

Для того чтобы исключить влияние факторов окружающей среды на результаты калибровки датчиков и максимально уменьшить погрешность, замеры выполняются тогда, когда катер просто плывет по воде (скорость равна 0), а также после того, как он набирает заданную скорость. Для повышения точности результатов использовалась разница $\Delta\sigma$ между результатами замеров напряжения корпуса (Па) при плавании катера по воде σ_0 и после набора им заданной максимальной скорости σ_{\max} :

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_0.$$

Анализ результатов расчета параметров корпуса катера 4667-1. Согласно начальным условиям проведения эксперимента с использованием МКЭ, были вычислены угол дифферента катера и сила сопротивления при объемном числе Фруда $Fr = 0-6$ и скорости в диапазоне $0...43,4$ км/ч. Результаты эксперимента [13] и моделирования представлены на рис. 7.

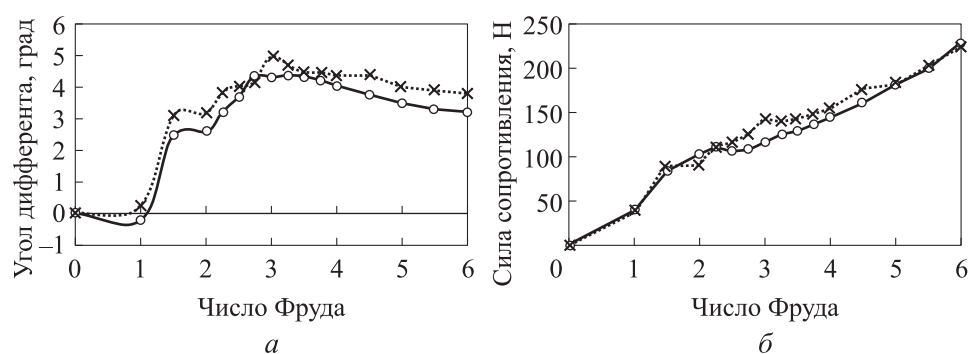


Рис. 7. Зависимости угла дифферента (а) и силы сопротивления (б) при движении катера 4667-1 по воде от числа Фруда (Fr), полученные в результате моделирования (---*) и эксперимента (—○—)

Анализ приведенных на рисунке зависимостей позволил сделать следующие выводы:

результаты моделирования МКЭ совпадают с классической гидродинамикой корабля [14]; с увеличением скорости (числа Фруда) сила сопротивления монотонно возрастает, угол дифферента сначала увеличивается, затем уменьшается, потом достигает максимума при числе Фруда $Fr = 3$;

по сравнению с результатами, взятыми из литературных источников, погрешность угла дифферента больше, чем погрешность силы сопротивления, однако средние погрешности обоих параметров находятся в приемлемых пределах (средняя погрешность силы сопротивления составляет 5,6 %, а угла дифферента — 12,8 %).

Для оценки влияния размеров КЭ в локальных зонах на результаты моделирования были выполнены дополнительные исследования. Поскольку погрешности силы сопротивления и угла дифферента достигают максимума при $Fr = 3$, дальнейшие эксперименты проводились со скоростью 21,7 км/ч. В передней и задней частях корпуса длина стороны КЭ была уменьшена с 40 мм до 20 мм (табл. 2). Сравнение приведенных в таблице данных показало следующее:

– уменьшение размеров КЭ в зоне задней части корпуса уменьшают погрешности результатов моделирования (при уменьшении размеров КЭ в зоне задней части корпуса погрешность угла дифферента снижается с 15 до 10 %, а погрешность силы сопротивления — с 22 до 8 %);

– размеры КЭ в зоне передней части корпуса незначительно влияют на погрешности результатов моделирования, и простое уменьшение их размеров может привести к увеличению погрешности, и наоборот, при уменьшении размеров КЭ в зоне передней части корпуса погрешность угла дифферента практически не изменилась, а погрешность силы сопротивления увеличилась с 22 до 36 %.

Таблица 2

Параметры корпуса катера 4667-1, полученные после эксперимента и моделирования до и после уменьшения размеров КЭ в локальных зонах

Исследование корпуса катера	Сила сопротивления, Н	Угол дифферента, град
Эксперимент	117,00	4,32
Моделирование: на основе исходной КЭМ	143,12	4,98
после уменьшения размеров КЭ в зоне передней части корпуса	159,33	5,01
после уменьшения размеров КЭ в зоне задней части корпуса	107,75	3,88
после уменьшения размеров КЭ в зоне обеих частей корпуса	111,25	3,92

Анализ параметров катера UDI005, полученных после проведения эксперимента и расчетов. Напряжения, определенные экспериментальным путем, сохранялись в компьютере через отладчик SMCU-08, а углы дифферента передавались на компьютер через приложения Witmotion. Полученный экспериментально угол дифферента корпуса катера при прямолинейном движении с различной скоростью после обработки данных представлен ниже:

Скорость катера, км/ч	0	5	10	13	15	18	20	25	32	36
Угол дифферента, град	3	7	12,3	7	5,6	5	4,3	3,9	3,7	3,5

Кроме того, при прямолинейном движении корпуса катера были экспериментально определены напряжения (см. рис. 5):

Датчик	1	2	3	4
Напряжения σ , Па	25 885,2	-10 419,2	23 768,8	-11 396

Для исследования влияния размеров КЭ на погрешность результатов расчета при прямолинейном движении с разными скоростями были определены углы дифферента в программе Star CCM+ (табл. 3), а напряжения в днище корпуса рассчитаны в программе ANSYS с помощью КЭМ трех уровней (табл. 4). Кроме того, погрешности результатов расчетов МКЭ для разных КЭМ представлены на рис. 8.

Таблица 3

Угол дифферента корпуса катера при прямолинейном движении с разной скоростью (результаты расчета)

Параметр	Скорость, км/ч									
	0	5	10	13	15	20	25	30	32	36
Угол дифферента, град	2,89	7,84	12,4	6,4	5,7	4,6	4	3,8	3,75	3,65
Погрешность, %	-3,7	12	0,8	-8,6	1,8	-8	-7	-2,6	1,4	4,3

Таблица 4

Напряжения при прямолинейном движении (результаты расчета) при разном уровне КЭМ

Параметр	Датчик			
	1	2	3	4
<i>Низкий уровень КЭМ</i>				
Напряжение, Па	23 405	-5733	21 575	-6436
Погрешность, %	-9,6	-45,0	-9,2	-43,5
<i>Средний уровень КЭМ</i>				
Напряжение, Па	25 181	-9461	22 929	-10591
Погрешность, %	-2,7	-9,2	-3,5	-7,1
<i>Высокий уровень КЭМ</i>				
Напряжение, Па	25 309	-10 072	23 111	-11 101
Погрешность, %	-2,2	-3,3	-2,8	-2,6

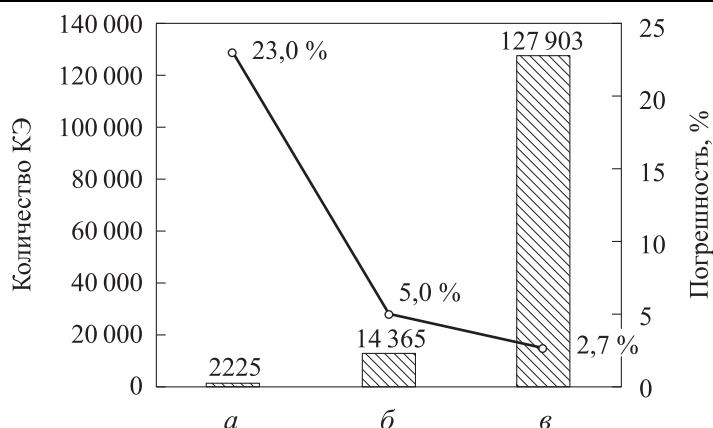


Рис. 8. Погрешности результатов расчетов МКЭ для КЭМ высокого (а), среднего (б) и низкого (в) уровня

Сравнение параметров, определенных экспериментальным и расчетным путем, привело к таким выводам:

с повышением скорости угол дифферента сначала увеличивается, а затем уменьшается (рис. 9), а при скорости около 10 км/ч он достигает максимума — около 12° . Средняя погрешность угла дифферента составляет около 5 %;

по сравнению с напряжениями при скорости, равной 0, и при движении с высокой скоростью напряжения в передней части днища корпуса катера (см. рис. 5) уменьшаются (результаты с датчиков 2 и 4 со знаком «-»), а в задней части его днища увеличиваются (результаты с датчиков 1 и 3 со знаком «+»).

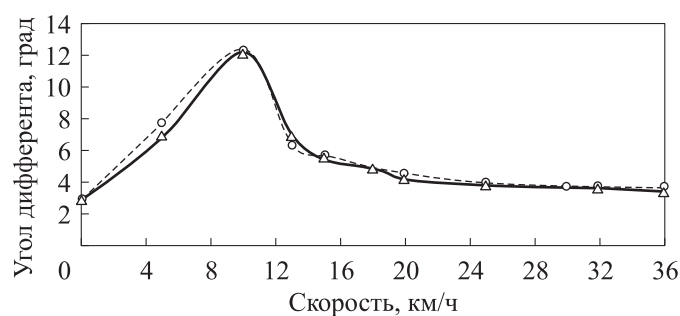


Рис. 9. Зависимость угла дифферента при прямолинейном движении корпуса катера с разными скоростями, полученного в результате моделирования (-o-) и эксперимента (-Δ-)

При движении с низкой скоростью катер находится в водоизмещающем состоянии, а угол дифферента в основном зависит от скорости движения. Когда скорость превышает критическое значение (около 10 км/ч для катера UDI005), корпус входит в воднолыжное

состояние, а угол дифферента в основном зависит от положения центра тяжести и формы корпуса. Поэтому угол дифферента сначала увеличивается с повышением скорости, а потом уменьшается. При движении с высокой скоростью угол дифферента возрастает и осадка катера уменьшается под действием потока. Площадь контакта передней части корпуса с водой сокращается и, следовательно, там снижаются напряжения, а повышение напряжения в задней части корпуса вызвано возрастанием скорости (рис. 10).

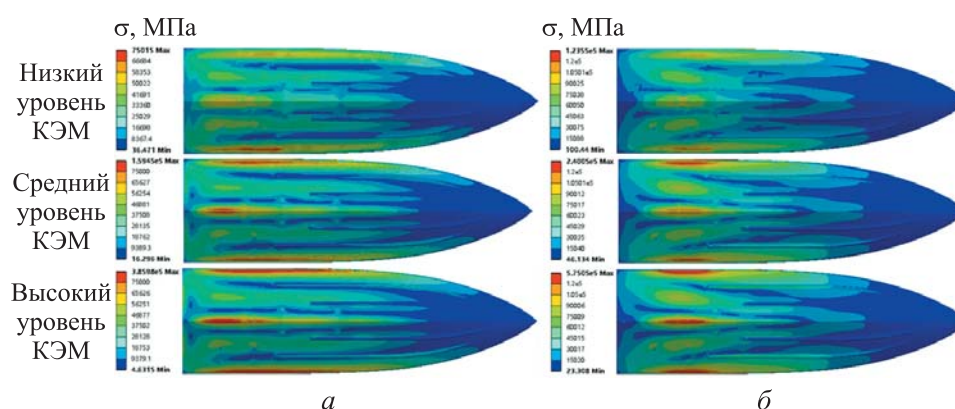


Рис. 10. Напряжения в днище кузова при прямолинейном движении по воде со скоростью 0 и 36 км/ч на базе КЭМ трех уровней

Заключение. Проведенные исследования показали, что МКЭ на базе разработанных КЭМ позволяет получить силу сопротивления движению и угол дифферента скоростной амфибийной машины в программе Star CCM+ с приемлемой для практики погрешностью: у катера 4667-1 средняя погрешность для силы сопротивления составила 5,6 %, для угла дифферента — 12,8 %, а у катера UDI005 средняя погрешность угла дифферента равнялась 5 %. При составлении КЭМ для определения силы сопротивления и угла дифферента с целью повышения эффективности расчетов рекомендуется в зоне задней части корпуса использовать сетку из КЭ меньших размеров, чем в остальных частях (при уменьшении длины КЭ на 50 % погрешность силы сопротивления снижется на 64 %, а погрешность угла дифферента — на 33 % при числе Фруда, равном 3). При расчете НДС кузова скоростных амфибийных машин на базе КЭМ среднего уровня (рациональной КЭМ) обеспечиваются достаточная точность (средняя погрешность результатов расчета при использовании КЭМ высокого уровня составляет 2,7 %, при КЭМ среднего уровня — 5 %, при КЭМ низкого уровня — 23 %) и приемлемые затраты времени на решение. Для рациональной модели рекомендуемое соотношение длин сторон КЭ к длине кузова не должно превышать 1:200 (при этом в корпусе длиной 645 мм в КЭМ длины

сторон КЭ были заданы около 3 мм и полученная для этой КЭМ средняя погрешность напряжений не превышала 5 %). Для дальнейшего повышения точности результатов можно, конечно, еще больше уменьшить размеры КЭ, что полезно для нахождения экстремальных режимов нагружения и уточнения НДС кузовов, однако это приведет к существенным возрастаниям затрат времени на расчеты и затруднит поиск оптимальных решений для них.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Степанов А.П. *Проектирование амфибийных машин*. Москва, Изд-во Мегалион, 2007, 420 с.
- [2] Афанасьев Б.А., Белоусов Б.Н., Жеглов Л.Ф. *Проектирование полноприводных колесных машин: в 3 т.* А.А. Полунгян, ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 432 с.
- [3] Ван И., Зузов В.Н. К вопросу о нахождении экстремальных режимов нагружений амфибийных машин при эксплуатации в водной среде. *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*, 2023, № 4, с. 82–96.
DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_82
- [4] Зузов В.Н. Разработка методов создания несущих систем колесных машин с оптимальными параметрами: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03, 01.02.06. Москва, 2002, 347 с.
- [5] Лю И, Зузов В.Н. Исследование влияния размеров конечных элементов на точность моделирования клеевого соединения в конструкциях. *Известия МГТУ МАМИ*, 2021, № 3, с. 31–41. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-49-3-31-41
- [6] Лю И, Зузов В.Н., Гончаров Р.Б., Сравнительное исследование напряженно-деформационных состояний склеенных и сварных конструкций автомобиля при ударных нагрузках. *Вестник Южно-Уральского Государственного Университета. Серия «Машиностроение»*, 2022, № 3, с. 64–77. DOI: 10.14529/engin220306
- [7] Ван И., Зузов В.Н., Иваненков В.В. Особенности поиска, выполняемого на основе усовершенствованного взвешенного метода TOPSIS, оптимальных конструктивных параметров каркасных элементов скоростных амфибийных машин при движении по воде. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2024-3-2341
- [8] Clement E.P., Blount D.L. Resistance tests of a systematic series of planning hull forms. *SNAME Transaction*, 1963, vol. 71 (3), pp. 491–579.
- [9] Sheppard D. Amphibious Innovation: Engineering the Aquada. *E. nz Magazine: The Magazine of Technical Enterprise*, 2005, vol. 6 (4), pp. 23–25.
DOI: 10.3316/informit.007323739318493
- [10] ГОСТ Р 70473–2022. Национальный стандарт Российской Федерации. Автомобильные транспортные средства. Безопасность перевозки грузов. Прочность структуры кузова. Технические требования и методы испытаний. Москва, Изд-во стандартов, 2023, 20 с.
- [11] Жилейкин М.М. Сравнительный анализ эффективности работы непрерывной и релейной систем управления подвеской многоосных колесных машин. *Машиностроение и компьютерные технологии*, 2012, № 3, с. 1–15. DOI: 10.7463/0813.0567732
- [12] Капралов В.М., Осипов А.В., Нгуен Н.Т. Эксперименты по оценке усталостной прочности конструкционных материалов и деталей машин. *Транспортное машиностроение*, 2018, № 8, с. 25–35.
DOI: 10.30987/article_5bb5e6a564b678.09621023

- [13] Чжан Цяобинь, Инь Чэнбинь, У Кайфэн. Сравнительное исследование методов приближенного расчета сопротивления глсссирующей лодки. *China Ship Research*, 2012, № 7, с. 25–29. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2012.03.005
- [14] Чижумов С.Д., Каменских И.В., Бурменский А.Д. *Проблемы гидродинамики корабля (численное моделирование)*. Комсомольск-на-Амуре, КнАГТУ, 2016, 122 с.

Статья поступила в редакцию 28.03.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ван И., Зузов В.Н., Иваненков В.В. Расчетно-экспериментальное обоснование выбора рациональных конечно-элементных моделей кузовов скоростных амфибийных машин применительно к оптимальному проектированию. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 5.

Ван Ичжоу — аспирант кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: scott_bah@hotmail.com

Зузов Валерий Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 130 научных работ в области исследования несущих систем колесных машин. e-mail: valeryzuz@yandex.ru

Иваненков Вячеслав Васильевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Робототехнические системы и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор 36 научных работ в области робототехники и электропривода. e-mail: ivanenkov1941@gmail.ru

Computed experimental substantiation of selecting the rational finite element models of the high-speed amphibious vehicle bodies in relation to their optimal design

© Y. Wang, V.N. Zuzov, V.V. Ivanenkov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

In order to develop the rational finite element models of the high-speed amphibious vehicle bodies in relation to their optimal design, a computed experimental substantiation was performed to select the finite elements (FE) required dimensions on the basis of experimental data obtained from literature and results of the specially conducted experiments. The study made it possible analyze the FE size influence on the computation results accuracy based on simulation in programs for hydrodynamic analysis and computation of the body stress-strain states using the finite element method (FEM). Calculation results were verified using the finite element models with different FE sizes. This paper focuses on the operating modes when moving, as they are the most hard for the body. A motorboat with a hull shape typical for the high-speed amphibious vehicles was selected as the object in computational and experimental research. After comparing main parameters obtained by computation (drag force to motion on water, trim and stress angles in the hull bottom) with the experimental data, it was concluded that FEM makes it possible to obtain calculation results with an acceptable error for the rational and high-precision finite element models. For the amphibious model, the average errors in drag force and trim angle were 5.6% and 12.8%, respectively. For a scale model, the average trim angle error was about 5%. Further research was carried out using the example of computation results for the Froude number of $Fr = 3$ with the maximum error. After reducing the FE length in the rear body area by 50%, errors of these two parameters were decreasing by 64% and 33%, respectively, which was useful in computation. To solve the problem, finite element models of the low, medium and high levels were compiled. Analysis of the results obtained using the finite element models of these three levels demonstrates that the mid-level finite element models are making it possible to ensure sufficient accuracy with the limited amount of computation time, i.e. it could be considered rational. For this model using the similarity theory, the recommended ratio of the lengths of the FE sides to the length of the body should not exceed 1:200, where the average error in the computation results of the body stress-strain state is no more than 5% compared to the experiment.

Keywords: *high-speed amphibious vehicle, computed experimental substantiation, hydrodynamic analysis, quasi-static analysis, similarity theory, FE recommended size*

REFERENCES

- [1] Stepanov A.P. *Proektirovanie amfibiynykh mashin* [Design of amphibious vehicles]. Moscow, Megalion Publ., 2007, 420 p.
- [2] Afanasyev B.A., Belousov B.N., Zheglov L.F. *Proektirovanie polnoprivodnykh kolesnykh mashin* [Design of all-wheel drive wheeled vehicles]. In 3 vols. A.A. Polungyan, ed. Moscow, BMSTU Publ., 2008, 432 p.
- [3] Wang Y., Zuzov V.N. K voprosu o nakhozhdenii ekstremalnykh rezhimov nagruzheniy amfibiynykh mashin pri ekspluatatsii v vodnoy srede [Research on extreme load mode of amphibious vehicle during operation on water]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva — Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, 2023, no. 4, pp. 82–96. https://doi.org/10.46960/1816-210X_2023_4_82

- [4] Zuzov V.N. *Razrabotka metodov sozdaniya nesushchikh sistem kolesnykh mashin s optimalnymi parametrami: Dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.05.03, 01.02.06* [Development of methods for creating load-bearing systems of wheeled vehicles with optimal parameters: Diss. ... Dr. Sc. (Eng.): 05.05.03, 01.02.06]. Moscow, 2002, 347 p.
- [5] Liu Y, Zuzov V.N. Issledovanie vliyaniya razmerov konechnykh elementov na tochnost modelirovaniya kleevogo soedineniya v avtomobilnykh konstruktsiyakh [Study of the effect of finite element dimensions on the simulation accuracy of adhesive bonding in automotive structures]. *Izvestiya MGTU "MAMI" — Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2021, no. 3, pp. 31–41. <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2021-49-3-31-41>
- [6] Liu Y, Zuzov V.N., Goncharov R.B. Sravnitelnoe issledovanie napryazhenno-deformatsionnykh sostoyaniy skleennykh i svarnykh konstruktsiy avtomobilya pri udarnykh nagruzkakh [Comparative study of stress-strain states of glued and welded car structures under shock loads]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya "Mashinostroenie" — Bulletin of the South Ural State University. Series "Mechanical Engineering Industry"*, 2022, no. 3, pp. 64–77. <https://doi.org/10.14529/engin220306>
- [7] Wang Y., Zuzov V.N., Ivanenkov V.V. Osobennosti poiska, vpolnyaemogo na osnove usovershenstvovannogo vzheshennogo metoda TOPSIS, optimalnykh karkasnykh elementov skorostnykh amfibiynykh mashin pri dvizhenii po vode [Features of the search for optimal design parameters for the frame of high-speed amphibious vehicles when moving on water through parametric optimization based on the improved weighted TOPSIS method]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2024, iss. 3. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2024-3-2341>
- [8] Clement E.P., Blount D.L. Resistance tests of a systematic series of planning hull forms. *SNAME Transaction*, 1963, vol. 71 (3), pp. 491–579.
- [9] Sheppard D. Amphibious Innovation: Engineering the Aquada. *E.nz Magazine: The Magazine of Technical Enterprise*, 2005, vol. 6 (4), pp. 23–25. <https://doi.org/10.3316/informit.007323739318493>
- [10] *GOST R 70473–2022. Natsionalnyi standart Rossiyskoy Federatsii. Avtomobilnye transportnye sredstva. Bezopasnost perevozki gruzov. Prochnost struktury kuzova. Tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy* [GOST R 70473-2022. National standard of the Russian Federation. Automotive vehicles. Safety of cargo transportation. Strength of the body structure. Technical requirements and test methods]. Moscow, Standartov Publ., 2023, 20 p.
- [11] Zhileikin M.M. Sravnitelnyi analiz effektivnosti raboty nepreryvnoy i releynoy sistem upravleniya podveskoy mnogoosnykh kolesnykh mashin [Comparative performance analysis of continuous and relay control systems for the suspension bracket of multi-wheeled vehicles]. *Mashinostroenie i kompyuternye tekhnologii — Mechanical engineering and computer science*, 2012, no. 3, pp. 1–15. <https://doi.org/10.7463/0813.0567732>
- [12] Kapralov V.M., Osipov A.V., Nguyen N.T. Eksperimenty po otsenke ustalostnoy prochnosti konstruktsionnykh materialov i detaley mashin [Assessment experiments on fatigue resistance of structural materials and machinery]. *Transportnoe mashinostroenie — Transport Engineering*, 2018, no. 8, pp. 25–35. https://doi.org/10.30987/article_5bb5e6a564b678.09621023
- [13] Zhang Q., Yin C., Wu K. Sravnitelnoe issledovanie metodov priblizhennogo rascheta soprotivleniyam glissiruyushchey lodki [Comparative study of methods for approximate calculation of the resistance of a planning boat]. *China Ship Research*, 2012, no. 7 (3), pp. 25–29. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3185.2012.03.005>

- [14] Chizhiumov S.D., Kamenskikh I.V., Burmensky A.D. *Problemy gidrodinamiki korablya (chislennoe modelirovanie)* [Problems of ship hydrodynamics (numerical simulation)]. Komsomolsk-on-Amur, KnAGTU Publ., 2016, 122 p.

Wang Yizhou, Postgraduate, Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: scott_bah@hotmail.com

Zuzov V.N., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 130 scientific papers in research of load-bearing systems of the wheeled vehicles. e-mail: valeryzuz@yandex.ru

Ivanenkov V.V., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Robotic Systems and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University. Author of 36 scientific papers in robotics and electric drives. e-mail: ivanenkov1941@gmail.ru