

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-63-70  
УДК 629.5.015.154  
EDN: QDGTUD

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

## ПРИКЛАДНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОГО НАКРЕНЕНИЯ СУДНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ В УСЛОВИЯХ ВОЛНЕНИЯ

**Объект и цель научной работы.** Объектом является изложение путей определения динамического накренения судна или плавающего сооружения под действием на него внешней нагрузки в морских условиях. Цель – произвести оценку поведения судна в рассматриваемой ситуации.

**Материалы и методы.** Для заданных характеристик судна и внешних условий задача решается на основе методов гидродинамической теории качки.

**Основные результаты.** Сформулированы подходы к определению результата действия кренящей нагрузки, характеризуемой величиной получаемого судном крена вплоть до возможности его опрокидывания.

**Заключение.** Сформулированы прикладные методы решения инженерных задач о динамическом накренении судна при заданных параметрах загрузки и условиях плавания.

**Ключевые слова:** поперечная нагрузка (шквал), остойчивость, угол крена.  
*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-63-70  
UDC 629.5.015.154  
EDN: QDGTUD

I.K. Boroday, K.V. Kurchukov, V.G. Platonov  
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## PRACTICAL ASSESSMENT METHODS FOR DYNAMIC HEEL DUE TO EXTERNAL LOAD IN WAVES

**Object and purpose of research.** This paper discusses determination of dynamic heel for a ship or a floating structure due to external load in sea conditions. The purpose of the study was to estimate the behavior of ship in this situation.

**Materials and methods.** The study followed the methods of hydrodynamic theory of motions for given ship in given conditions.

**Main results.** The authors managed to formulate the approaches to determination of heeling load effect in terms of generated heel, up to the capsizing limit.

**Conclusion.** The study suggests practical assessment methods for dynamic heel of ship in given loading conditions and in given environment.

**Keywords:** transverse load (squall), stability, heel angle.  
*The authors declare no conflicts of interest.*

### Введение

#### Introduction

Задача о динамическом крене судна под действием поперечной нагрузки при плавании на волнении –

одна из сложнейших проблем мореходности. Вместе с тем в практике проектирования зачастую возникает необходимость оперативной оценки поведения судна в отношении накренения в различных условиях плавания.

*Для цитирования:* Бородай И.К., Курчуков К.В., Платонов В.Г. Прикладные методы оценки динамического накренения судна при воздействии внешней нагрузки в условиях волнения. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 3(405): 63–70.

*For citations:* Boroday I.K., Kurchukov K.V., Platonov V.G. Practical assessment methods for dynamic heel due to external load in waves. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 3(405): 63–70 (in Russian).

В связи с этим в качестве исходного рассмотрен также случай динамического крена в отсутствие волн, т.е. при плавании на тихой воде. Эта задача имеет практическую значимость, поскольку может соответствовать различным эксплуатационным режимам. Что касается действия волн, то будут проанализированы режимы плавания судна в условиях лагового волнения без хода.

Сложность процесса динамического накренения судна внешней нагрузкой неизбежно приводит к необходимости определенной схематизации явления. При разработке процедуры оценки результатов действия на судно кренящей нагрузки в настоящей статье применены в основном методы, изложенные в работах [1–4, 8–9].

В статье используются обозначения, традиционно применяемые в работах по теории корабля и, в частности, в работах по мореходности. В связи с этим представляется, что в специальном общем перечислении используемых символов нет необходимости, за исключением отдельных параметров, на которые следует обратить внимание. Это же относится к понятиям по теории вероятностей, используемым в работах по мореходности.

Применяются две системы координат (рис. 1):

- неподвижная в пространстве система  $O\xi\eta\zeta$ , где ось  $O\eta$  направлена на правый борт, ось  $O\zeta$  – вертикально вниз, плоскость  $\xi\eta\zeta$  совпадает с поверхностью тихой воды;
- связанная с судном система  $GXYZ$ , начало которой находится в его ЦТ, плоскость  $GXZ$  совпадает с диаметральной плоскостью, ось  $GY$  также направлена на правый борт, ось  $GZ$  – вертикально вниз.

Линейные перемещения судна считаются положительными, если они происходят вдоль положительных направлений осей, угловые колебания приняты положительными: крен на правый борт,

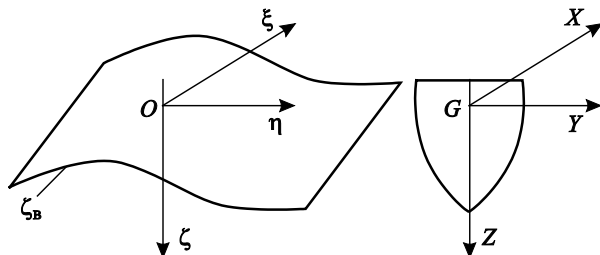


Рис. 1. Системы координат  
 Fig. 1. Coordinate systems

дифферент на корму. Направление распространения двухмерных волн принято вдоль положительного направления оси  $O\eta$ .

## Исходные данные, необходимые для оценки динамического крена

The initial data required to assess the dynamic heel

В качестве исходных необходимы следующие данные:

- о судне, используемые для оценки его мореходности (в т.ч. начальная остойчивость и диаграмма остойчивости для рассматриваемых вариантов загрузки);
- о внешних условиях (ветер, волнение);
- о кренящей нагрузке, если речь идет о механическом кренящем воздействии.

## Соотношения, определяющие поведение судна под действием внешней кренящей нагрузки

Ratios, that determine the behavior of ship under external heeling load

В момент времени  $t = t_n$  к судну прикладывается поперечная ветровая (или механическая) нагрузка  $P(t)$ . Наклонение судна относительно его продольной горизонтальной оси  $GX$  описывается уравнением:

$$I_{x1} \ddot{\theta} + M_B + M_C = M_g + M_K + M_W. \quad (1)$$

В уравнении (1) обозначено:

$I_{x1}$  – сумма моментов инерции массы судна относительно оси  $GX$  и присоединенной массы воды;

$M_B$  – восстанавливающий момент, определяемый в общем случае диаграммой остойчивости. В условиях волнения и качки диаграмма остойчивости судна отличается от диаграммы статичности, т.е. отвечающей плаванию судна на тихой воде без хода. Вместе с тем, чтобы избежать неопределенного усложнения проблемы оценки динамического крена судна, для рассматриваемого режима плавания лагом к двумерному волнению допустимо, имея в виду оценочный подход, в уравнении (1) использовать восстанавливающий момент  $M_B^0$ , соответствующий условиям тихой воды;

$M_C$  – момент силы сопротивления жидкости, в общем случае зависящий от скорости крена. По-

скольку величина этого момента в задачах о динамическом наклонении по сравнению с составляющими уравнения невелика, на практике при оценке динамического наклонения судна этим моментом, как правило, пренебрегают, тем более что возникающая при этом ошибка оказывается в безопасную сторону;

$M_g$  – гидродинамический момент, возникающий при дрейфе судна под действием поперечной нагрузки;

$M_K$  – момент, вызванный действием поперечной горизонтальной силы  $P_{(t)}$  (шквал);

$M_W$  – возмущающий момент, создаваемый набегающим на судно лаговым волнением и вызывающий бортовую качку.

Уравнение (1) по своей структуре в принципе позволяет получить описание процесса бортовых наклонений судна при произвольном характере волнения и заданных внешних условиях. Однако для решения сформулированной во введении задачи о динамическом крене в практике инженерных расчетов внутреннюю структуру составляющих уравнения (1) следует схематизировать. В дальнейшем при анализе различных условий действия кренящей нагрузки используются решения, обычно применяемые в расчетной практике мореходности.

## Динамический крен при плавании судна на тихой воде

Dynamic heel in still water

Уравнение (1) для этого случая, если учесть сказанное об остойчивости и пренебречь гидродинамическим сопротивлением при наклонении судна, будет иметь вид:

$$I_{x1} \ddot{\theta} + M_B^0 = M_g + M_K. \quad (2)$$

О моменте  $M_B^0$ , определяющем остойчивость на тихой воде, было сказано выше. В отношении структуры общего кренящего момента  $M_g + M_K$  могут быть использованы различные подходы. Строго говоря, этот момент состоит из слагаемого, обусловленного действием ветра (внешней кренящей нагрузки) и гидродинамической части, вызванной дрейфом судна. Таким образом, общий кренящий момент при действии нагрузки на тихой воде можно записать в виде:

$$M_g + M_K = P(t)(z_n - z_G) - \mu_{24} \ddot{\eta}_g - \lambda_{24} \dot{\eta}_g, \quad (3)$$

где  $\eta_{g(t)}$  – поперечное движение ЦТ судна;  $\lambda_{24}$  – статический коэффициент демпфирования;  $\mu_{24}$  – ста-

тический коэффициент присоединенной массы воды;  $z_n$  – ордината точки приложения результирующей внешней поперечной нагрузки.

Коэффициенты  $\lambda_{24}$  и  $\mu_{24}$  характеризуют демпфирование и инерцию воды в отношении наклонения судна относительно оси  $GX$  при его поперечном перемещении.

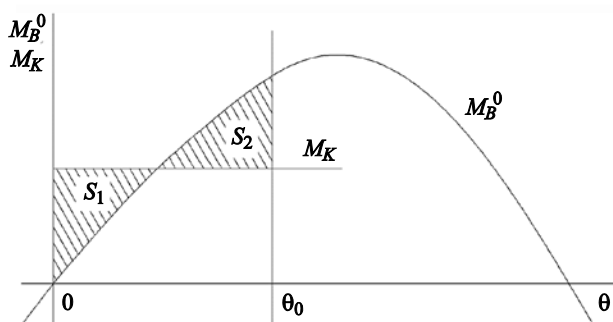
Уравнение (2) служит исходным для решения вопроса о динамическом воздействии на судно кренящей нагрузки. Вместе с тем решение этого уравнения с учетом (3) в прикладном отношении является, строго говоря, затруднительным, поскольку требует количественных данных о гидродинамических составляющих  $\lambda_{24}$  и  $\mu_{24}$ , которые надежно можно получить путем проведения специального, довольно сложного эксперимента.

Кроме того, для определения каждого из двух последних слагаемых в (3) необходимо знание кинематических характеристик (скорости и ускорения) дрейфа судна под действием поперечной нагрузки. Вместе с тем, как показывают оценочные результаты, роль двух последних слагаемых в формировании кренящего момента в (3) сравнительно невелика [3] и для оценочных расчетов ими можно пренебречь.

Если предполагаются достаточно большие углы наклона судна, следует принимать во внимание его остойчивость, характеризуемую диаграммой, а не учитывать лишь ее начальный участок. Известно, что в этом случае целесообразно использовать баланс работ нагрузок на пути наклонения. Наиболее просто это делается с помощью графического построения [3, 8]. Это дает возможность определить не только динамический угол крена для конкретной заданной внешней нагрузки, но и оценки предельной величины нагрузки, которая может привести судно к опрокидыванию. Для решения задачи могут быть использованы диаграммы статической и динамической остойчивости.

Если не делается специальных указаний относительно характера изменения во времени поперечной ветровой или заданной механической нагрузки, то обычно предполагается, что ветровой момент прикладывается мгновенно и остается постоянным за все время наклонения судна. Практический интерес с точки зрения безопасности судна обычно представляет только первое, максимальное наклонение [3, 8].

Суммарная сила давления ветра определяется как произведение удельного давления на площадь парусности судна. При этом величина ординаты приложения ветровой нагрузки определяется по



**Рис. 2.** Определение динамического угла крена судна  $\theta_0$

**Fig. 2.** Determination of dynamic heel angle  $\theta_0$

результатам аэродинамических исследований и для упрощения решения может приниматься постоянной за весь период наклонения.

Обычно начальный угол крена судна в момент действия поперечной нагрузки обозначается через  $\theta_H$ . При начальном крене на наветренный борт пишется  $-\theta_H$ , на подветренный  $+\theta_H$ . Случай отсутствия начального крена соответствует величине  $\theta_H = 0$ .

Нагляднее действие кренящего момента представляется графически в виде диаграммы остойчивости и кренящей нагрузки – см. рис. 2, где изображаются диаграмма статической остойчивости  $M_B^0$  и кренящий момент. Работа кренящего и восстанавливающего моментов определяется величиной площади между этими кривыми (каждой из них) и вертикальной осью, соответствующей углу крена. Очевидно [3, 8, 9], что равенство заштрихованных на рисунке площадей дает возможность найти динамический угол при накренинии судна  $\theta_0$ . Напомним, что речь идет о плавании судна на тихой воде.

## Определение параметров качки судна в условиях регулярного и нерегулярного волнения

Determination of ship motion parameters in regular and irregular waves

Применительно к изложенному методу оценки динамического угла накрениния судна внешней нагрузкой задача определения его бортовой качки в заданных волновых условиях является стандартной в процессе оценки мореходности плавающего сооружения. Определение характеристик бортовой качки возможно как экспериментальным путем на

основе модельных испытаний в опытовом бассейне, так и с помощью расчета по существующим многочисленным программам.

В отечественной практике широко используются программы, отвечающие РД 5.1003-80. Из зарубежных программ популярностью пользуются [11, 12]. В качестве базы расчетов регулярной и нерегулярной качки в российской практике используются методы, основанные на работах [1, 4, 8]. В целом расчетные методы оценки характеристик бортовой качки судов дают достаточно надежные результаты.

## Динамический крен судна под действием ветра и регулярных волн

Dynamic heel due to wind and regular waves

В наиболее общем виде уравнение работ, отвечающее воздействию кренящей нагрузки в произвольный момент времени  $t_H$  и мгновенному углу крена  $\theta_H$ , имеет вид:

$$A_B(\theta_H, \theta_0) - K(\dot{\theta}_H) \text{sign } \dot{\theta}_H = A_K(\theta_H, \theta_0). \quad (4)$$

Здесь:

$A_B(\theta_H, \theta_0) = \int_{\theta_H}^{\theta_0} [M_B^0(\theta)] d\theta$  – работа восстанавливающего момента на тихой воде в диапазоне углов крена;

$K(\dot{\theta}_H) = (I_x + \mu_{44}) \frac{\dot{\theta}_H^2}{2}$  – кинематическая энергия качающегося судна в момент действия нагрузки;

$A_K(\theta_H, \theta_0)$  – работа кренящего момента в интервале углов крена  $\theta_H \div \theta_0$ . Предполагается, что при достижении судном динамического угла крена угловая скорость равна нулю, т.е.  $\dot{\theta}_0 = 0$ .

Очевидно, что при динамическом накренинии судна в условиях тихой воды в уравнении (4) второе слагаемое будет отсутствовать, и следует сравнить только работы кренящего и восстанавливающего моментов.

Для определения динамического угла крена, как говорилось выше, целесообразным оказывается использование наглядного графического приема. На рис. 3 показана процедура нахождения угла  $\theta_0$  на основе использования графической интерпретации соотношения (4) путем сопоставления заштрихованных площадей, отвечающих величинам работ всех входящих в (4) составляющих.

При воздействии кренящей нагрузки в условиях качки судна на регулярном волнении целесообразно рассматривать действие внешней нагрузки (волны) в момент крена на наветренный борт, а также в момент прохождения судном равновесного положения. Поскольку в условиях регулярного волнения параметры качки судна – амплитуда и частота колебаний – неизменны, эти два положения позволят охватить возможное влияние качки на анализируемый результат. Для первого случая  $t = t_n$  на диаграмме, аналогичной рис. 3, угол  $\theta_n$  следует отложить как величину, равную амплитуде качки в отрицательную сторону. В этом случае динамический угол крена находится из условия равенства площадей без учета составляющей  $K(\dot{\theta}_H)$ .

Естественно, что для условий регулярного волнения величины  $\theta_n$  и  $\dot{\theta}_H$  представляют собой неизменную амплитуду угла бортовой качки и амплитуду скорости  $\dot{\theta}_{H0} = \theta_n \cdot \omega_\theta$ , причем  $\omega_\theta = 2\pi/T_\theta$  – частота бортовой качки,  $T_\theta$  – ее период, равный периоду волны.

Вместе с тем на основе практических соображений очевидно, что наибольшее значение динамического крена будет в случае, когда начало действия кренящей нагрузки совпадет с амплитудным наклоном судна на наветренный борт.

### Динамический крен судна под действием ветра и нерегулярного волнения

Dynamic heel due to wind and irregular waves

Сложнее обстоит дело при воздействии на судно нерегулярного волнения. Если подходить упрощенно к рассмотрению этого режима, то аналогично качке на регулярных волнах один из случаев отвечает накренению судна на наветренный борт. Однако угол  $\theta_n$  тогда будет случайной величиной, отвечающей рассчитанному закону распределения амплитуд качки с соответствующими параметрами.

Поэтому для получения достаточно полной картины необходимо рассмотреть режимы динамического накренения при различных значениях начальных амплитуд качки  $\theta_n$ , являющихся случайными величинами [2, 3]. В связи с этим следует предварительно выполнить расчет бортовой качки судна на нерегулярном волнении заданной интенсивности (или провести модельные испытания) [2].

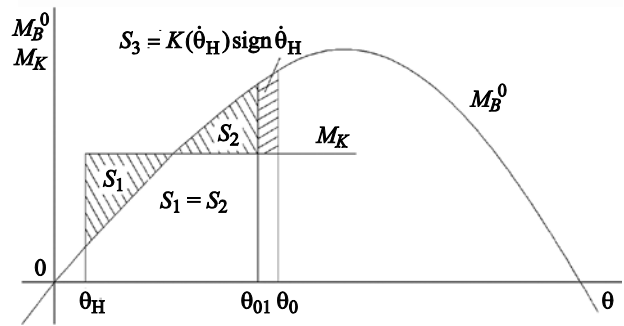


Рис. 3. Динамическое накренение судна при произвольных начальных условиях ( $\theta_{01}$  – динамический угол крена при  $\dot{\theta}_0 = 0$ ;  $\theta_0$  – динамический угол крена при  $\dot{\theta}_H \neq 0$ )

Fig. 3. Dynamic heel in arbitrary initial conditions ( $\theta_{01}$  – dynamic heel angle at  $\dot{\theta}_0 = 0$ ;  $\theta_0$  – dynamic heel angle at  $\dot{\theta}_H \neq 0$ )

Поскольку в инженерной практике принято приписывать любой амплитуде нерегулярной качки соответствующую обеспеченность (вероятность превышения), такую же обеспеченность будет иметь в каждом случае и динамический угол  $\theta_0$ . Таким образом, при заданной загрузке судна может быть определено соотношение, т.е. зависимость  $\theta_0(\theta_n)$ , и наглядно отражена величина возможного случайного появления динамического угла  $\theta_0$ . Такая зависимость может иметь вид, подобный графику на рис. 4, отвечающему фиксированной кренящей нагрузке.

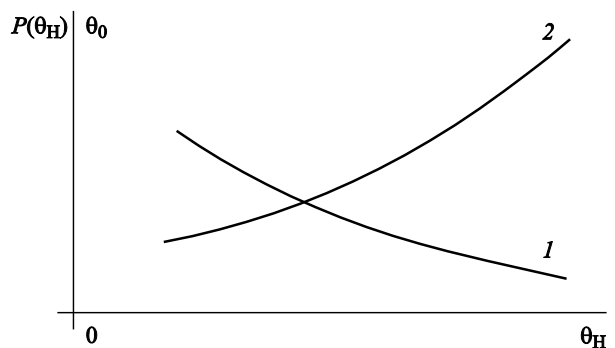


Рис. 4. Зависимость динамического угла крена от величины начального угла на наветренный борт: 1 – обеспеченность начального угла  $\theta_n$ ,  $P(\theta_n)$ ; 2 – динамический угол крена

Fig. 4. Dynamic heel angle as function of initial angle to the weather side: 1 – occurrence of initial angle  $\theta_n$ ,  $P(\theta_n)$ ; 2 – dynamic heel angle

## Вероятностная оценка результата воздействия кренящей нагрузки в условиях нерегулярного волнения

Probabilistic assessment of heeling load effect in irregular waves

В случае необходимости произвести общую оценку результата динамического действия кренящей нагрузки, имеющую более полный характер и включающую действие кренящей нагрузки в произвольный момент времени, следует воспользоваться соотношением (4) в полном виде.

Речь идет о накрениении судна с произвольными и случайными параметрами: углом  $\theta_H$  и скоростью  $\dot{\theta}_H$ . Решение задачи будет состоять в определении вероятности того, что динамический угол крена превысит произвольно выбранную величину  $\theta_0^*$  при заданном кренящем моменте  $M_K$ . Для каждой реализации указанное условие на основе равенства (4) состоит в том, что в процессе динамического наклонения судна для всех углов крена, заключенных в интервале  $\theta_H - \theta_0^*$ , работа кренящего момента будет больше разности  $A_B - K(\dot{\theta}_H)\text{sign}\dot{\theta}_H$ . Следовательно, искомая вероятность  $P(\theta_0^*)$  для всех значений углов  $\theta_H$  при условии  $\theta_H \leq \theta_0^*$  равна:

$$P_{\theta_0^*} = P[\theta_0 > \theta_0^*] = P[A_B(\theta_H, \theta_H) - K(\dot{\theta}_H)\text{sign}\dot{\theta}_H < A_K(\theta_H, \theta_H)]. \quad (5)$$

Величина, определяемая формулой (5), представляет собой обеспеченность выбранного для анализа угла  $\theta_0^*$  и для заданного кренящего момента  $M_K$  характеризует результат его воздействия. Процедура (схема) расчета обеспеченности динамического угла  $\theta_0^*$  детально изложена в [2].

## Влияние волнения на поперечную остойчивость судна

Wave effect upon transverse stability

Изложенные выше методы по выбранным исходным условиям для упрощения решения задачи применяются к судну, остойчивость которого характеризуется моментом  $M_B^0$ , т.е. диаграммой остойчивости, отвечающей плаванию судна на тихой воде. При этом в реальных режимах плавания, когда судно испытывает действие волн, его

поперечная остойчивость непрерывно изменяется. Это обстоятельство рассматривалось специалистами неоднократно и отражено в целом ряде работ, например [1, 7].

Вместе с тем при решении задачи о динамическом накрениении судна внешней нагрузкой в первом приближении в чисто инженерной практике обстоятельства, отражающие влияние волнения на диаграмму остойчивости, как правило, для упрощения задачи, во внимание не принимаются. Следует иметь в виду, что наиболее наглядно влияние волнения на поперечную остойчивость проявляется при движении судна на продольных (встречных – попутных) волнах. В частности, у большинства судов остойчивость может заметно уменьшаться при попадании миделя на вершину волны, что в ряде случаев приводит к возникновению опасного крена или даже опрокидыванию судна.

Подчеркнем, что даже в требованиях к остойчивости, изложенных в Российском морском регистре судоходства [часть IV «Остойчивость», 2022 г.], влияние волнения в целом на диаграмму остойчивости в достаточной полноте во внимание не принимается, хотя само судно считается испытывающим бортовую качку.

Очевидно, что задача о накрениении судна поперечной нагрузкой является актуальной не только с точки зрения безопасности мореплавания (поведение судна на волнении). Определение динамического угла крена судна необходимо и для оценки его влияния на судовое оборудование и перевозимый груз, а также возможность возникновения интенсивного заливания.

При этом проблема безопасности судна на волнении возникает и в других условиях [13]. В их числе:

- возникновение «параметрических» бортовых колебаний,
- ситуация «бродинга»,
- «захват» судна волной,
- возникновение недопустимых линейных ускорений корпуса.

Каждая из указанных ситуаций может быть рассмотрена применительно к конкретным условиям плавания с учетом вероятностных характеристик действующих волн.

В настоящей статье рассматриваемая проблема решается достаточно упрощенно, при использовании т.н. инженерных методов для приближенной, зачастую лишь качественной оценки результата действия динамической нагрузки.

Следует, однако, отметить, что в целом ряде работ (указанных, в частности, в ссылках на литературу) изложены более сложные и потому более полные гидродинамические решения, связанные с теорией устойчивости динамических систем, что в случае необходимости дает возможность повысить достоверность результата. Известно также, что достаточно надежный результат действия на судно кренящей нагрузки может быть получен и на основе специально проведенного модельного эксперимента.

## Список использованной литературы

1. *Бородай И.К., Нецветаев Ю.А.* Качка судов на морском волнении. Ленинград : Судостроение, 1969. 432 с.
2. *Бородай И.К., Нецветаев Ю.А.* Мореходность судов. Ленинград : Судостроение, 1982. 287 с.
3. *Луговский В.В.* Теоретические основы нормирования остойчивости морских судов. Ленинград : Судостроение, 1971. 247 с.
4. *Луговский В.В.* Качка корабля. Санкт-Петербург : СПбГМТУ, 1999. 424 с.
5. Мореходность судов и средств океанотехники : методы оценки : [монография] / [М.Н. Богданов и др.] ; под науч. ред. И.К. Бородай. Санкт-Петербург : Крыловский государственный научный центр, 2013. 255 с.
6. *Некрасов В.А.* Вероятностные задачи мореходности судов. Ленинград : Судостроение, 1978. 303 с.
7. *Нечаев Ю.И.* Остойчивость судов на попутном волнении. Ленинград : Судостроение, 1978. 272 с.
8. *Семенов-Тянь-Шанский В.В., Благовеценок С.Н., Холодилин А.Н.* Качка корабля. Ленинград : Судостроение, 1969. 392 с.
9. *Федяевский К.К., Фирсов Г.А.* Крен судна под действием ветра. // Судостроение. 1957. № 12. С. 3–11.
10. *Фирсов Г.А.* Об остойчивости корабля под действием шквала // Известия АН СССР. Отд. техн. наук. 1945. № 7–8. С. 648–656.
11. *Abicht W.* Die Sicherheit der Schiffe im nachlaufenden unregelmäßigen Seegang // Schiffstechnik. 1972. Bd. 19, No. 97. S. 43–60.
12. *Paulling J.R.* The transverse stability of a ship in a longitudinal seaway // Journal of Ship Research. 1961. Vol. 4, No. 4. P. 37–49.
13. MSC. 1/Circ. 1627. Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability Criteria : approv. 10 Dec. 2020 / International Maritime Organization. London, 2020. [1], 58 p.

## References

1. *Boroday I.K., Netsvetayev Yu.A.* Ship motions in sea waves. Leningrad : Sudostroyeniye, 1969. 432 p. (in Russian).
2. *Boroday I.K., Netsvetayev Yu.A.* Seakeeping of ships. Leningrad : Sudostroyeniye, 1982. 287 p. (in Russian).
3. *Lugovsky V.V.* Stability norms for sea-going ships: theoretical fundamentals. Leningrad : Sudostroyeniye, 1971. 247 p. (in Russian).
4. *Lugovsky V.V.* Ship motions. St. Petersburg : St. Petersburg State Maritime Technical University, 1999. 424 p. (in Russian).
5. Seakeeping of ships and marine platforms: assessment methods. Monograph / M.N. Bogdanov [et al.] ; Science editor I. Boroday. St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2013. 255 p. (in Russian).
6. *Nekrasov V.A.* Seakeeping of ships: probabilistic problems. Leningrad : Sudostroyeniye, 1978. 303 p. (in Russian).
7. *Nechaev Yu.I.* Stability of ships in following waves. Leningrad : Sudostroyeniye, 1978. 272 p. (in Russian).
8. *Semenov-Tyan-Shansky V.V., Blagoveshensky S.N., Kholodilin A.N.* Ship motions. Leningrad : Sudostroyeniye, 1969. 392 p. (in Russian).
9. *Fedyayevsky K.K., Firsov G.A.* Wind-induced heeling of ships // Sudostroyeniye. 1957. No. 12. P. 3–11 (in Russian).
10. *Firsov G.A.* Ship stability in squall // Transactions of Russian Academy of Sciences. Department of Technical Sciences. 1945. No. 7–8. P. 648–656 (in Russian).
11. *Abicht W.* Die Sicherheit der Schiffe im nachlaufenden unregelmäßigen Seegang // Schiffstechnik. 1972. Bd. 19, No. 97. S. 43–60.
12. *Paulling J.R.* The transverse stability of a ship in a longitudinal seaway // Journal of Ship Research. 1961. Vol. 4, No. 4. P. 37–49.
13. MSC. 1/Circ. 1627. Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability Criteria : approv. 10 Dec. 2020 / International Maritime Organization. London, 2020. [1], 58 p.

---

## 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.: +7 (812) 415-49-88. E-mail: bik.33@mail.ru.

*Курчуков Константин Викторович*, начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 748-64-17. E-mail: k\_kurchukov@ksrc.ru.

*Платонов Виктор Георгиевич*, к.т.н., начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-48-49. E-mail: [viplat@mail.ru](mailto:viplat@mail.ru).

#### **About the authors**

*Igor. K. Boroday*, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Mos-

kovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-49-88. E-mail: [bik.33@mail.ru](mailto:bik.33@mail.ru).

*Konstantin V. Kurchukov*, Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 748-64-17. E-mail: [k\\_kurchukov@ksrc.ru](mailto:k_kurchukov@ksrc.ru).

*Viktor G. Platonov*, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-48-49. E-mail: [viplat@mail.ru](mailto:viplat@mail.ru).

Поступила / Received: 20.06.23

Принята в печать / Accepted: 23.08.23

© Бородай И.К., Курчуков К.В., Платонов В.Г., 2023