

УДК 629.5.01

doi: 10.18698/0536-1044-2022-6-26-35

Влияние перепроектирования конструкции корпуса судна под аддитивное производство на характеристики остойчивости

А.В. Дектярев¹, П.Г. Зобов², М.В. Муленкова³, В.Н. Морозов¹

¹ Калининградский государственный технический университет

² Институт судостроения и морской арктической техники

³ АО «СПМБМ «Малахит»

Influence of Redesign of the Vessel Hull Structure for Additive Manufacturing on Stability Characteristics

A.V. Dektyarev¹, P.G. Zobov², M.V. Mulenkova³, V.N. Morozov¹

¹ Kaliningrad State Technical University

² Institute of Shipbuilding and Marine Arctic Technology

³ JSC «SPMBM «Malachite»

Рассмотрена проблема изменения характеристик остойчивости судна вследствие оптимизации конструкции корпуса и увеличения массы из-за выбора полилактида в качестве корпусного материала для производства аддитивными технологиями. Выполнен расчет характеристик остойчивости корпуса маломерного судна типа байдарки «Нерль» в двух приближениях: в первом — для стандартного судна-прототипа из стеклопластика массой 35 кг, во втором — для разрабатываемого под аддитивное производство проекта из полилактида массой 70 кг. Остойчивость корпуса судна рассчитана согласно требованиям Российского Речного Регистра с помощью программного обеспечения FreeShip+ и Hydromax. Выяснено, что не все характеристики остойчивости (максимальное плечо восстанавливающего момента) судна-прототипа соответствуют требованиям регистра, тогда как для проекта судна аддитивного производства все требования выполнены. Результаты исследования могут быть полезны судостроительным предприятиям, планирующим организовать 3D-печатное изготовление продукции.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, остойчивость судна, судостроение, оптимизация конструкции корпуса, маломерное судно

The article considers the problem of changing vessel stability characteristics due to the optimization of the hull design and the increase in mass due to the choice of polylactide as a hull material for manufacturing by additive technologies. The stability characteristics of a small vessel hull of the "Nerl" kayak type was calculated in two approximations: in the first - for a standard prototype vessel made of fiberglass weighing 35 kg, in the second - for a project under development for additive manufacturing using polylactide weighing 70 kg. Stability was calculated according to the requirements of the Russian River Register using the FreeShip+ and Hydromax software. It was found that not all stability characteristics of the prototype vessel (maximum restoring moment arm) meet the requirements of this register, while for the projected vessel of additive manufacturing all requirements are met. The results of the study may be useful to shipbuilding enterprises planning to organize manufacturing products by 3D printing.

Keywords: additive technologies, 3D printing, vessel stability, shipbuilding, hull design optimization, small ship

При проектировании, технологической проработке, изготовлении и эксплуатации нового инженерного объекта требуется выполнить большой объем работ. В судостроении для организации производства судовых корпусных конструкций по новой экспериментальной технологии также имеется комплекс минимально допустимых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Некоторые такие работы для аддитивного производства судовых корпусных конструкций, в частности для 3D-печати корпуса маломерного судна типа байдарки «Нерль», описаны в исследованиях [1–5]. Однако для дальнейшего проектирования корпуса судна необходимо рассчитать его мореходные характеристики, в том числе остойчивость.

Байдарка, как правило, имеет заметную килеватость, хорошие динамические характеристики движения (способность преодолевать встречный возмущенный поток) и значительную скорость. Две последние характеристики являются ее преимуществами перед другими типами туристских судов. Кроме того, остойчивость килеватого корпуса байдарки возрастает по мере погружения [6].

Устойчивость на курсе и остойчивость байдарки зависят от массы, скорости и динамических характеристик (в частности, обводы и форма ее подвижной части влияют на минимальное лобовое сопротивление и всхожесть на вал). Быстрая массивная байдарка не только более устойчивая и устойчивая в валах, но и легче противостоит изменению курса в потоках разной скорости и противотоках [7].

Суда типа каяков, по конструкции практически не отличающиеся от байдарок, имеют два вида остойчивости: первичную и вторичную, которые необходимо учитывать. Широкий каяк с плоским дном на тихой воде имеет достаточный запас первичной остойчивости, однако при волнении будут наблюдаться сильные крен и качка. Байдарки гоночного типа (длинные и узкие каяки) имеют низкую первичную остойчивость: на тихой воде без движения им необходимо придавать точку опоры для поддержания равновесия.

Каяки, как правило, немного шире по ватерлинии, чем палуба, что обеспечивает им хорошую вторичную остойчивость — способность поддерживать судно на ходу без опрокидывания при постоянном крене. Кроме того, остойчивость судов такого типа зависит от их

ширины, формы дна, высоты, массы и объема [8].

При 3D-печатном изготовлении корпуса судна, являющегося для аддитивных технологий достаточно крупногабаритным объектом, возникает проблема изменения его характеристик вследствие перепроектирования конструкций для удовлетворения требований Российского Речного Регистра (РРР) по прочности.

Эта проблема, а следовательно, и увеличение массы корпуса возникает ввиду ограниченности материалов для 3D-печати, несовершенства технологий аддитивного производства, проигрышу по прочностным характеристикам традиционным полимерным конструкционным материалам, а также традиционным технологиям формования, необходимости в выполнении обязательных требований РРР.

Цель работы — проведение расчетов характеристик остойчивости корпусов маломерного судна «Нерль» (прототипа из стеклопластика и перепроектированной под аддитивное изготовление конструкции) для выявления отклонений от требований классификационного общества.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Для судов внутреннего плавания характеристиками, обеспечивающими безопасность, являются остойчивость и непотопляемость [9]. В РФ требования к указанным качествам судов установлены Правилами РРР [10].

Способы пересчета характеристик остойчивости судов методами аффинного подобия проекта и прототипа [11–13] считаются достаточно точными. Однако применение этих методов ограничено требуемым подобием, т. е. сохранением для проекта значений коэффициентов полноты α , β , δ , φ и отношения высоты борта к осадке H/T прототипа. С ростом количества отличий проекта от прототипа проявляется неточность при пересчете остойчивости [14, 15].

В рассматриваемом случае значения параметров α , β , δ , φ и H/T у проекта и прототипа практически не различаются. Главное изменение проекта заключается в технологии его изготовления.

В качестве корпусного материала проекта выбран полилактид (PLA), практически не применяемый в судостроении, но обладающий относительно неплохими прочностными харак-

теристиками по сравнению с другими термопластами [2, 3], пригодными для аддитивного производства.

Однако по физико-механическим характеристикам PLA значительно уступает материалу прототипа — стеклопластику [16, 17]. Кроме того, литые образцы имеют несколько лучшие прочностные свойства, чем напечатанные [18, 19], включая изделия из PLA [3]. Поэтому проектная конструкция корпуса оптимизирована для удовлетворения требованиям РРР по прочности.

Перепроектирование корпуса для аддитивного производства заключалось в пересчете толщин обшивки корпуса прототипа со встроенным набором. Схема набора — смешанная, продольные связи корпуса интегрированы в обшивку. Все толщины со встроенным в них набором увеличены на 2...3 мм.

В результате толщина обшивки днища составила 9 мм с плавным переходом к 7 мм в оконечностях, толщина борта с интегрированным

стрингером — 19 мм, толщины комингсов — 10,0...18,5 мм. Поперечные связи, выполняющие роль монтажных площадок для склеивания обшивки, имели толщину 15...21 мм. В штевнях были предусмотрены усиленные оконечности толщиной 30,5 мм с плавным переходом в толщины днища.

Конструкция корпуса спроектирована с помощью программы моделирования поверхностей FreeShip+. Эта программа не предоставляет возможности вывода тел, поэтому для перевода поверхности в пригодное для печати твердое тело и придания ей толщины тело получалось путем замыкания оболочки корпуса в Inventor. Для создания полости использована операция булева вычитания тел с коэффициентом масштаба 0,983 и смещением вычитаемого тела к палубе, что привело к созданию итоговой формы.

В результате изменения конструкции масса корпуса возросла в 2 раза (с 35 до 70 кг). В зарубежной работе [20] показано, что после пе-

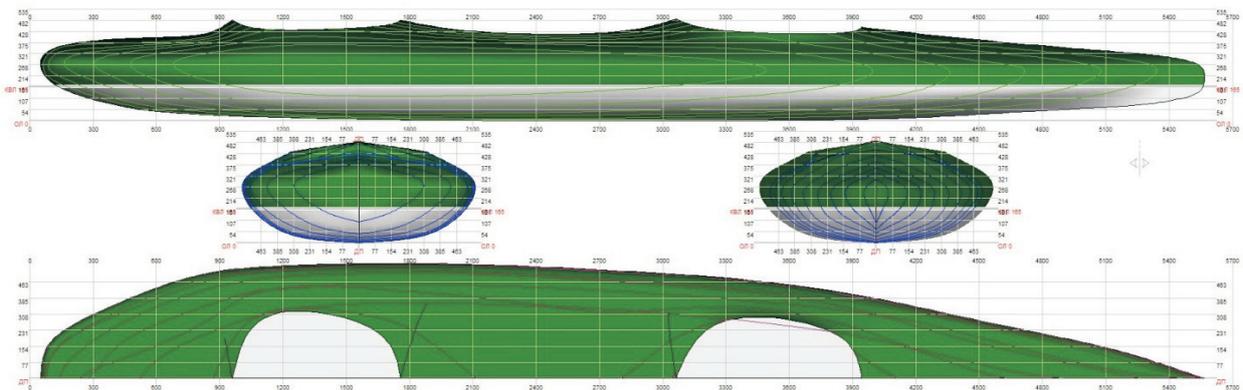
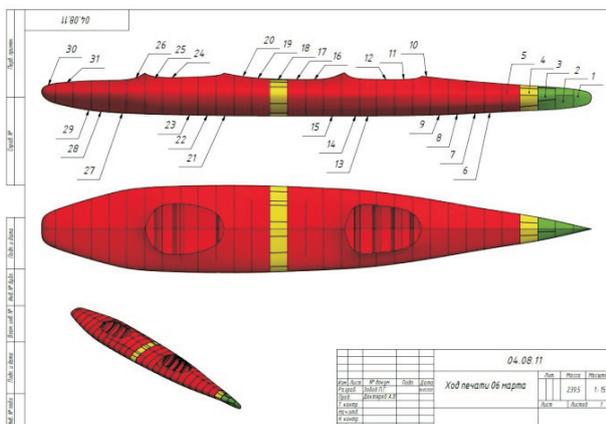
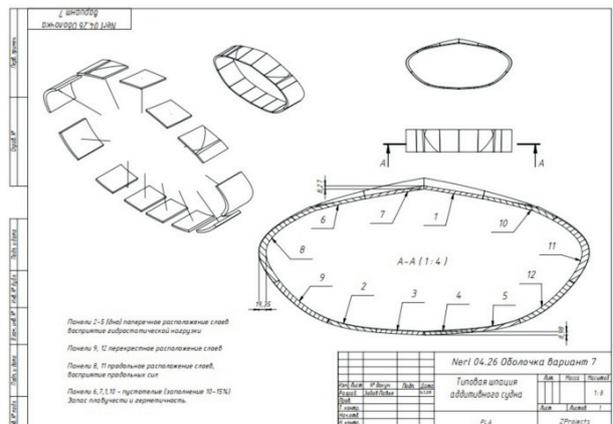


Рис. 1. Теоретический чертеж корпуса судна-прототипа



а



б

Рис. 2. Схемы разбивки на элементы корпуса судна «Нерль» (а) и типового шпангоута (б)

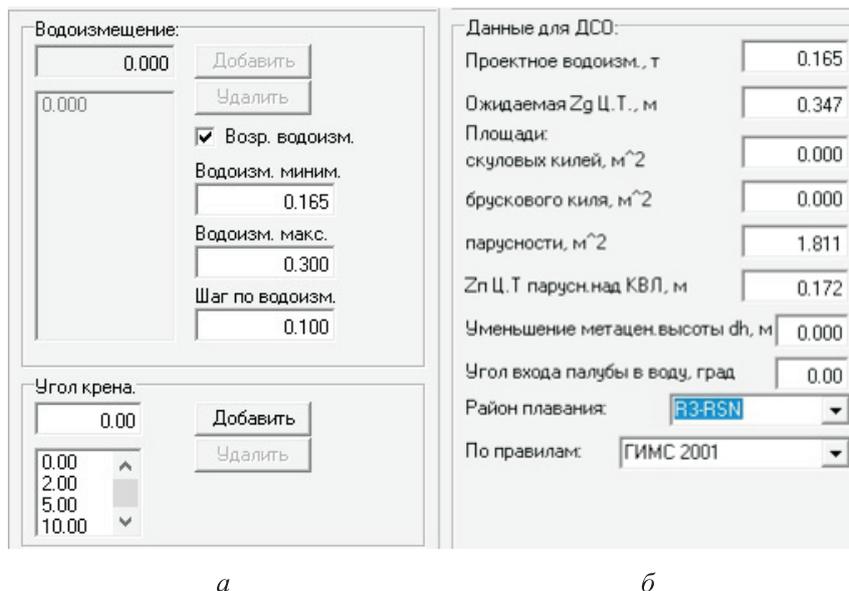


Рис. 3. Исходные данные для расчета остойчивости корпуса судна-прототипа (а) и построения ДСО (б)

репроектирования корпуса под аддитивное производство его масса увеличивается в 4–5 раз. Это свидетельствует о продвижении технологий аддитивного производства в плане оптимизации работы как с материалами, так и с крупногабаритными инженерными конструкциями.

Расчет остойчивости корпуса байдарки «Нерль» проведен в двух приближениях: в первом — для стандартного прототипа-судна из стеклопластика массой 35 кг, во втором — для разрабатываемого под аддитивное производство проекта судна из PLA массой 70 кг.

Расчет остойчивости корпуса судна-прототипа массой 35 кг из стеклопластика. Теоретический чертеж корпуса судна-прототипа показан на рис. 1. Расчет остойчивости выполнен согласно требованиям РРР в программе FreeShip+.

Расчет остойчивости корпуса проекта массой 70 кг из PLA. Схемы разбивки на элементы судна «Нерль» и типового шпангоута приведены на рис. 2. Расчет выполнен в программах FreeShip+ и Hydromax.

Результаты расчета остойчивости корпуса судна-прототипа в программе FreeShip+. Исходные данные для расчета остойчивости корпуса судна-прототипа и построения диаграммы статической остойчивости (ДСО) приведены на

рис. 3. Полученные в программе FreeShip+ ДСО и диаграмма динамической остойчивости (ДДО) показаны на рис. 4.

Основные параметры судна-прототипа и дополнительные параметры ДСО, рассчитанные согласно требованиям РРР, приведены во втором столбце таблицы. Здесь в скобках указаны минимальные значения параметров, а также введены следующие обозначения: ЦВ — центр величины; ВЛ — ватерлиния; ЦТ — центр тяжести; ДП — диаметральной плоскости; МШ — мидель-шпангоут.

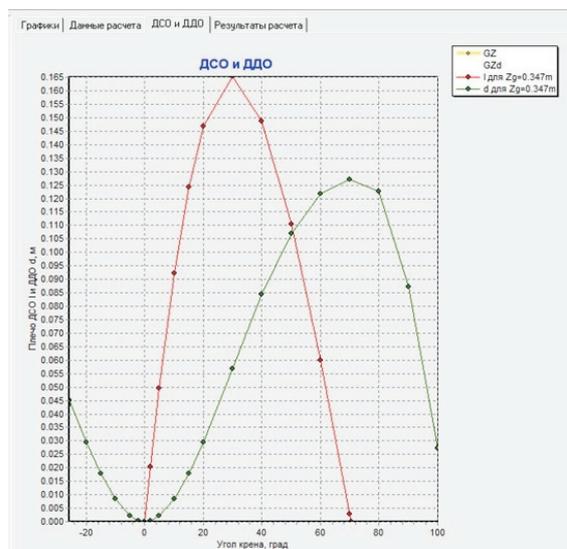


Рис. 4. ДСО и ДДО судна-прототипа, полученные в программе FreeShip+

Основные параметры и дополнительные расчетные параметры ДСО для корпуса прототипа и проекта

Параметр	Значение	
	для прототипа	для проекта
Объемное водоизмещение, м ³	0,161	0,224
Водоизмещение, т	0,165	0,230
Полная длина/ширина погруженного тела, м	5,032/0,854	5,205/0,908
Коэффициент общей/вертикальной полноты	0,4170/0,6005	0,4315/0,6181
Призматический коэффициент	0,6413	0,6478
Смоченная площадь поверхности, м ²	3,105	3,488
Абсцисса ЦВ, м	2,437	2,451
Абсцисса/ордината/аппликата ЦВ, %	-8,357/0/0,057	-8,093/0/0,069
Площадь МШ, м ²	0,050	0,066
Коэффициент полноты МШ	0,6503	0,6660
Длина/ширина по ВЛ, м	5,032/0,854	5,205/0,908
Площадь ВЛ, м ²	2,985	3,297
Коэффициент полноты ВЛ	0,6945	0,6980
Абсцисса/ордината ЦТ площади ВЛ, м	2,477/0	2,495/0
Половина угла носового заострения, град	5,943	5,562
Поперечный/продольный момент инерции, м ⁴	0,134/3,910	0,167/4,665
Аппликата поперечного/продольного метacentра, м	0,885/24,293	-/20,878
Поперечный/продольный метacentрический радиус, м	0,828/24,235	0,743/20,809
Площадь погруженной части ДП, м ²	0,356	0,458
Абсцисса/аппликата ЦТ площади ДП, м	2,755/0,051	2,779/0,062
Проекция площади парусности на ДП, м ²	1,811	1,709
Абсцисса/аппликата ЦТ площади парусности, м	2,744/0,262	2,738/0,272
Возвышение ЦТ площади парусности над конструктивной ВЛ, м	0,172	0,162
Проверочный коэффициент остойчивости	1,196	1,389
<i>Дополнительные параметры ДСО согласно требованиям РРР</i>		
Площадь скуловых килей, м ²	0	0
Площадь брускового кия, м ²	0	0
Площадь боковой парусности, м ²	1,811	1,709
Плечо парусности, м	0,217	0,217
Начальная поперечная метacentрическая высота, м	0,581	0,805
Максимальное плечо восстанавливающего момента, м	0,165 (0,250)	0,325 (0,250)
Угол максимума плеча ДСО, град	30 (25)	40 (25)
Угол заката диаграммы, град	70,5 (60,0)	78,5 (60,0)
Исправленная метacentрическая высота, м	0,581 (0,500)	0,805 (0,500)
Плечо восстанавливающего момента при крене 30°, м	0,165	0,299
Восстанавливающий момент при крене 30°, кН·м	0,268	0,646
Допустимая скорость ветра, м/с	22,08	35,80

Расчет устойчивости корпуса проекта судна по FreeShip+. Результаты расчета ДСО, ДДО и пантокарен в программе FreeShip+ показаны на рис. 5. Основные параметры проекта судна и дополнительные параметры ДСО, рассчитанные согласно требованиям PPP, приведены в третьем столбце таблицы.

Расчет устойчивости корпуса проекта судна в программе Hydromax. В начале расчета потребовалось экспортировать поверхность судна в IGS и импортировать в MaxSurf, сохранив в проприетарном формате mds. Затем задавались нагрузки (рис. 6).

Далее проводился расчет по функциям Hydrostatic и Large angle Stability. Результаты расчета гидростатики и устойчивости корпуса проекта в виде ДСО показаны на рис. 7, а и б соответственно.

Обсуждение результатов. Анализ расчетных данных судна-прототипа показал, что максимальный угол заката ДСО (предельный угол наклона, после которого произойдет опрокидывание) составляет 67,657°. Этот угол удо-

влетворяет требованиям PPP, однако требования по максимальному плечу восстанавливающего момента не выполнены.

Как уже указывалось, значения коэффициентов полноты прототипа и проекта практически идентичны: разница между ними в среднем составляет 2,5 %.

При оптимизации корпуса под аддитивное производство его масса превысила первоначальное значение и составила 69,10 кг. В связи с этим потребовалось пересчитать результаты расчетов устойчивости корпуса судна-прототипа.

Расчеты во втором приближении показали, что для корпуса из PLA максимальный угол заката ДСО равен 60° (см. рис. 7), что удовлетворяет требованиям PPP. Также выполнены требования PPP по максимальному плечу восстанавливающего момента (0,325 м > 0,250 м), углу максимума плеча ДСО (40° > 25°), углу заката ДСО (78,5° > 60°), исправленной метацентрической высоте (0,805 м > 0,500 м).

Дополнительно показано, что расчеты ДДО и ДСО, полученные в программах FreeShip+ и Hydromax, совпадают. Таким образом, програм-

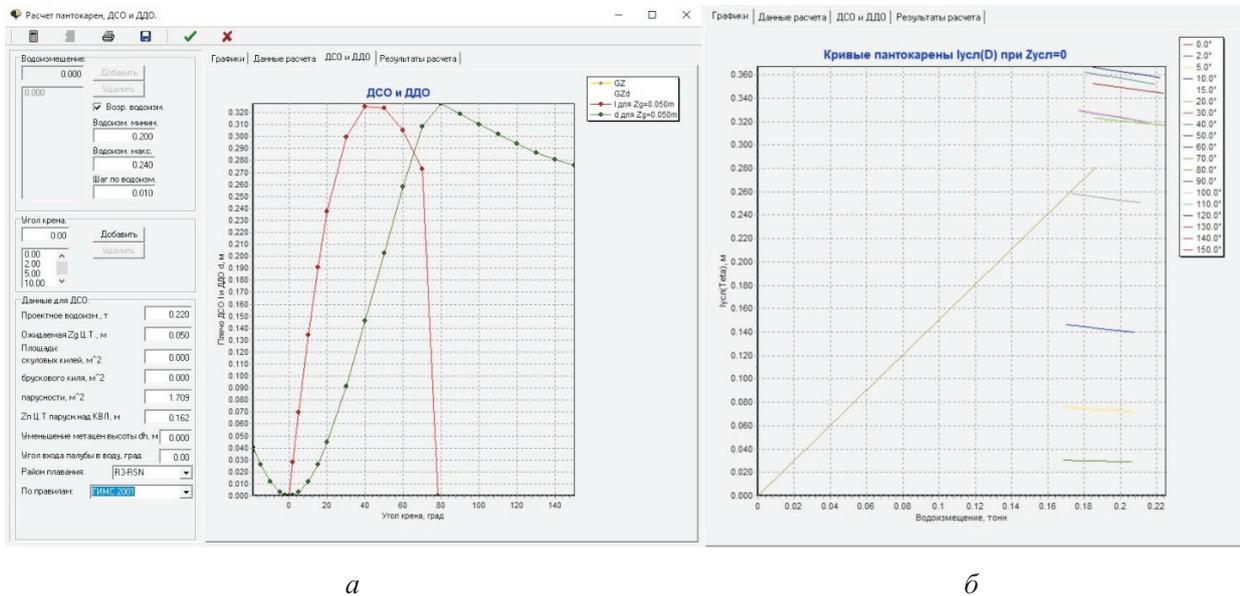


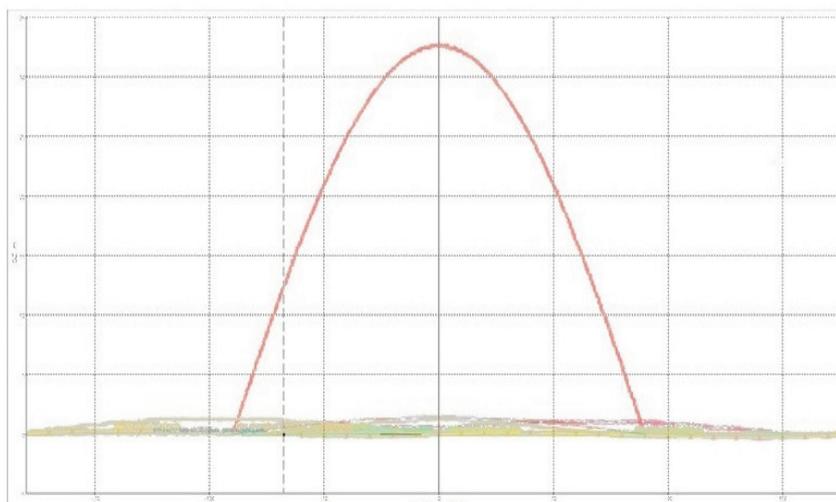
Рис. 5. Результаты расчета ДСО, ДДО (а) и пантокарен (б) для проекта судна, полученные в программе FreeShip+

	Item Name	Quantity	Sounding m	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Long.Arm m	Trans.Arm m	Vert.Arm m	Unit FSM tonne.m	Total FSM tonne.m	FSM Type
1	Person 1	1		0,065	0,065	1,200	0,000	0,454	0,000	0,000	User Specif
2	item	1		0,065	0,065	3,300	0,000	0,454	0,000	0,000	User Specif
3	Lightship	1		0,100	0,100	2,509	0,000	0,209	0,000	0,000	User Specif
4	Total Loadca				0,230	2,363	0,000	0,347		0,000	
5	FS correction							0,000			
6	VCG fluid							0,347			

Рис. 6. Нагрузки, заданные в программе Hydromax

	Draft Amidsh. m	0,165
1	Displacement tonne	0,4347
2	Heel to Starboard degrees	0,0
3	Draft at FP m	0,165
4	Draft at AP m	0,165
5	Draft at LCF m	0,165
6	Trim (+ve by stern) m	0,000
7	WL Length m	5,430
8	WL Beam m	1,018
9	Wetted Area m ²	4,362
10	Waterpl. Area m ²	3,936
11	Prismatic Coeff.	0,623
12	Block Coeff.	0,465
13	Midship Area Coeff.	0,758
14	Waterpl. Area Coeff.	0,712
15	LCB from zero pt. (+ve fwd) m	2,475
16	LCF from zero pt. (+ve fwd) m	2,502
17	KB m	0,102
18	KG m	0,347
19	BMT m	0,589
20	BML m	14,910
21	GMt m	0,344
22	GML m	14,665
23	KIMt m	0,691
24	KML m	15,012
25	Immersion (TPC) tonne/cm	0,040
26	MTc tonne.m	0,000
27	RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.	0,003
28	Max deck inclination deg	0,0
29	Trim angle (+ve by stern) deg	0,0

а



б

Рис. 7. Результаты расчета гидростатики (а) и остойчивости корпуса проекта в виде ДСО (б), полученные с помощью программы Nudgromax

му FreeShip+ можно использовать в расчетах ДСО в первом приближении в тех случаях, когда не требуется предоставлять данные в PPP.

Выводы

1. Предложена методика расчета характеристик остойчивости корпуса маломерного судна «Нерль», перепроектированного под аддитивное производство.
2. Конструкция корпуса маломерного судна «Нерль» перепроектирована под FDM-техно-

логию изготовления из PLA путем увеличения толщин обшивки со встроенным набором на 2...3 мм.

3. В результате перепроектирования изменилась масса корпуса, что привело к двухступенчатому расчету характеристик его остойчивости. Анализ результатов расчета показал, что, в отличие от корпуса из стеклопластика судна-прототипа, корпус судна из PLA удовлетворяет всем требованиям PPP к остойчивости.

Литература

- [1] Зобов П.Г., Дектярев А.В., Морозов В.Н. Современные методы 3D-сканирования при размерном анализе судовых моделей с учетом их аддитивного изготовления. *Известия КГТУ*, 2019, № 53, с. 151–161.
- [2] Дектярев А.В., Романюта Д.А., Гришин П.Р. и др. Исследование физико-механических характеристик элементов судовых корпусных конструкций на примере судовых пластин в условиях аддитивного промышленного производства. *Автоматизация в промышленности*, 2019, № 7, с. 37–39.
- [3] Дектярев А.В., Товпинец А.О., Гришин П.Р. и др. Сравнительный анализ физико-механических характеристик материалов аддитивного производства с традиционными методами литья как возможность применения 3D-печати в ремонтных работах на борту судна в рейсе в условиях Арктической зоны. *Научно-технические в машиностроении*, 2020, № 2, с. 41–48, doi: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-2020-2-41-48>
- [4] Зобов П.Г., Дектярев А.В., Морозов В.Н. Новая формула клеевого соединения для изделий из полилактида. *Вестник молодежной науки*, 2020, № 1. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42765788>
- [5] Дектярев А.В., Зобов П.Г., Николаев И.И. и др. Опыт применения 3D-печати в судомоделизме при исследовании буксировочного сопротивления маломерного судна в условиях опытового бассейна. *Известия КГТУ*, 2019, № 54, с. 166–177.

- [6] Колосов Г. К возможностям байдарки на «большой воде». В: *Ветер странствий*, вып. 11. Москва, Физкультура и спорт, 1976, с. 133–139.
- [7] Рыжавский Г.Я. Водные походы на байдарках. Москва, Физкультура и спорт, 1981. 97 с.
- [8] Стабильность каяка. *mykayak.ru: веб-сайт*. URL: <https://mykayak.ru/stabilnost-kayaka> (дата обращения: 24.03.2021).
- [9] Роннов Е.П., Шмаков В.М. Сопоставление отечественных и европейских требований к остойчивости и непотопляемости судов внутреннего плавания. *Вестник ВГАВТ*, 2012, № 31, с. 105–111.
- [10] *Российский речной регистр*. Правила. Москва, Российский Речной Регистр, 2019. 1917 с.
- [11] Ашик В.В. *Проектирование судов*. Ленинград, Судостроение, 1975. 352 с.
- [12] Ногид Л.М. *Теория проектирования судов*. Ленинград, Судпромгиз, 1955. 479 с.
- [13] Сукачева Е.В. Определение элементов остойчивости судов при аффинном преобразовании теоретического чертежа. *Тр. Мосрыбвтуза*, 1954, № 6, с. 110–118.
- [14] Раков А.И. *Оптимизация основных характеристик и элементов промысловых судов*. Ленинград, Судостроение, 1978. 231 с.
- [15] Чьонг М.К. Оценка остойчивости маломерных рыболовных судов Вьетнама на ранних стадиях проектирования. *Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология*, 2009, № 2, с. 14–18.
- [16] Красильникова О.А., Кольчурин А.И. Применение полимерных конструкционных материалов в судостроении. *European Research*, 2016, № 5, с. 22–24.
- [17] Nekliudova E.A., Semenov A.S., Melnikov B.E. et al. Experimental research and finite element analysis of elastic and strength properties of fiberglass composite material. *Magazine of Civil Engineering*, 2014, vol. 47, no. 3, pp. 25–39, doi: <http://dx.doi.org/10.5862/MCE.47.3>
- [18] Zumtick N.A., Jauer L., Kersting L.C. et al. Additive manufactured WE43 magnesium: A comparative study of the microstructure and mechanical properties with those of powder extruded and as-cast WE43. *Mater. Charact.*, 2019, vol. 147, pp. 384–397, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.11.011>
- [19] Zhao Y., Li K., Gargani M. et al. A comparative analysis of Inconel 718 made by additive manufacturing and suction casting: microstructure evolution in homogenization. *Addit. Manuf.*, 2020, vol. 36, art. 101404, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101404>
- [20] Musio-Sale M., Nazzaro P.L., Peterson E. Visions, concepts, and application in additive manufacturing for yacht design. In: *AHFE*, 2019, pp. 401–410, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20216-3_37

References

- [1] Zobov P.G., Dektyarev A.V., Morozov V.N. Modern 3D-scanning methods for dimensional analysis of ship models taking into account their additive manufacturing. *Izvestiya KGTU [KSTU News]*, 2019, no. 53, pp. 151–161. (In Russ.).
- [2] Dektyarev A.V., Romanyuta D.A., Grishin P.R. et al. Study on physical-mechanical characteristics of marine hull structures elements at the example of ship plates in additive commercial production. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2019, no. 7, pp. 37–39. (In Russ.).
- [3] Dektyarev A.V., Tovpinets A.O., Grishin P.R. et al. Comparative analysis of physical stress-strain properties of materials of additive production with common methods of casting as possibility to use 3D-printing in repair works on board ship in voyage under arctic conditions. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering]*, 2020, no. 2, pp. 41–48, doi: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-2020-2-41-48> (in Russ.).
- [4] Zobov P.G., Dektyarev A.V., Morozov V.N. New formula of adhesion joint for polylactide parts. *Vestnik molodezhnoy nauki*, 2020, no. 1. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42765788> (in Russ.).

- [5] Dektyarev A.V., Zobov P.G., Nikolaev I.I. et al. Experience of using 3D-printing in ship modeling while investigating towing resistance of a small-sized vessel in an experimental tank. *Izvestiya KGTU* [KSTU News], 2019, no. 54, pp. 166–177. (In Russ.).
- [6] Kolosov G. K vozmozhnostyam baydarki na «bol'shoi vode» [On capabilities of baidarka in “big waters”]. V: *Veter stranstviy*. Vyp. 11 [In: Wind of wander. Iss. 11]. Moscow, Fizkul'tura i sport Publ., 1976, pp. 133–139. (In Russ.).
- [7] Ryzhavskiy G.Ya. *Vodnye pokhody na baydarkakh* [Water expeditions on baidarkas]. Moscow, Fizkul'tura i sport Publ., 1981. 97 p. (In Russ.).
- [8] *Stabil'nost' kayaka* [Stability of a kayak]. *mykayak.ru: website*. URL: <https://mykayak.ru/stabilnost-kayaka> (accessed: 24.03.2021). (In Russ.).
- [9] Ronnov E.P., Shmakov V.M. *Sopostavlenie otechestvennykh i evropeyskikh trebovaniy k ostoychivosti i nepotoplyaemosti sudov vnutrennego plavaniya* [Comparison of native and foreign demands to sailing stability and subdivision of inland vessels]. *Vestnik VGAVT*, 2012, no. 31, pp. 105–111. (In Russ.).
- [10] *Rossiyskiy rechnoy registr. Pravila* [Russian river register. The rules]. Moscow, Rossiyskiy Rechnoy Registr Publ., 2019. 1917 p. (In Russ.).
- [11] Ashik V.V. *Proektirovanie sudov* [Ship design]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1975. 352 p. (In Russ.).
- [12] Nogid L.M. *Teoriya proektirovaniya sudov* [Theory of ship design]. Leningrad, Sudpromgiz Publ., 1955. 479 p. (In Russ.).
- [13] Sukacheva E.V. Determination of ship stability elements at affine transformation of lines drawing. *Tr. Mosrybvtuza*, 1954, no. 6, pp. 110–118. (In Russ.).
- [14] Rakov A.I. *Optimizatsiya osnovnykh kharakteristik i elementov promyslovykh sudov* [Optimization of main characteristics and elements for catching vessels]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1978. 231 p. (In Russ.).
- [15] Chyong M.K. Stability estimation of Vietnamese small-sized fishing vessels at early stages of their designing. *Vestnik AGTU. Ser. Morskaya tekhnika i tekhnologiya* [Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies], 2009, no. 2, pp. 14–18. (In Russ.).
- [16] Krasil'nikova O.A., Kol'churin A.I. Application of polymer construction materials in ship building. *European Research*, 2016, no. 5, pp. 22–24. (In Russ.).
- [17] Nekliudova E.A., Semenov A.S., Melnikov B.E. et al. Experimental research and finite element analysis of elastic and strength properties of fiberglass composite material. *Magazine of Civil Engineering*, 2014, vol. 47, no. 3, pp. 25–39, doi: <http://dx.doi.org/10.5862/MCE.47.3>
- [18] Zumdick N.A., Jauer L., Kersting L.C. et al. Additive manufactured WE43 magnesium: A comparative study of the microstructure and mechanical properties with those of powder extruded and as-cast WE43. *Mater. Charact.*, 2019, vol. 147, pp. 384–397, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.11.011>
- [19] Zhao Y., Li K., Gargani M. et al. A comparative analysis of Inconel 718 made by additive manufacturing and suction casting: microstructure evolution in homogenization. *Addit. Manuf.*, 2020, vol. 36, art. 101404, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101404>
- [20] Musio-Sale M., Nazzaro P.L., Peterson E. Visions, concepts, and application in additive manufacturing for yacht design. In: *AHFE*, 2019, pp. 401–410, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20216-3_37

Статья поступила в редакцию 14.04.2022

Информация об авторах

ДЕКТЯРЕВ Александр Владимирович — аспирант кафедры кораблестроения. Калининградский государственный технический университет (236022, Калининград, Российская Федерация, Советский пр., д. 1, e-mail: nwasanches@mail.ru).

ЗОБОВ Павел Геннадьевич — заведующий лабораторией теории корабля и гидромеханики. Институт судостроения и морской арктической техники (164500, Северодвинск, Российская Федерация, ул. Капитана Воронина, д. 6, e-mail: pavelzobov98@mail.ru).

МУЛЕНКОВА Маргарита Викторовна — техник. АО «СПМБМ «Малахит» (196135, Санкт-Петербург, Российская Федерация, ул. Фрунзе, д. 18, e-mail: mulenkova.rita@yandex.ru).

МОРОЗОВ Владимир Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры кораблестроения. Калининградский государственный технический университет (236022, Калининград, Российская Федерация, Советский пр., д. 1, e-mail: mvn3613@gmail.com).

Information about the authors

DEKTYAREV Alexander Vladimirovich — Postgraduate, Department of Shipbuilding. Kaliningrad State Technical University (236022, Kaliningrad, Russian Federation, Sovetsky Ave., Bldg. 1, e-mail: nwasanches@mail.ru).

ZOBOV Pavel Gennadievich — Head of the Laboratory of Ship Theory and Hydromechanics. Institute of Shipbuilding and Marine Arctic Technology (164500, Severodvinsk, Russian Federation, Kapitana Voronina St., Bldg. 6, e-mail: pavelzobov98@mail.ru).

MULENKOVA Margarita Viktorovna — Technician, JSC «SPMBM «Malachite» (196135, St. Petersburg, Russian Federation, Frunze St., Bldg. 18, e-mail: mulenkova.rita@yandex.ru).

MOROZOV Vladimir Nikolaevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Shipbuilding. Kaliningrad State Technical University (236022, Kaliningrad, Russian Federation, Sovetsky Ave., Bldg. 1, e-mail: mvn3613@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Десятьев А.В., Зобов П.Г., Муленкова М.В., Морозов В.Н. Влияние перепроектирования конструкции корпуса судна под аддитивное производство на характеристики остойчивости. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 6, с. 26–35, doi: 10.18698/0536-1044-2022-6-26-35

Please cite this article in English as:

Deptyarev A.V., Zbov P.G., Mulenkova M.V., Morozov V.N. Influence of Redesign of the Vessel Hull Structure for Additive Manufacturing on Stability Characteristics. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 6, pp. 26–35, doi: 10.18698/0536-1044-2022-6-26-35



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие

«ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ»

Авторы: Д.К. Веретимус, Н.К. Веретимус

Предназначено для самостоятельного изучения студентами специалитета пятого модуля дисциплины «Физика». Рассмотрены квантовые свойства излучения и волновые свойства микрочастиц. С помощью уравнения Шредингера решены стационарные задачи квантовой механики. Приведены ядерная модель атома Резерфорда, постулаты Бора.

В конце каждого раздела даны решения тематических задач и задания для самоконтроля.

Для студентов специалитета, изучающих дисциплину «Физика».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@baumanpress.ru; <https://bmstu.press>