (in Russian).*]
13. *Ивановский С.Л.* Результаты моделирования нерегулярного волнения в глубоководном опытовом бассейне // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2000. Вып. 10(294). С.129–133. [*S. Ivanovsky. Results of irregular wave generation in deepwater test tank // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2000; 10(294):129–33. (in Russian).*]
14. *Сवेशников А.А.* Прикладные методы теории случайных функций. М.: Наука. 1968. [*A. Sveshnikov. Applied methods of random functions theory. Moscow: Nauka, 1968. (in Russian).*]
15. Optotrak Certus HD [Электрон. ресурс] / Сайт Nothern Digital inc. URL: www.ndigital.com
16. Engineered Products for Robotic Productivity [Электрон. ресурс] / Сайт ATI Industrial Automation. URL: www.ati-ia.com
17. Мореходность судов и средств океанотехники. СПб.: 2013. [Seakeeping of ships and marine platforms. St. Petersburg, 2013. (*in Russian*)].

18. *Герасимов А.В.* Энергостатистическая теория нелинейной нерегулярной качки судов. Л.: Судостроение, 1979. [A. Gerasimov. Statistical energy-based theory of non-linear irregular motions of ships. Leningrad: Sudostroyeniye, 1979. (in Russian)].
19. *Рахманин Н.Н.* Бортовая качка судна, отсеки которого частично заполнены жидкостью // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 1962. Вып. 191. С. 54–72. [N. Rakhmanin. Rolling of ship with partially flooded compartments // Transactions of the Krylov State Research Centre. 1962; 191: 54–72. (in Russian)].
20. *Рахманин Н.Н., Живица С.Г.* О влиянии свободных поверхностей жидких грузов на остойчивость с учетом динамики судна // Российский морской регистр судоходства. Научно-технический сборник. 1997. Вып. 20. Ч. 1. С. 17–28. [N. Rakhmanin, S. Zhivitsa. On effect of free surfaces of fluid cargos upon stability, taking into account ship dynamics // Russian Maritime Registry of Shipping. Research Bulletin. 1997. Issue 20. Part 1. P. 17–28. (in Russian)].
21. *S. Zhivitsa.* Dynamic Peculiarities of an Unstable Ship Rolling in Waves // 5th Int. Workshop «Stability and Operational Safety of Ships». Italy, University of Trieste. 2001.
22. *Бородай И.К., Нецветаев Ю.А.* Мореходность судов. Л.: Судостроение, 1982. [I. Boroday, Yu. Netsvetayev. Seakeeping of ships. Leningrad: Sudostroyeniye, 1982. (in Russian)].
23. *Нецветаев Ю.А.* Комплексная оценка мореходности судов // Судостроительная промышленность. Сер. Проектирование судов. 1986. Вып. 2. С. 30–44. [Yu. Netsvetayev. Integrated assessment of ship seakeeping // Sudostroitelnaya promyshlennost. Proektirovaniye sudov (Shipbuilding Industry. Ship design). 1986; 2: 30–44. (in Russian)].
24. *Платонов В.Г.* Обобщённые диаграммы относительных колебаний носовой оконечности судна на встречном нерегулярном волнении // Судостроение. 1980. Вып. 9. С. 10–12 / V. Platonov. Generalized diagrams of relative bow motions of ship in head irregular waves // Sudostroyeniye. 1980; 9: 10–2. (in Russian)].
25. *Труб М.С., Платонов В.Г., Любавина Н.М.* Критерии и диаграммы мореходности рыбопромысловых

судов // Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования комплексных методов проектирования мореходных качеств судов». 1987. С. 127–130. [M. Trub, V. Platonov, N. Lyubavina. Seakeeping criteria and diagrams for fishing vessels // Theses of messages, All-USSR Scientific & Technical Conference “Challenges in refining integrated methods of seakeeping ship design”. 1987. P. 127–130. (in Russian)].

Сведения об авторах

Бородай Игорь Кириллович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 415-49-88. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Живица Сергей Григорьевич, к.т.н., начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 415-49-88. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Платонов Виктор Георгиевич, к.т.н., начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 415-49-88. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

About the authors

Boroday, Igor K., D. Sc., Prof., Chief Researcher, KSRC. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-49-88. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Zhivitsa, Sergey G., Cand. Tech. Sc., Head of Laboratory, KSRC. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-49-88. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Platonov, Viktor G., Cand. Tech. Sc., Head of Sector, KSRC. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-49-88. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 22.03.18
Принята в печать / Accepted: 31.05.18
© Коллектив авторов, 2018