

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-19-32
УДК 629.5.024.3+629.5.017.2

В.В. Магаровский¹, К.В. Курчуков¹, В.Г. Платонов¹ , В.П. Соколов¹, М.С. Руденко²

¹ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

² ПАО «Невское ПКБ», Санкт-Петербург, Россия

РАЗРАБОТКА ФОРМЫ ОБВОДОВ НОСОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ СУДОВ ТИПА «РЕКА – МОРЕ» ПОВЫШЕННОЙ МОРЕХОДНОСТИ

Объект и цель научной работы. Целью исследования является создание обводов носовой оконечности судов типа «река – море» с повышенным коэффициентом полноты корпуса, улучшающих мореходность судна на интенсивном волнении.


Материалы и методы. Качественный анализ физической картины воздействия волны на движущееся судно с ранжированием действующих факторов и решение задачи повышения мореходности путем оптимизации обводов.

Основные результаты. Выявлены особенности воздействия интенсивного волнения на носовую оконечность судна и разработаны обводы, улучшающие мореходность корпуса с повышенной полнотой. Проведено экспериментальное исследование мореходности моделей исходного и модифицированного вариантов судна в опытовом бассейне, подтвердившее полученные результаты.

Закключение. Выполненная разработка определила одно из направлений улучшения мореходности судна с повышенной полнотой обводов типа «река – море» на интенсивном волнении.

Ключевые слова: судно «река – море», мореходность, снижение дополнительного сопротивления на волнении.
Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-19-32
UDC 629.5.024.3+629.5.017.2

V.V. Magarovsky¹, K.V. Kurchukov¹, V.G. Platonov¹ , V.P. Sokolov¹, M.S. Rudenko²

¹ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

² Nevskoe CDB, St. Petersburg, Russia

BOW SHAPE DESIGN FOR RIVER-SEA VESSELS WITH INCREASED SEAKEEPING PERFORMANCE

Object and purpose of research. The purpose of this study was to develop a bow shape with increased block coefficient for river-sea vessels so as to improve their seakeeping at high sea states.

Materials and methods. This paper qualitatively analyses the physics of wave effects upon a moving ship, ranking the contribution of specific factors and solving the task of improving the seakeeping performance through optimization of hull lines.

Main results. The study highlighted the peculiarities of intense wave effects upon ship bow and suggested the hull lines offering a good seakeeping performance for a hull with high block coefficient. Seakeeping tests of initial and modified hull models at Krylov State Research Centre Seakeeping Basin have confirmed the theoretical results.

Для цитирования: Магаровский В.В., Курчуков К.В., Платонов В.Г., Соколов В.П., Руденко М.С. Разработка формы обводов носовой оконечности судов типа «река – море» повышенной мореходности. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 4(402): 19–32.

For citations: Magarovsky V.V., Kurchukov K.V., Platonov V.G., Sokolov V.P., Rudenko M.S. Bow shape design for river-sea vessels with increased seakeeping performance. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 4(402): 19–32 (in Russian).

Conclusion. The study outlined one of the ways to improve seakeeping performance of river-sea ships with increased block coefficient at high sea states.

Keywords: river-sea ship, seakeeping, mitigation of added resistance in waves.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

За последние годы в морских транспортных перевозках заметно увеличилась доля судов смешанного плавания. Суда этого типа заходят практически во все порты Западной Европы и Российской Федерации.

Среди отечественных судов смешанного плавания постоянно растет количество судов с т.н. сверхвысокими значениями коэффициента общей полноты (не менее 0,90) [1]. Российские суда данного типа в своих размерах обычно ограничены габаритами шлюзов Волго-Балтийского водного пути и имеют длину около 140 м, ширину – до 16,9 м, осадку в реке – до 3,6 м, в море – около 4,5 м. Поэтому при ограниченных размерах судна естественно желание судостроителей повысить рентабельность грузовых перевозок такими судами за счет увеличения полноты обводов и, соответственно, их грузоподъемности. В России рост количества судов типа «река – море» с большой полнотой обводов корпуса связан с работами ООО «Морское инженерное бюро» [1, 2] и ПАО «Невское ПКБ».

Известно, что увеличение полноты обводов корпуса влечет за собой рост гидродинамического буксировочного сопротивления судна, а также обусловленного им расхода топлива или снижения скорости. Влияние полноты обводов на гидродинамическое сопротивление судов смешанного плавания и экономические аспекты повышения полноты применительно к сухогрузным судам отечественных проектов выполнено в работах [3–5]. Гидродинамические аспекты зависимости буксировочного сопротивления от коэффициента общей полноты корпуса судна в указанных работах проведены на основе анализа данных буксировочных испытаний моделей судов смешанного плавания в условиях тихой глубокой воды, полученных в Крыловском центре [3–4].

Результаты этого анализа явились основой для проведения исследования экономических показателей перевозок судов с разным коэффициентом полноты корпуса на трех маршрутах, среди которых был и чисто морской условный маршрут протяженностью около 300 миль. Скорость хода судна была принята, как на глубокой воде, так и в реке, 10,5 уз. Последнее может указывать, что учет морских

условий плавания и, в частности, волнения на экономические показатели эксплуатации судов был выполнен условно за счет, например, увеличения доли затрат на топливо [5].

Практика эксплуатации рассматриваемого типа судов показала ее транспортную эффективность как на внутренних водных путях, так и на некоторых морских линиях. Это вызвало «строительный бум», в результате которого в последнее время водный транспорт заметно пополнился судами с обводами повышенной полноты. Однако практика эксплуатации этого семейства судов частично накопила и отрицательный опыт их применения на тех линиях, где потери скорости движения судна в условиях интенсивного морского волнения могут существенно снижать транспортную эффективность перевозок. Указанная ситуация вызывает интерес судовладельцев и судостроителей к вопросу о теоретической и практической возможности создания технических решений, способных снизить или даже по возможности устранить недостатки мореходности корпусов судов с повышенной полнотой обводов.

Целью настоящего исследования явилась разработка формы обводов носовой оконечности судов типа «река – море» с увеличенной полнотой корпуса, улучшающая их мореходность на интенсивном волнении.

В качестве основы для модификации обводов корпуса был принят за базу теоретический чертеж сухогруза проекта 23530. Большая часть экспериментальных данных, приведенных в статье, получена в рамках выполнения научно-исследовательской работы по заказу ПАО «Невское ПКБ». Дополнительным условием при разработке мер увеличения мореходности и снижения дополнительного сопротивления на волнении было принято требование максимального сохранения дедевейта модернизированного судна.

Задачи исследования проблемы, поиска и создания технического решения включали следующие этапы:

- разработка теоретического чертежа модифицированного варианта носовой оконечности исходного судна смешанного «река – море» плавания большой полноты корпуса при условии максимального сохранения дедевейта, обеспечивающего снижение дополнительного сопротивления и по-

вышение навигационной мореходности при плавании на встречном нерегулярном волнении;

- проведение сравнительных мореходных испытаний на встречном нерегулярном волнении модели судна с двумя вариантами надводных обводов носовой оконечности корпуса;
- оценка снижения дополнительного сопротивления на волнении и повышение общей мореходности за счет применения модифицированной формы корпуса по сравнению с исходным корпусом в условиях встречного волнения интенсивностью 4 и 6 баллов при скорости хода 10 уз.

Авторы поставили задачу разработать обводы для судов с увеличенной полнотой корпуса, обладающие свойствами снижения отрицательного воздействия на судно трех основных действующих факторов интенсивного морского волнения:

- прямого, непосредственно действующего увеличения буксировочного сопротивления, вызванного волнением и качкой;
- косвенного, вынуждающего судоводителя снижать скорость хода во избежание повреждений корпуса от слеминга;
- косвенного, вынуждающего судоводителя снижать скорость хода во избежание зарывания носовой оконечности судна в волну, снижения остойчивости, повреждений палубного оборудования и груза.

Для поиска технического решения, направленного на выполнение поставленной задачи, необходима оценка физических факторов, обуславливающих воздействие волнения на судно и скорость его движения. Они различаются по характеру действия и значимости.

Причиной естественной потери скорости судна является дополнительное сопротивление, вызываемое волнением моря и ветром. Наиболее действенным фактором естественного снижения скорости судна на волнении является дополнительное сопротивление на волнении R_{AW} , которое суммируется с сопротивлением движению судна на тихой воде R_T и увеличивает его до более высокого значения R_{TW} .

В классических трудах по этому вопросу утвердилась формулировка, часто встречающаяся без уточнения деталей физики явления: «Дополнительное сопротивление на волнении обусловлено преобразованием энергии набегающих волн в энергию волн, генерируемых судном при вынужденной качке, и энергию дифракции, т.е. огибания и отражения набегающих волн от корпуса судна как препятствия» [8, 9].

В нашем случае, когда мы имеем пример воздействия волнения на носовую оконечность судна с по-

вышенной полнотой, описанные выше факторы по ряду причин оказываются малозначительными. Прежде всего, это происходит вследствие весьма малых амплитуд килевой и вертикальной качки этих судов, возникающей от действия встречного волнения. Одновременно с тем возрастает и становится доминирующим фактором величина ударного воздействия масс каждой из последующих волн, воздействующей на фронтальную проекцию надводной части затупленной носовой оконечности. В процессе возникновения ударов гребни волн почти полностью отдают энергию соударения судну, разрушаются и веерообразно распадаются. Именно такой характер воздействия волн на надводную часть корпуса в значительной степени подтверждает гипотезу авторов о принципиально отличающейся физике возникновения добавочного сопротивления R_{AW} у судов с повышенной полнотой обводов.

Формализация схемы действия сил, составляющих наибольшую часть дополнительного сопротивления рассматриваемого типа судов, заключается в построении физической формулы, описывающей реакцию взаимодействия массы взволнованной жидкости с носовой частью судна. При этом количество движения, описываемое как интегральная сумма произведений единичных масс жидкости на их проекции скорости в направлении судна, изменяется, отдавая часть своей энергии корпусу. Количественно импульс силы, действующий на обшивку судна, представляется при этом как произведение силы F на время взаимодействия Δt :

$$F \times \Delta t = \sum t_2 (m_i \cdot v_i) - \sum t_1 (m_n \cdot v_n), \quad (1)$$

где F – сила, действующая на судно при взаимодействии с волной, Δt – длительность взаимодействия волны с корпусом судна, t_1 и t_2 – время начала и конца взаимодействия волны с корпусом судна, m_i и v_i – i -я единица массы жидкости в волне и ее скорость относительно судна до взаимодействия с его корпусом, m_n и v_n – n -я единица массы жидкости в волне и ее скорость относительно судна после взаимодействия с его корпусом.

Из структуры формулы следует, что силу, действующую на судно при встрече с волной, можно уменьшить, растянув процесс воздействия волны на носовые образования судна. Это подтверждается практикой судостроения, при которой формы корпусов, имеющих большее заострение носовых обводов, испытывают меньшее воздействие волнения. В этом процессе взаимодействия с волнением скажется и сама геометрия заостренного корпуса,

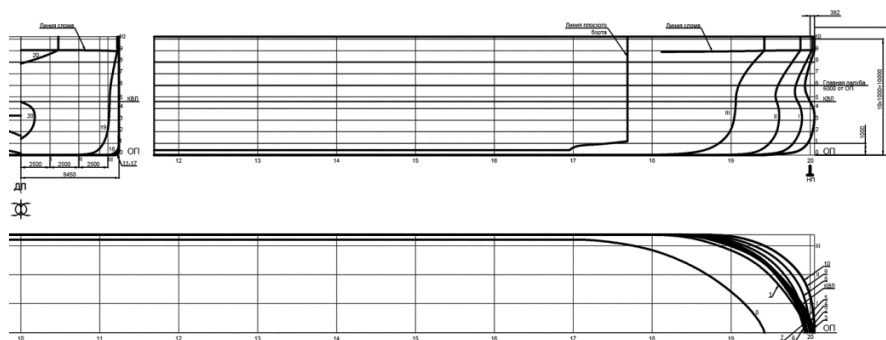


Рис. 3. Теоретический чертёж модели типового судна

Fig. 3. Lines drawing of a typical ship model

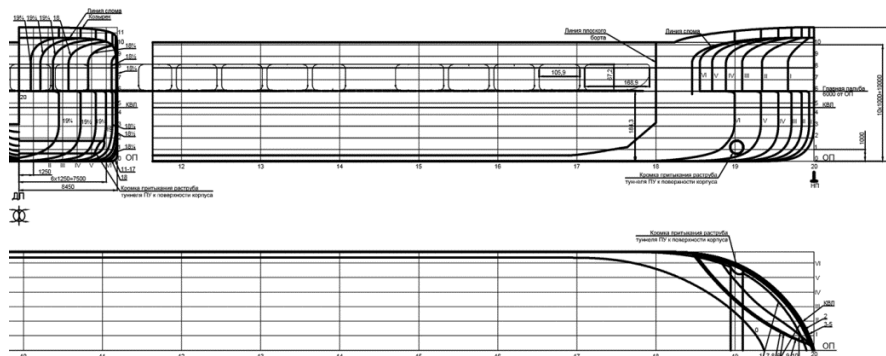


Рис. 4. Теоретический чертёж модели судна с модифицированным корпусом

Fig. 4. Lines drawing of the modified hull model

при которой проекция действующих сил на направление движения судна уменьшается.

Однако в нашем случае требование сохранить наибольшую полноту подводной части судна вследствие габаритных ограничений длины и ширины судов типа «река – море» позволяет изменить форму корпуса судна только в надводной части путем заострения ватерлиний носовой части судна, расположенных выше главной ватерлинии. Серьезным конструктивным ограничением такого решения является также положение носовой переборки первого (носового) трюма, которое не позволяет продлить заостренный участок далее, чем на две теоретических шпации от форштевня.

На основании изложенного принята конфигурация надводной части района носового заострения корпуса судна выше конструктивной ватерлинии на 1,2 м в виде ниш на правом и левом бортах, образованных горизонтальными и вертикальными участками бортовой обшивки. Такая форма надводной части корпуса при взаимодействии с волной позволяет вместо резкого удара в затупленную надводную часть судна получить растянутый по времени процесс взаимодействия корпуса с волной и одновременно отклонить часть масс воды от лобового взаимодействия.

Следующими двумя факторами, определяющими уровень мореходности, являются интенсив-

ность качки судна и обусловленный ею носовой (днищевой и бортовой) слеминг. Качка влияет на снижение скорости хода судна как физическое явление, повышающее сопротивление движению судна и снижающее эффективность работы судовых движителей, и как причина, вынуждающая судоводителя уменьшать скорость или изменять курс во избежание повреждений или смещения груза. Слеминг заставляет преднамеренно снижать скорость движения из-за опасности разрушения обшивки судна.

Разработанное техническое решение также оказывается эффективным для снижения неблагоприятного влияния и этих факторов на мореходность судна. При взаимодействии предлагаемой формы обводов носовой оконечности с набегающей волной значительная масса воды оказывается в объеме ниш и вовлекается в процесс вертикальных колебаний судна, что снижает воздействие возмущающих сил и увеличивает демпфирование качки.

Последним, но в некоторых случаях серьезным влиянием на мореходность судна в целом является фактор заливаемости. В данном случае техническое решение в виде выбранной формы носовой оконечности по самой сути заложенного принципа взаимодействия с набегающей волной призвано способствовать снижению заливаемости судна.

Проверка эффективности разработанного технического решения производилась путем экспериментального исследования моделей судна в опытовом бассейне. Объектом исследования являлась модель со съёмными носовыми оконечностями, соответствующими модифицированному и исходному вариантам судна. Буксировочные и мореходные испытания проводились на модели голого корпуса судна

с отверстиями, имитирующими каналы носового подруливающего устройства. В плоскости 19 теоретического шпангоута на модели был установлен проволочный турбулизатор диаметром 1,5 мм. На борту модели нарисованы два контура, показывающих положение двух носовых вырезов на натурном судне. Фотографии моделей приведены на рис. 1 и 2 (см. вклейку), теоретические чертежи – на рис. 3 и 4.

Таблица 1. Характеристики судна

Table 1. Ship particulars

Характеристика, единица измерения	Задано
Исходный корпус (судно в грузу)	
Длина по ватерлинии L_{WL} , м	140,70
Ширина по ватерлинии B_{WL} , м	16,90
Осадка на носовом перпендикуляре T_F , м	4,46
Осадка на мидель-шпангоуте T_M , м	4,54
Осадка на кормовом перпендикуляре T_A , м	4,63
Объемное водоизмещение судна ∇ , м ³	10 132
Весовое водоизмещение судна в морской воде D , тс	10 385
Коэффициент общей полноты C_B	0,939
Момент инерции массы судна относительно центральной поперечной оси I_{yy} , т·м ²	$1,321 \cdot 10^7$
Модифицированный корпус (судно в грузу)	
Длина по ватерлинии L_{WL} , м	141,00
Ширина на мидель-шпангоуте B_{WL} , м	16,90
Осадка на носовом перпендикуляре T_F , м	4,46
Осадка на мидель-шпангоуте T_M , м	4,54
Осадка на кормовом перпендикуляре T_A , м	4,63
Объемное водоизмещение судна ∇ , м ³	10 132
Весовое водоизмещение судна в морской воде D , тс	10 385
Коэффициент общей полноты C_B	0,937
Смоченная поверхность S , м ²	3493,8
Момент инерции массы судна относительно центральной поперечной оси I_{yy} , т·м ²	$1,332 \cdot 10^7$
Модифицированный корпус (судно в балласте)	
Длина по ватерлинии L_{WL} , м	140,7
Ширина на мидель-шпангоуте B_{WL} , м	16,9
Осадка на носовом перпендикуляре T_{f_3} , м	3,04
Осадка на мидель-шпангоуте T_M , м	3,04
Осадка на кормовом перпендикуляре T_{a_3} , м	3,04
Объемное водоизмещение судна ∇ , м ³	6542 ²⁾
Весовое водоизмещение судна в морской воде D , тс	6705
Коэффициент общей полноты C_B (фактический)	0,905
Аппликата ЦТ Z_g от ОП, м	3,44
Смоченная поверхность S , м ²	3007,4
Момент инерции массы судна относительно центральной поперечной оси I_{yy} , т·м ²	$0,913 \cdot 10^7$

Корпус модели изготовлен из пенопласта, наклеенного на деревянный скелетон. Соответствие обводов корпуса модели теоретическому чертежу судна обеспечено применением сертифицированного 5-координатного фрезерного станка с ЧПУ, формирующего обводы модели, соответствующие 3D-чертежу IGS-файла с погрешностью линейных размеров $\pm 0,2$ мм.

Программа испытаний модели судна приведена в табл. 2.

Буксировочные испытания модели в условиях тихой воды проводились для определения буксировочного сопротивления судна, а также для оценки дополнительного сопротивления модели на волне-

нии, величина которого определяется разностью измеренных буксировочных сопротивлений модели на волнении и на тихой воде при одной и той же скорости буксировки.

Результаты определения буксировочного сопротивления модели модифицированного варианта судна в грузу и балласте на тихой воде приведены на рис. 5 (см. вклейку).

Анализ приведенных результатов буксировочных испытаний модели голого корпуса модифицированного судна на тихой воде позволяет отметить следующее:

- ходовая посадка модели как в грузу, так и в балласте мало меняется с изменением скорости бук-

Таблица 2. Программа модельных испытаний в пересчете на натурные условия

Table 2. Model test program (with extrapolation to full-scale conditions)

Описание эксперимента	Условия эксперимента	Измеряемые процессы
Исходный (базовый) корпус; судно в грузу		
Испытания по определению буксировочного сопротивления	Тихая вода. Скорость буксировки: 10,0 уз	<ul style="list-style-type: none"> ▪ буксировочное сопротивление, ▪ скорость буксировки
Испытания на встречном волнении; буксировка с постоянной скоростью	Волнение: двухмерное, нерегулярное; спектр Пирсона – Московича, $H_{3\%}^{(1)} = 2,0$ м; $T_p^{(2)} = 7,7$ с; $H_{3\%} = 6,0$ м; $T_p = 9,5$ с. Скорость буксировки: 10,0 уз	<ul style="list-style-type: none"> ▪ волнение, ▪ вертикальная и килевая качка, ▪ вертикальное ускорение носовой оконечности корпуса, ▪ буксировочное сопротивление, ▪ скорость буксировки
Модифицированный корпус; судно в грузу		
Испытания по определению буксировочного сопротивления	Тихая вода. Скорость буксировки: от 2,6 до 12,1 уз	<ul style="list-style-type: none"> ▪ буксировочное сопротивление, ▪ скорость буксировки
Испытания на встречном волнении; буксировка с постоянной скоростью	Волнение: двухмерное, нерегулярное; спектр Пирсона – Московича, $H_{3\%}^{(1)} = 2,0$ м; $T_p^{(2)} = 7,7$ с; $H_{3\%} = 6,0$ м; $T_p = 9,5$ с. Скорость буксировки: 10,0 уз	<ul style="list-style-type: none"> ▪ волнение, ▪ вертикальная и килевая качка, ▪ вертикальное ускорение носовой оконечности корпуса, ▪ буксировочное сопротивление, ▪ скорость буксировки
Модифицированный корпус; судно в балласте		
Испытания по определению буксировочного сопротивления	Тихая вода. Скорость буксировки: от 2,6 до 12,1 уз	<ul style="list-style-type: none"> ▪ буксировочное сопротивление, ▪ скорость буксировки
Испытания на встречном волнении; буксировка с постоянной скоростью	Волнение: двухмерное, нерегулярное; спектр Пирсона – Московича, $H_{3\%} = 2,0$ м; $T_p = 7,7$ с; $H_{3\%} = 6,0$ м; $T_p = 9,5$ с. Скорость буксировки: 10,0 уз	<ul style="list-style-type: none"> ▪ волнение, ▪ вертикальная и килевая качка, ▪ вертикальное ускорение носовой оконечности корпуса, ▪ буксировочное сопротивление, ▪ скорость буксировки

Примечание:

¹⁾ высота волны с обеспеченностью 3 %;

²⁾ период максимума волнового спектра.

Рис. 6. Буксировочное сопротивление R_T и буксировочная мощность P_E судна проекта 23530 в грузу (базовый вариант корпуса)

Fig. 6. Towing resistance R_T and effective power P_E of a Project 23530 ship at full-load draft (initial hull)

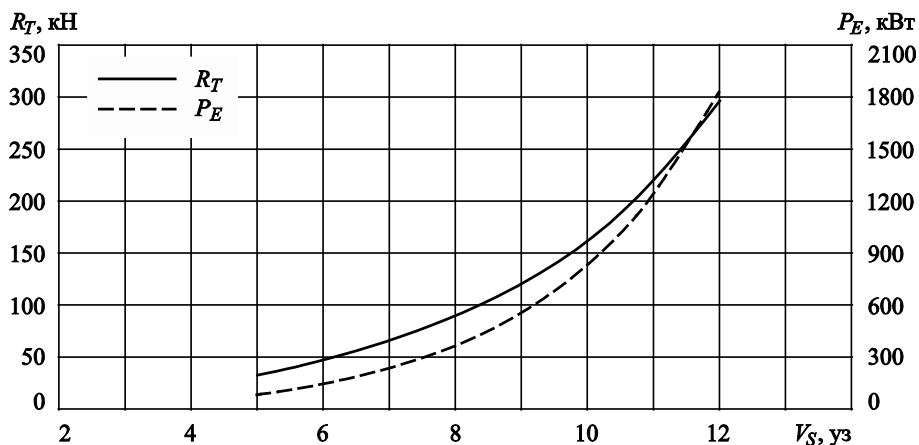
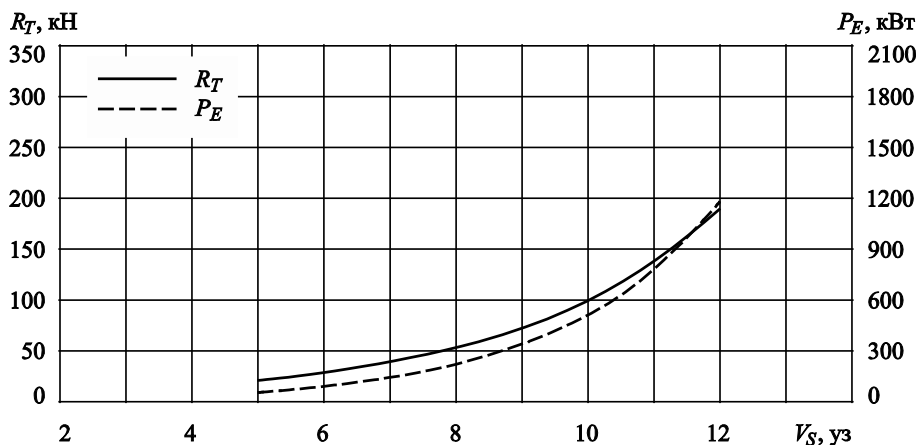


Рис. 7. Буксировочное сопротивление R_T и буксировочная мощность P_E судна проекта 23530 в балласте (базовый вариант корпуса)

Fig. 7. Towing resistance R_T and effective power P_E of a Project 23530 ship at ballast draft (initial hull)



сировки: угол ходового дифферента не превышает $0,1^\circ$ на нос, относительная просадка на мидель-шпангоуте – 0,035;

- сопротивление движению модели в грузу больше, чем у модели в балласте во всем обследованном диапазоне скорости буксировки. Так, при скорости V_m , равной 0,89 м/с ($V_S = 10$ уз), буксировочное сопротивление модели судна в грузу составляет 6,6 Н, у модели судна в балласте – 4,7 Н.

Контрольные испытания модели исходного варианта судна при грузовой посадке на тихой воде показали, что буксировочное сопротивление обоих вариантов судна должно быть практически одинаково.

Данные о буксировочном сопротивлении модели модифицированного варианта корпуса были использованы для расчета коэффициента остаточного сопротивления C_R , одинакового для модели и судна при равных числах Фруда. В расчетах принималось значение кинематической вязкости ν_m ,

равное $1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, соответствующее пресной воде при температуре $19,6^\circ \text{C}$.

Буксировочное сопротивление судна определяется по схеме Фруда для двух осадок модифицированного варианта корпуса. Расчеты проводились для голого корпуса, поэтому коэффициенты корреляционной надбавки C_A и сопротивления выступающих частей C_{AP} были приняты равными нулю.

При расчете буксировочного сопротивления значение плотности морской воды ρ принято равным $1025 \text{ кг}/\text{м}^3$, а значение коэффициента кинематической вязкости воды ν – равным $1,54 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Результаты расчета буксировочного сопротивления для модифицированного варианта корпуса судна в грузу и балласте приведены на рис. 6–7.

По результатам модельных испытаний на волнении определялись следующие статистические характеристики:

- среднее дополнительное сопротивление R_{AW} ;

- амплитуда 3%-й обеспеченности ($A_{3\%}$) килевой, вертикальной качки и вертикального ускорения носовой оконечности корпуса судна,
- среднее (A_0), максимальное (A_{\max}) и минимальное (A_{\min}) значения вертикальной, килевой качки и вертикального ускорения носовой оконечности корпуса судна.

Дополнительное сопротивление на волнении

Added resistance in waves

Среднее дополнительное сопротивление судна при движении на встречном волнении интенсивностью 4 и 6 баллов в грузу для модифицированного и исходного вариантов корпуса, а также для модифицированного варианта в балласте приведено в табл. 3 и 4.

Из данных табл. 3 следует, что дополнительное сопротивление рассматриваемого судна в модифицированном корпусе при движении со скоростью хода 10 уз меньше по сравнению с исходным судном на 6,3 % и 13,6 % соответственно на волнении силой 4 и 6 баллов.

В табл. 5–7 представлены результаты испытаний модели судна с исходным и модифицированным корпусами при движении на встречном нерегулярном волнении.

Анализ приведенных в табл. 5–7 данных о качке сухогруза на встречном волнении позволяет отметить следующее:

- качка судна в грузу и в балласте при движении на волнении силой 4 балла небольшая: для обо-

- их вариантов корпуса амплитуда килевой качки $\psi_{3\%}$ одинаковая и не превышает $0,4^\circ$, вертикальной качки $\zeta_{g3\%} = 0,2$ м; вертикальных ускорений носовой оконечности $a_{z3\%} = 0,07$ g;
- на волнении силой 6 баллов амплитуды с обеспеченностью 3 %-й качки и обусловленных ею вертикальных ускорений судна возрастают практически до одинаковых значений: килевой качки – до $2,5^\circ$, вертикальной качки – до $0,8–0,9$ м, вертикальных ускорений в носовой оконечности – до $(0,30–0,32)$ g. Однако максимальные зарегистрированные в испытаниях вертикальные ускорения в носу достигали больших значений. Так, для модели модифицированного и исходного вариантов корпуса судна оно составило $0,4$ и $0,6$ g соответственно. Такие большие ускорения вызваны ударами волн в корпус модели при слеминге.

Поведение судна на волнении оценивалось на основании визуальных наблюдений за моделью в процессе испытаний, в частности, за заливанием палубы в носовой оконечности и заливанием главной палубы через вырезы в борту. При оценке возможности возникновения слеминга судна рассматривались реализации вертикального ускорения в носовой оконечности модели. Слеминг ассоциировался на реализации импульсивным изменением вертикального ускорения, обусловленным ударами волн в корпус модели. Пример фрагмента реализации процесса вертикальных ускорений в носовой оконечности исходного варианта судна при плавании на скорости 10 уз на встречном волнении интенсивностью 6 баллов при слеминге приведен на рис. 8.

Таблица 3. Дополнительное сопротивление судна в грузу на встречном волнении при скорости 10 уз

Table 3. Added resistance at full-load draft. Head waves. Speed 10 knots

Характеристика корпуса	Дополнительное сопротивление R_{Aw} , кН	
	$H_{3\%} = 2,0$ м	$H_{3\%} = 6,0$ м
Модифицированный вариант	50,5	330,8
Исходный вариант	53,9	382,9

Таблица 4. Дополнительное сопротивление модифицированного судна в балласте на встречном волнении при скорости 10 уз

Table 4. Added resistance of modified hull at ballast draft. Head waves. Speed 10 knots

Характеристика корпуса	Дополнительное сопротивление R_{Aw} , кН	
	$H_{3\%} = 2,0$ м	$H_{3\%} = 6,0$ м
Модифицированный вариант	53,5	303,8

Таблица 5. Статистические характеристики качки модифицированного судна пр. 23530 в грузу на встречном волнении

Table 5. Statistical motion characteristics of the modified Project 23530 hull. Full-load draft. Head waves

Процесс, единица измерения	$A_{3\%}$	A_{\max}	A_{\min}	A_0
$H_{3\%} = 2,0 \text{ м}; V_S = 10,0 \text{ уз}$				
$\zeta_g, \text{ м}$	0,2	0,3	-0,2	0,1
$\psi, ^\circ$	0,4	0,4	-0,6	-0,1
a_z/g	0,06	0,07	-0,06	0,00
$H_{3\%} = 6,0 \text{ м}; V_S = 10,0 \text{ уз}$				
$\zeta_g, \text{ м}$	0,9	1,3	-1,0	0,1
$\psi, ^\circ$	2,5	2,6	-2,8	-0,1
a_z/g	0,32	0,44	-0,29	0,00

Таблица 6. Статистические характеристики качки модифицированного судна проекта 23530 в балласте на встречном волнении

Table 6. Statistical motion characteristics of the modified Project 23530 hull. Ballast draft. Head waves

Процесс, единица измерения	$A_{3\%}$	A_{\max}	A_{\min}	A_0
$H_{3\%} = 2,0 \text{ м}; V_S = 10,0 \text{ уз}$				
$\zeta_g, \text{ м}$	0,2	0,3	-0,2	0,1
$\psi, ^\circ$	0,4	0,4	-0,6	-0,0
a_z/g	0,07	0,12	-0,07	0,00
$H_{3\%} = 6,0 \text{ м}; V_S = 10,0 \text{ уз}$				
$\zeta_g, \text{ м}$	0,8	1,2	-0,9	0,1
$\psi, ^\circ$	2,4	2,6	-2,8	-0,1
a_z/g	0,30	0,50	-0,54	0,00

Таблица 7. Статистические характеристики качки исходного судна проекта 23530 в грузу на встречном волнении

Table 7. Statistical motion characteristics of the initial Project 23530 hull. Full-load draft. Head waves

Процесс, единица измерения	$A_{3\%}$	A_{\max}	A_{\min}	A_0
$H_{3\%} = 2,0 \text{ м}; V_S = 10,0 \text{ уз}$				
$\zeta_g, \text{ м}$	0,2	0,3	-0,1	0,1
$\psi, ^\circ$	0,4	0,5	-0,6	-0,1
a_z/g	0,07	0,08	-0,13	-0,01
$H_{3\%} = 6,0 \text{ м}; V_S = 10,0 \text{ уз}$				
$\zeta_g, \text{ м}$	0,9	1,1	-0,8	0,1
$\psi, ^\circ$	2,4	2,6	-2,6	-0,1
a_z/g	0,30	0,43	-0,59	0,01

|57 AccZ_9 [g] 56 Waves : max: 0.4506 min: -0.2259 mean: 0.007084 std: 0.08697 Tz: 0.5486 w: 11.45 A3%: 0.3681 Amean: 0.08034

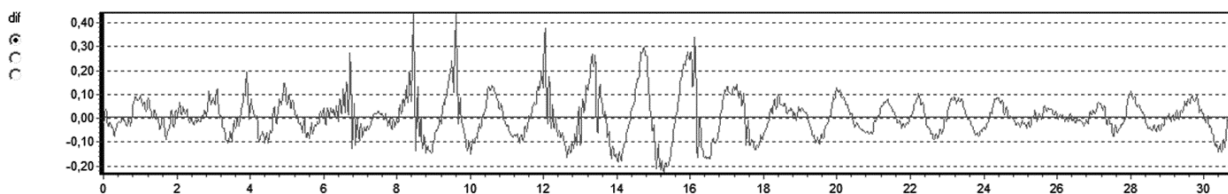


Рис. 8. Фрагмент реализации вертикальных ускорений в носовой оконечности при слеминге модели исходного варианта судна ($H_{3\%} = 6,0$ м; $V_S = 10$ уз)

Fig. 8. A time history fragment for vertical slamming accelerations in the forward of the initial hull model ($H_{3\%} = 6.0$ m; $V_S = 10$ kn)

В качестве характеристики заливания палубы принята частота возникновения этого события за 1 час плавания судна в стационарных условиях. Частота возможного попадания воды на палубу через вырезы в борту оценивалась приблизительно по факту превышения поверхностью волны нижнего уровня выреза.

Результаты оценки подверженности судна заливанию в условиях встречного волнения приведены в табл. 8–10.

На рис. 9–13 (см. вклейку) представлены фотографии, иллюстрирующие моменты поведения модели судна при движении на встречном волнении.

Как следует из данных табл. 8–10, при плавании судна в обоих вариантах корпуса (в грузу и балласте) на встречном волнении силой 4 балла с высотой волны $H_{3\%}$, равной 2,0 м, попадание сплошных масс воды на палубу отсутствует. Однако при движении исходного судна в грузу со скоростью 10 уз не исключены случаи периодического

Таблица 8. Частота заливания палубы в носовой оконечности и бортовых окон судна в грузу на встречном волнении (раз в час)

Table 8. Deck wetness frequency (times per hour) of forecastle deck and side windows of the ship. Full-load draft. Head waves

Режим плавания	Модифицированное судно		Исходное судно
	палуба	бортовые окна	палуба
$H_{3\%} = 2,0$ м	0	120	0
$V_S = 10$ уз			
$H_{3\%} = 6,0$ м	67	490	142

Таблица 9. Частота заливания палубы в носовой оконечности судна в балласте на встречном волнении (раз в час)

Table 9. Deck wetness frequency of forecastle deck. Ballast draft. Head waves

Режим плавания	Модифицированное судно	
	палуба	бортовые окна
$H_{3\%} = 2,0$ м	0	30
$V_S = 10$ уз		
$H_{3\%} = 6,0$ м	15	190

Таблица 10. Частота слеминга судна на встречном волнении (раз в час)

Table 10. Slamming frequency (times/hour) of the ship in head waves

Режим плавания	Модифицированное судно в грузу	Модифицированное судно в балласте	Исходное судно в грузу
	$H_{3\%} = 2,0$ м	0	0
$V_S = 10$ уз			
$H_{3\%} = 6,0$ м	16	36	63

зарывания носовой оконечности в волны и попадания сплошных масс воды на палубу (рис. 12).

На встречном волнении силой 6 баллов с высотой волны $H_{3\%}$, равной 6,0 м, и скорости 10 уз сухогруз при плавании по грузовую осадку подвергается сильному заливанию палубы в носу, особенно частому для исходного варианта корпуса. Так, в этих условиях плавания частота заливания палубы модифицированного варианта судна составляет 67 раз в час, в то время как для исходного судна – 142 раза в час. При плавании судна с модифицированной носовой оконечностью в балласте подверженность его заливанию существенно уменьшается – до 15 раз в час.

Движение модели судна с модифицированной носовой оконечностью на встречном волнении силой 4 балла не сопровождается заметными ударами волн в носовую оконечность корпуса. При буксировке модели судна в грузу со скоростью 10 уз для натуре в условиях встречного волнения силой 6 баллов частота носового слеминга достигает 16 раз в час, в балласте – 36 раз в час. У модели исходного судна в аналогичных условиях движения частота ударов превышает 60 раз в час.

На рис. 14 (см. вклейку) приведено сопоставление основных характеристик мореходности для двух сравниваемых вариантов корпуса судна, которые в условиях сильного волнения могут ограничить его скорость. В качестве таких характеристик рассмотрены среднее дополнительное сопротивление на волнении, амплитуды с обеспеченностью 3 %-й килевой качки, максимальная измеренная величина вертикального ускорения носовой оконечности корпуса, частота заливания палубы и частота слеминга. Из рисунка видно, что за исключением амплитуд килевой качки, которые у двух рассматриваемых вариантов одинаковые, характеристики мореходности судна с разработанными обводами носовой оконечности лучше, чем у исходного корпуса.

Результаты экспериментального исследования

Model test results

Первое. Наибольшие значения среднего дополнительного сопротивления на волнении R_{AW} наблюдаются при движении сухогруза на волнении силой 6 баллов со скоростью 10 уз. При плавании в грузу сопротивление R_{AW} достигает 330,8 и 382,9 кН соответственно для судна в обводах модели модернизированного и исходного корпусов. На встречном

волнении силой 4 балла при скорости 10 уз среднее дополнительное сопротивление не превышает 50,5 и 53,9 кН для модифицированного и исходного вариантов обводов судна.

Таким образом, при скорости хода 10 уз на встречном волнении силой 4 и 6 баллов сухогруз в обводах модели модифицированного корпуса при грузовой осадке испытывает меньшее дополнительное сопротивление по сравнению с исходным судном на 6,3 % и 13,6 %. При плавании судна в балластных условиях со скоростью 10 уз на встречном волнении силой 4 балла среднее дополнительное сопротивление несколько увеличивается по сравнению с судном в грузу (приблизительно на 6,0 %). На 6-балльном встречном волнении для судна в балласте оно уменьшается по сравнению со случаем движения судна в грузу и при скорости 10 уз достигает 303,8 кН, что приблизительно на 8,0 % меньше соответствующего значения дополнительного сопротивления судна R_{AW} при грузовой осадке, равного 330,8 кН.

Второе. Качка и обусловленные ею линейные ускорения обоих вариантов судна на исследованных режимах эксплуатации небольшие и не могут вызывать преднамеренное снижение скорости хода. Так, на встречном волнении силой 6 баллов и скорости хода 10 уз амплитуды с обеспеченностью 3 %-й качки и ускорений сухогруза в грузу не превышают 0,9 м для вертикальной и 2,5° для килевой качки, 0,3 g для вертикальных ускорений. При плавании судна в балласте указанные амплитуды близки соответствующим амплитудам для судна в грузу.

Однако для модели судна как в грузу, так и в балласте максимальные зарегистрированные в испытаниях вертикальные ускорения достигали больших значений, приблизительно 0,6 g (исходный вариант обводов) и 0,5 g (модифицированный вариант), в условиях буксировки модели на волнении интенсивностью 6 баллов со скоростью 10 уз. Такие высокие значения ускорений, создаваемые ударами волн в корпус модели, указывают на проявление слеминга.

Третье. При плавании модели судна с модифицированной носовой оконечностью в грузу и балласте со скоростью 10 уз на встречном волнении силой 4 балла слеминг не наблюдался. При буксировке модели с этой скоростью на волнении силой 6 баллов частота ударов достигает 16 раз в час для натуре, в балласте – до 36 раз в час. У исходного судна в аналогичных условиях движения частота ударов превышает 60 раз в час, что

может потребовать большего преднамеренного снижения скорости хода, чем для модифицированного судна.

Четвертое. Заливание модернизированного судна в рассмотренных условиях эксплуатации наблюдается только при движении в грузу на волнении силой 6 баллов. Наиболее часто заливание палубы происходит при скорости 10 уз. Так, частота заливания палубы в носовой оконечности судна для этих условий движения достигает 67 раз в час. У исходного судна указанная характеристика существенно больше. Так, в аналогичных условиях плавания частота заливания палубы в носу достигает приблизительно 140 раз в час.

Заключение

Conclusion

В результате проведенной научно-исследовательской работы авторы разработали альтернативные обводы носовой оконечности для судов типа «река – море» с повышенным коэффициентом полноты корпуса, позволяющие улучшить мореходность судна при плавании на интенсивном волнении. Для подтверждения эффективности указанных проектных решений выполнены сравнительные испытания мореходности моделей судов типа «река – море» с повышенной полнотой обводов: типового варианта проекта и предложенного варианта с модифицированными обводами корпуса на встречном нерегулярном волнении интенсивностью 4 и 6 баллов с высотой волны с обеспеченностью 3 % 2 м и 6 м соответственно.

В целом по результатам проведенных исследований можно отметить следующее:

- Изучение движения корпусов моделей на интенсивном встречном волнении при зарывании носовой оконечности в волну вплоть до заливания палубы показывает по характеру разрушения набегающего потока, что в процессе воздействия на судно значительная доля дополнительного сопротивления судна определяется ударным взаимодействием его надводной части борта с волной.
- Предложенная модификация обводов носовой части корпуса представляет собой выполненные в бортах углубления в виде ниш выше ватерлинии, расположенных побортно на протяжении всей длины участка носового заострения. Указанная форма существенно увеличивает заострение носовых ватерлиний в надводной части корпуса и тем самым обеспечивает плавное

отклонение набегающего потока воды. Кроме того, указанные углубления направляют и ограничивают проходящие по ним массы жидкости, что способствует уменьшению качки, снижению заливания и слеминга.

- Испытание модифицированных обводов судна типа «река – море» показало положительные результаты. При движении на волнении 6 баллов со скоростью 10 уз достигнуто существенное (13,6 %) снижение дополнительного сопротивления. На волнении силой 4 балла при той же скорости движения дополнительное сопротивление R_{AW} снижается на 6,3 %.
- Разработка модифицированных обводов корпуса судна с повышенным коэффициентом общей полноты выявила направление совершенствования обводов судна типа «река – море» и показала возможность дальнейшего снижения сопротивления движению судна в условиях интенсивного морского волнения.

Список использованной литературы

1. *Егоров Г.В.* О возможности создания судна смешанного река-море плавания с предельно высоким коэффициентом общей полноты // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2013. № 75(359). С. 6–14.
2. *Егоров Г.В., Егоров А.Г.* Основные принципы проектирования судов смешанного река-море плавания // Судостроение и морская инфраструктура. 2014. № 2(2). С. 48–62.
3. *Сверчков А.В., Щемелинин Л.Г.* Влияние полноты обводов корпуса на гидродинамическое сопротивление судов смешанного река-море // Транспорт Российской Федерации. 2016. № 4(65). С. 60–63.
4. *Сверчков А.В., Щемелинин Л.Г.* Гидродинамические аспекты повышения полноты обводов судов смешанного река-море плавания // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2017. Вып. 1(379). С. 26–35.
5. *Карташев А.Б., Сверчков А.В., Щемелинин Л.Г.* Экономические аспекты повышения полноты обводов сухогрузных судов смешанного река-море плавания // Транспорт Российской Федерации. 2018. № 2(75). С. 38–45.
6. ИТТС : Recommended Procedures and Guidelines : 7.5-02-07-02.1. Seakeeping Experiments : Rev.06 / Ed. Seakeeping Committee of 28th ИТТС. S.I., 2017. 28 p.
7. *Курчуков К.В., Катунин Е.Ю., Платонов В.Г.* Применение экспериментально-расчетного метода при исследовании мореходности судов смешанного плавания с различной полнотой обводов // Труды Крыловского гос. научн. центра. 2015. Вып. 88(372). С. 279–292.

8. Справочник по теории корабля : В 3 т. Т. 2 : Статика судов. Качка судов / [Ю.И. Нечаев и др.]. Ленинград : Судостроение, 1985. 440 с.
9. Холодилин А.Н., Шмырёв А.Н. Мореходность и стабилизация судов на волнении. Ленинград : Судостроение, 1976. 328 с.
10. Assessment of ship performance in a seaway : The Nordic co-operative project : «Seakeeping performance of ships». Copenhagen : Nordforsk, 1987. 91 p.
11. Experimental and Numerical Investigation of Seakeeping Performance for Sea-River Ships with Different Hull Fullness / Kurchukov K.V., Platonov V.G., Katunin E.Yu., Kuznetsov A.A. // Proceedings of the ASME 2014 33th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2014). New York : ASME, 2014. Vol. 1B : Offshore Technology. P. OMAE2014-24458 (8 p.). DOI: 10.1115/OMAE2014-24458.
9. Kholodilin A., Shmyrev A. Seakeeping and motion damping of ships in waves. Leningrad : Sudostroenie, 1976. 328 p. (in Russian).
10. Assessment of ship performance in a seaway : The Nordic co-operative project : “Seakeeping performance of ships”. Copenhagen : Nordforsk, 1987. 91 p.
11. Experimental and Numerical Investigation of Seakeeping Performance for Sea-River Ships with Different Hull Fullness / K.V. Kurchukov, V.G. Platonov, E.Yu. Katunin, A.A. Kuznetsov // Proceedings of the ASME 2014 33th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2014). New York : ASME, 2014. Vol. 1B : Offshore Technology. P. OMAE2014-24458 (8 p.). DOI: 10.1115/OMAE2014-24458.

References

1. Yegorov G. On feasibility of river-sea going vessel with maximum block coefficient // Transactions of Krylov State Research Centre. 2013. No. 75 (359). P. 6–14 (in Russian).
2. Yegorov G., Yegorov A. Main design principles for river-sea ships // Shipbuilding and Marine Infrastructure. 2014. No. 2(2). P. 48–62 (in Russian).
3. Sverchkov A., Shchemelinin L. Block coefficient effect upon hydrodynamic resistance of river-sea ships // Transport Rossiyskoy Federatsii (Rostransport). 2016. No. 4(65). P. 60–63 (in Russian).
4. Sverchkov A., Shchemelinin L. Hydrodynamic aspects of increased hull fullness for sea-river vessels // Transactions of Krylov State Research Centre. 2017. Vol. 1(379). P. 26–35 (in Russian).
5. Kartashev A., Sverchkov A., Shchemelinin L. Economic aspects of increasing block coefficient for river-sea carrier ships // Transport Rossiyskoy Federatsii (Rostransport). 2018. No. 2(75). P. 38–45 (in Russian).
6. ITTC : Recommended Procedures and Guidelines : 7.5-02-07-02.1. Seakeeping Experiments : Rev.06 / Ed. Seakeeping Committee of 28th ITTC. S. 1., 2017. 28 p.
7. Kurchukov K., Katunin Ye., Platonov V. Applying experimental & analytical method in seakeeping studies for river-sea ships with different block coefficients // Transactions of Krylov State Research Centre. 2015. Vol. 88(372). P. 279–292 (in Russian).
8. Handbook on the theory of the ship: In 3 volumes. V. 2. Ship statics. Ship motions / [Yu.I. Nechaev et al.]. Ленинград : Судостроение, 1985. 440 p. (in Russian).

Сведения об авторах

Магаровский Вячеслав Валерьевич, к.т.н., начальник отделения гидродинамики ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-65-05. E-mail: v_magarovskiy@ksrc.ru.

Курчукوف 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. <https://orcid.org/0000-0003-2987-226X>.

Соколов Виктор Петрович, к.т.н., ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 748-63-25. E-mail: vpsokolov@gmail.com.

Руденко Михаил Сергеевич, главный конструктор ПАО «Невское ПКБ». Адрес: 199106, Россия, Санкт-Петербург, Галерный проезд, 3. Тел.: +7 (812) 635-02-77. E-mail: m.rudenko@npkb.ru.

About the authors

Viacheslav V. Magarovskiy, Cand. Sci. (Eng.), Head of Hydrodynamic division, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-65-05. E-mail: v_magarovskiy@ksrc.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.

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. <https://orcid.org/0000-0003-2987-226X>.

Viktor P. Sokolov, Cand. Sci. (Eng.), Lead Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 748-63-25. E-mail: vpsokolov@gmail.com.

Mikhail S. Rudenko, Chief Designer, Nevskoe Design Bureau. Address: 3, Galerny Proezd, St. Petersburg, Russia, post code 199106. Tel.: +7 (812) 635-02-77. E-mail: m.rudenko@npkb.ru.

Поступила / Received: 27.07.22
Принята в печать / Accepted: 14.10.22
© Коллектив авторов, 2022



Рис. 1. Модель с исходной формой корпуса судна
Fig. 1. Initial hull model

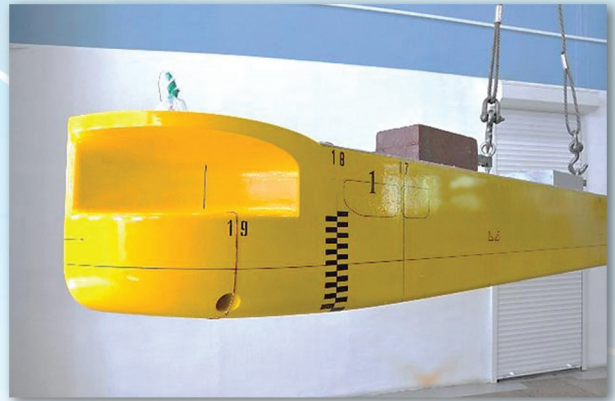


Рис. 2. Модель судна с модифицированным корпусом
Fig. 2. Modified hull model

Рис. 5. Зависимость буксировочного сопротивления R_{Tm} модели модифицированного варианта судна от скорости буксировки V_m на тихой воде
Fig. 5. Towing resistance R_{Tm} of the modified hull model as function of still-water towing speed V_m

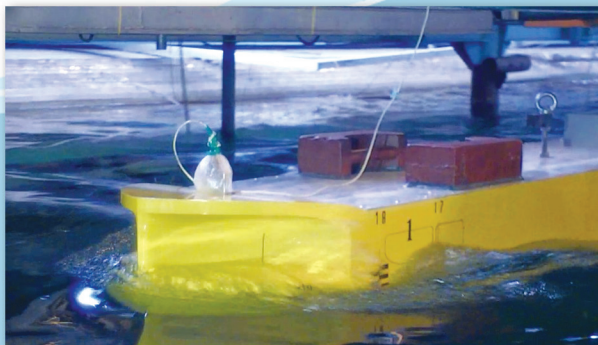
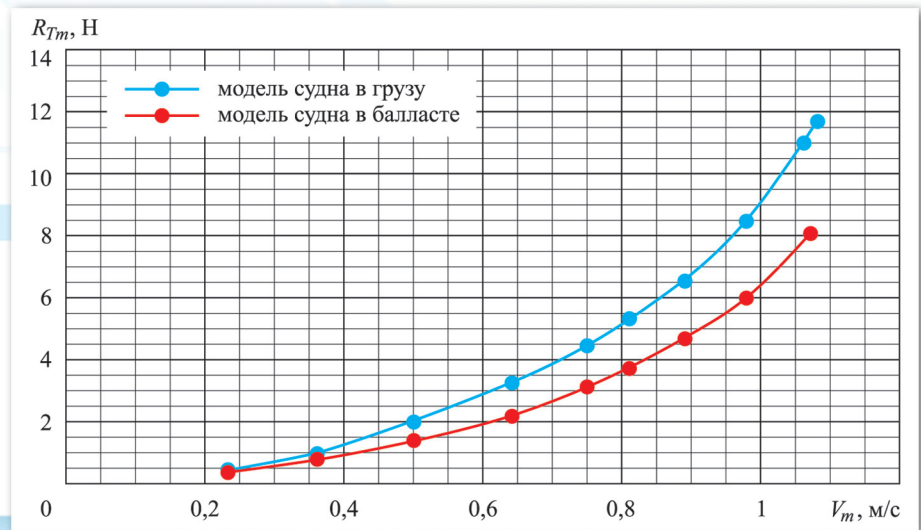


Рис. 9. Модель судна (модифицированный корпус) в грузу при плавании со скоростью 10 уз на встречном волнении силой 4 баллов
Fig. 9. Modified hull model. Full-load draft. Speed 10 knots. Head waves (sea state 4)

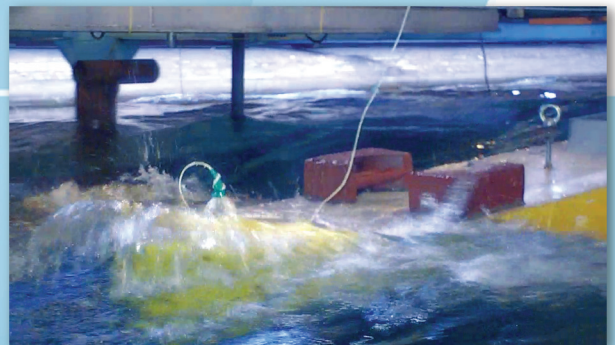


Рис. 10. Модель судна (модифицированный корпус) в грузу при плавании со скоростью 10 уз на встречном волнении силой 6 баллов
Fig. 10. Modified hull model. Full-load draft. Speed 10 knots. Head waves (sea state 6)

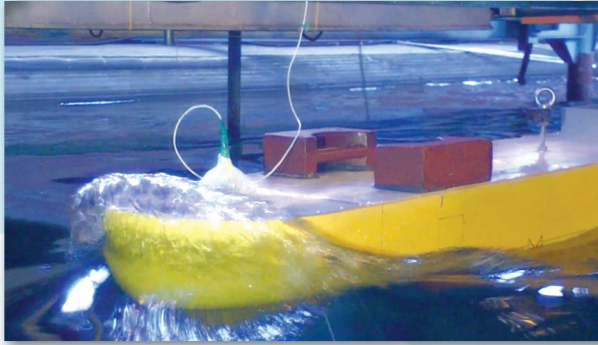


Рис. 11. Модель судна (исходный корпус) в грузу при плавании со скоростью 10 уз на встречном волнении силой 4 балла

Fig. 11. Initial hull model. Full-load draft. Speed 10 knots. Head waves (sea state 4)

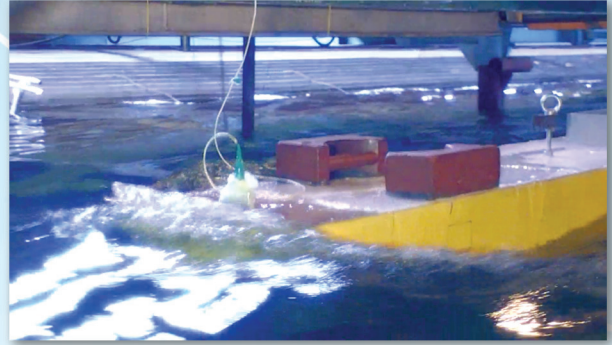


Рис. 12. Модель судна (исходный корпус) в грузу при плавании со скоростью 10 уз на встречном волнении силой 6 баллов

Fig. 12. Initial hull model. Full-load draft. Speed 10 knots. Head waves (sea state 6)

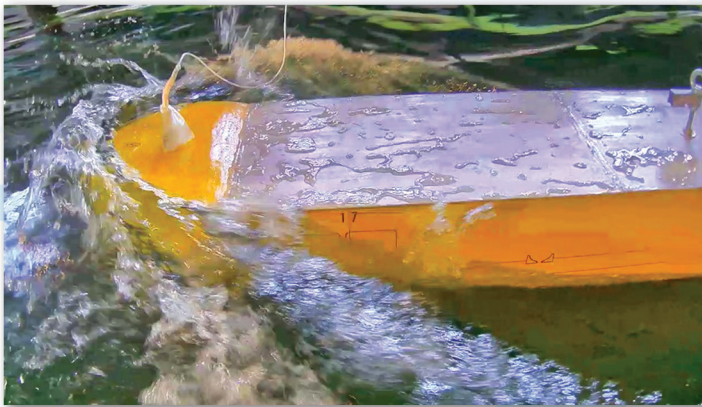


Рис. 13. Модель судна (модифицированный корпус) в балласте при плавании со скоростью 10 уз на встречном волнении силой 6 баллов

Fig. 13. Modified hull model. Ballast draft. Speed 10 knots. Head waves (sea state 6)

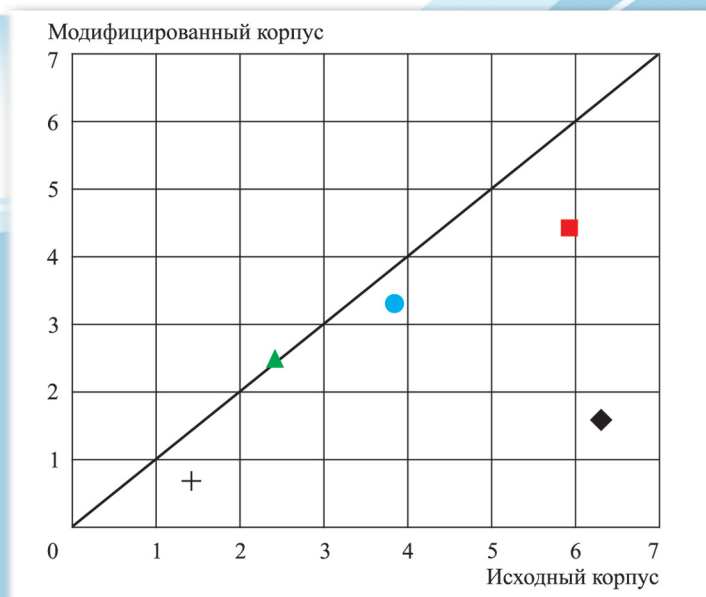


Рис. 14. Сравнение характеристик мореходности модифицированного и исходного корпуса сухогруза в грузу при движении на встречном волнении силой 6 баллов при скорости 10 уз

Fig. 14. Comparison of seakeeping performance for the initial and the modified hull at full-load draft. Head waves (sea state 6). Speed 10 knots

- дополнительное сопротивление $R_{AW} \times 10^{-2}$, кН;
- ▲ амплитуда килевой качки, $\psi_{3\%}$;
- максимальная величина вертикального ускорения $(a_z/g)_{\max} \times 10$;
- ◆ частота заливания палубы в носовой оконечности $N_{\text{зал}} \times 10^{-2}$, раз в час;
- +
- частота слеминга $N_{\text{слем}} \times 10^{-1}$, раз в час