

**СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ СУДНА**

**SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ECOLOGICAL SAFETY
OF THE SHIP**

УДК 629.563.5

DOI: 10.37890/jwt.vi77.452

**Исследование сопротивления воды полупогружных
плавкранов различной конструкции**

М. Г. Балашов¹

ORCID: 0009-0007-8519-2134

А. Б. Ваганов²

ORCID: 0009-0008-7173-602X

Ю. Ф. Орлов²

ORCID: 0009-0005-2258-1613

А. Ю. Панов²

ORCID: 0009-0007-4879-8858

В. Н. Савинов²

ORCID: 0009-0008-4115-2031

1 Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

*2 Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,
г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. В работе рассмотрено влияние на сопротивление воды движение модели полупогружного плавучего крана на тихой глубокой воде в рабочем и транспортном положениях и разных курсовых углах. Исследования проведены в опытовом бассейне Севастопольского государственного университета. Выполненные буксировочные испытания модели позволили построить графики зависимости от числа Фруда коэффициента полного сопротивления. Каждый из представленных графиков относится к определенному горизонтальному клиренсу и курсовому углу, а также количеству промежуточных стабилизационных колонн. По полученным графикам можно оценить мощность энергетической установки, маршевых и маневровых двигателей полупогружного плавучего крана выбранной конструктивной схемы на начальных стадиях проектирования. В дальнейшем предполагается выполнить исследования по определению коэффициента дополнительного сопротивления от волнения рассмотренных случаев формы корпуса.

Ключевые слова: крановое судно, двухкорпусное полупогружное судно, модельные испытания, приборы, опытовый бассейн, сопротивление воды, критерии подбора, коэффициент сопротивления

**Investigation of water resistance of semi-submersible floating
cranes of various designs**

Michael G. Balashov¹

ORCID: 0009-0007-8519-2134

Alexander B. Vaganov²

ORCID: 0009-0008-7173-602X

Yuri F. Orlov²

ORCID: 0009-0005-2258-1613

Alexey Yu. Panov²

ORCID: 0009-0007-4879-8858

Vladimir N. Savinov²

ORCID: 0009-0008-4115-2031

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

²Nizhny Novgorod state technical university, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper considers the effect on water resistance of the movement of a semi-submersible floating crane model on quiet deep water in working and transport positions and different heading angles. The research was conducted in the experimental pool of Sevastopol State University. The performed towing tests of the model made it possible to plot the dependence of the coefficient of impedance on the Froude number. Each of the presented graphs refers to a certain horizontal clearance and heading angle, as well as the number of intermediate stabilization columns. According to the obtained graphs, it is possible to estimate the power of the power plant, mainline and shunting engines of a semi-submersible floating crane of the selected design scheme at the initial stages of design. In the future, it is planned to carry out research to determine the coefficient of additional resistance from the excitement of the considered cases of the hull shape.

Keywords: crane vessel, double-hulled semi-submersible vessel, model tests, instruments, experimental pool, water resistance, similarity criteria, resistance coefficient

Постановка задачи. В условиях гидрометеорологической обстановки, когда затруднено использование понтоновых плавучих кранов, применяют полупогружные плавучие краны (ППК). В настоящее время основной проблемой методики проектирования таких судов является отсутствие учета их конструктивных особенностей на ходовые характеристики [2,3,4,5,6,9,10,11].

Анализ известных исследований. На кафедре теории корабля Санкт-Петербургского государственного морского технического университета в опытовом бассейне были выполнены [1] экспериментальные исследования ходкости судов понтонового типа с различными по форме корпусами и оконечностями. Исследовалось влияние формы носовых и кормовых подрезов на сопротивление воды на моделях прямоугольного типа.

Настоящая работа посвящена исследованию влиянию на сопротивление в рабочем и транспортном положении горизонтального клиренса и числа колонн корпусов полупогружных плавучих кранов катамаранного типа.

Целью работы является экспериментальная оценка сопротивления воды движению ППК на начальных этапах проектирования судна в транспортном и рабочем положении на разных курсовых углах при изменении горизонтального клиренса и числа колонн в условиях тихой воды.

Критериями динамического подобия потоков жидкости при изучении сопротивления (в т.ч. ППК) используются:

$$\text{Число Фруда } Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}, \text{ и Число Рейнольдса } Re = \frac{vL}{\nu},$$

где v – скорость хода, м/с; L – расчетная длина корпуса, м; $g = 9.81$ м/с² – ускорение свободного падения; ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с.

В обычных условиях одновременное удовлетворение обоим этим критериям подобия невозможно [2].

Принятые характеристики и значения чисел модели и натуральных судов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики и расчетные числа

	Модель	КС5000	пр.16680	Balder
1.1 Скорость полного хода, v , м/с (уз)	0,47 (0,91)	5,40 (10,50)	5,14 (10)	3,08 (6)
1.2 Скорость течения v , м/с (уз)	0,16 (0,31)	1,86 (3,61)		
2. Расчетная длина судна, L , м	1,10	148,0	138,0	118,0
3. Кинематическая вязкость, m^2/c	1,171e-06			
4.1 Число Фруда Fr на полном ходу	0,1416	0,1416	0,0838	0,0906
4.2 Число Фруда Fr на течении	0,0487	0,0487	0,0504	0,0545
5. Число Рейнольдса Re	4,39e+05	5,12e+08	2,73e+08	2,33e+08

Отдельные составляющие полного гидродинамического сопротивления считаются независимыми. Сопротивление воды движению судна запишем в виде [7]

$$R_x = R_T + R_V + R_W,$$

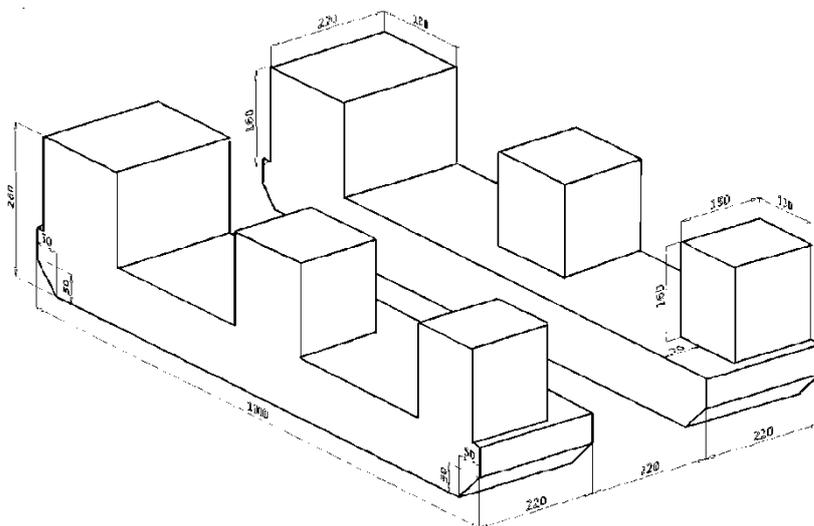
где R_T , R_V и R_W – сопротивление трения, формы и волновое соответственно.

$$R_x = \zeta \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot \Omega,$$

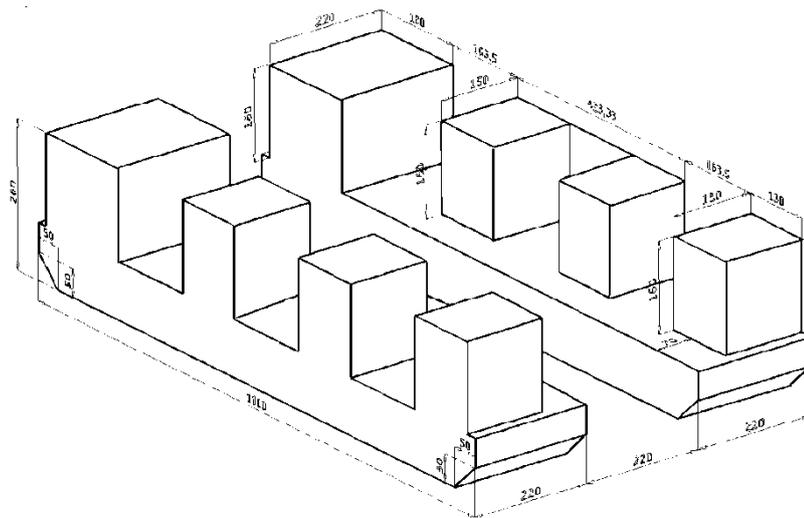
где ζ – коэффициент полного сопротивления движению судна (ППК) по результатам модельных испытаний; ρ – плотность воды; Ω – площадь смоченной поверхности судна (ППК).

Эксперименты с моделью ППК проводились в опытовом бассейне гравитационного типа. Измерение показаний пройденного пути, времени и скорости движения модели, записывались и обрабатывались на компьютере с помощью программного обеспечения, созданного для проведения опытов.

а)



б)



в)

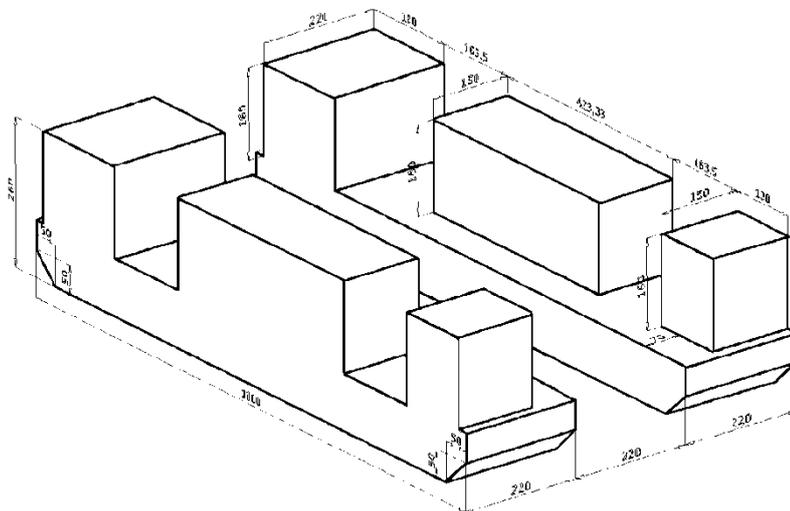


Рис. 1. Схема модели ППК, горизонтальный клиренс 220 мм: а) вариант 6 колонн, б) вариант 8 колонн, в) вариант 6 колонн с удлиненной средней

Модель представляет собой двухкорпусное полупогружное судно с шестью или восемью прямоугольными колоннами Рис. 1. Нижние понтоны имеют симметричные носовые и кормовые обводы, постоянную, подрезы в носу и корме. Имеются полости для твердого балласта.

Главные размерения моделей соответствуют осредненными значениями основных геометрических характеристик плавучих кранов проектов KC5000, 16680 и Balder. Длина моделей выбрана для проведения испытаний в опытовом бассейне кафедры "Океанотехника и кораблестроение" СевГУ [8].

Главные размерения, характеристики и размеры колонн моделей приведены табл. 2 и табл. 3.

Таблица 2

Главные размерения модели ППК

Наименование	Величина
Длина понтона, мм	1100
Ширина понтона, мм	220
Высота борта понтона, мм	100
Горизонтальный клиренс, мм	0/65/110/175/220
Смоченная поверхность в транспортном положении, (клиренс 0/65/110/175/220 мм), м ²	0,68/0,90/0,90/0,90/0,90
Водоизмещение порожнем/транспортное/рабочее, кг	21,50/27,50/63,08
Осадка порожнем/в транспортном/в рабочем положении, мм	50,0/95,0/180,0
Количество колонн, шт	6/8/6 (средняя удлиненная)

Таблица 3

Размеры колонн

Наименование	Вариант колонн		
	6	8	6 (удлиненная средняя)
Высота колонн, мм	160		
Длина носовых / промежуточных и кормовых колонн, мм	230/160	180/130	180/423 и 130
Ширина носовых / промежуточных и кормовых колонн, мм	220/150		
Смоченная поверхность, м ² (в рабочем положении при клиренсе 0/65/110/175/220 мм)	1,13	1,14	1,19
	1,38	1,38	1,44
	1,38	1,38	1,44
	1,38	1,38	1,44
	1,38	1,38	1,44

Выполнена балластировка модели стальными болванками размещенными в подпалубных отсеках. Определено положение ЦТ системы модель-балласт для девяти случаев нагрузки – порожнем, транспортном и рабочем положении в шести и восьми колонном вариантах и варианте с шестью колоннами при удлиненной средней.

Метод исследований

Экспериментальная установка представляет собой бассейн гравитационного типа Рис. 2. и модель ППК. Меняя тягу модели, задаваясь различными значениями массы груза, обеспечивающего буксировку модели, и измеряя значения скорости установившегося движения получают зависимость сопротивления от скорости хода.



Рис. 2. Малый опытовый бассейн кафедры «Океанотехника и кораблестроение»

Измерение показаний скорости движения модели, пройденного пути, времени производился при помощи записи положения блока в определенный момент вращения (рис. 3).

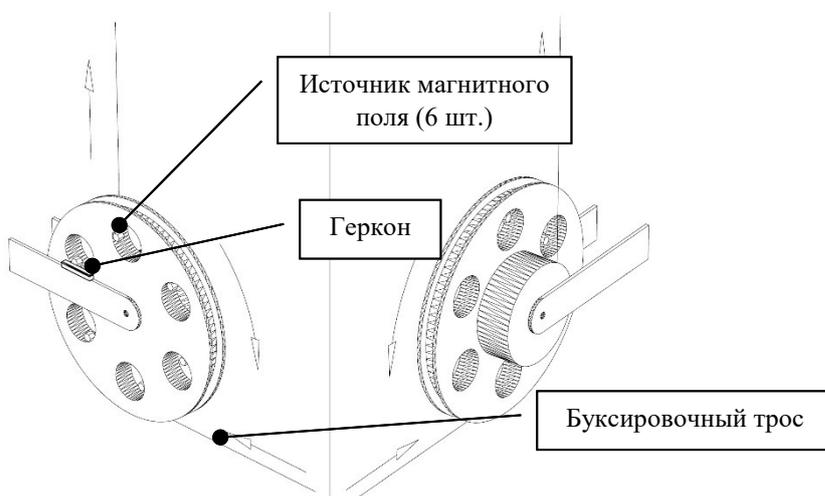


Рис. 3. Измерительная схема на буксировочном блоке

Для записи и обработки показаний разработано специальное программное обеспечение для проведения буксировочных испытаний в опытовом бассейне. Интерфейс программы приведен на рис. 4.

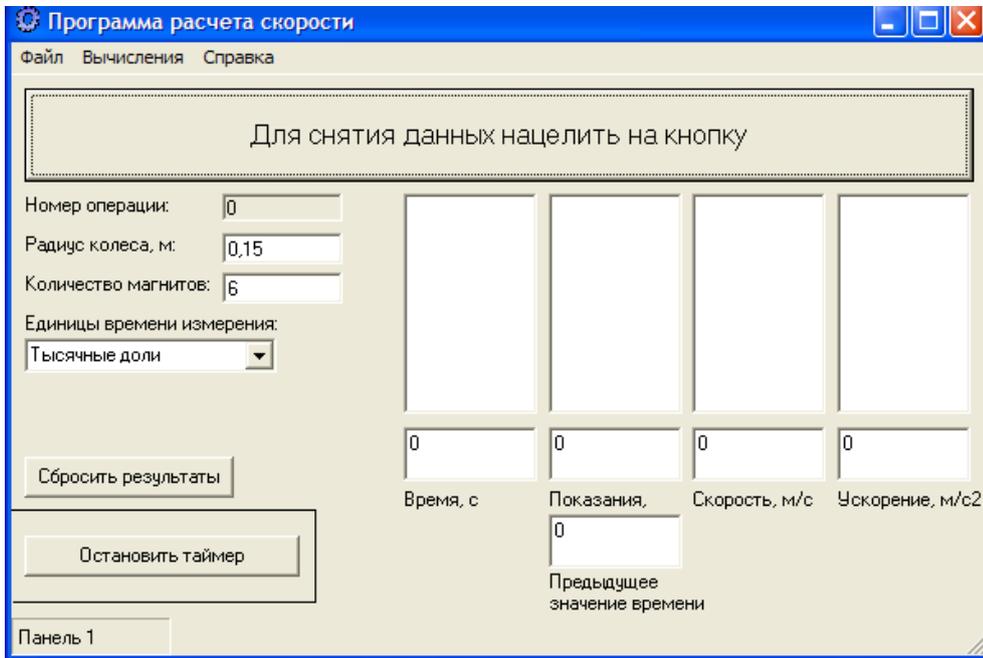


Рис. 4. Интерфейс программы замера скорости движения модели

Выполнено более 800 прогонов модели с определением участка постоянной скорости. Буксировки выполнены для транспортного положения на скорости соответствующей $V_s = 5...10,5$ узлов прототипа и для рабочего – 3,5 узла, соответствующей расчетной скорости течения. Получены графики установившегося движения модели при клиренсе 0/65/110/175/220 мм для транспортного ($d = 95$ мм) и рабочего положения ($d = 180$ мм, при курсовом угле 0^0 и 90^0) для трех и четырех колонн и трех с удлинненной средней колонной на понтоне представлены на рис. 5.

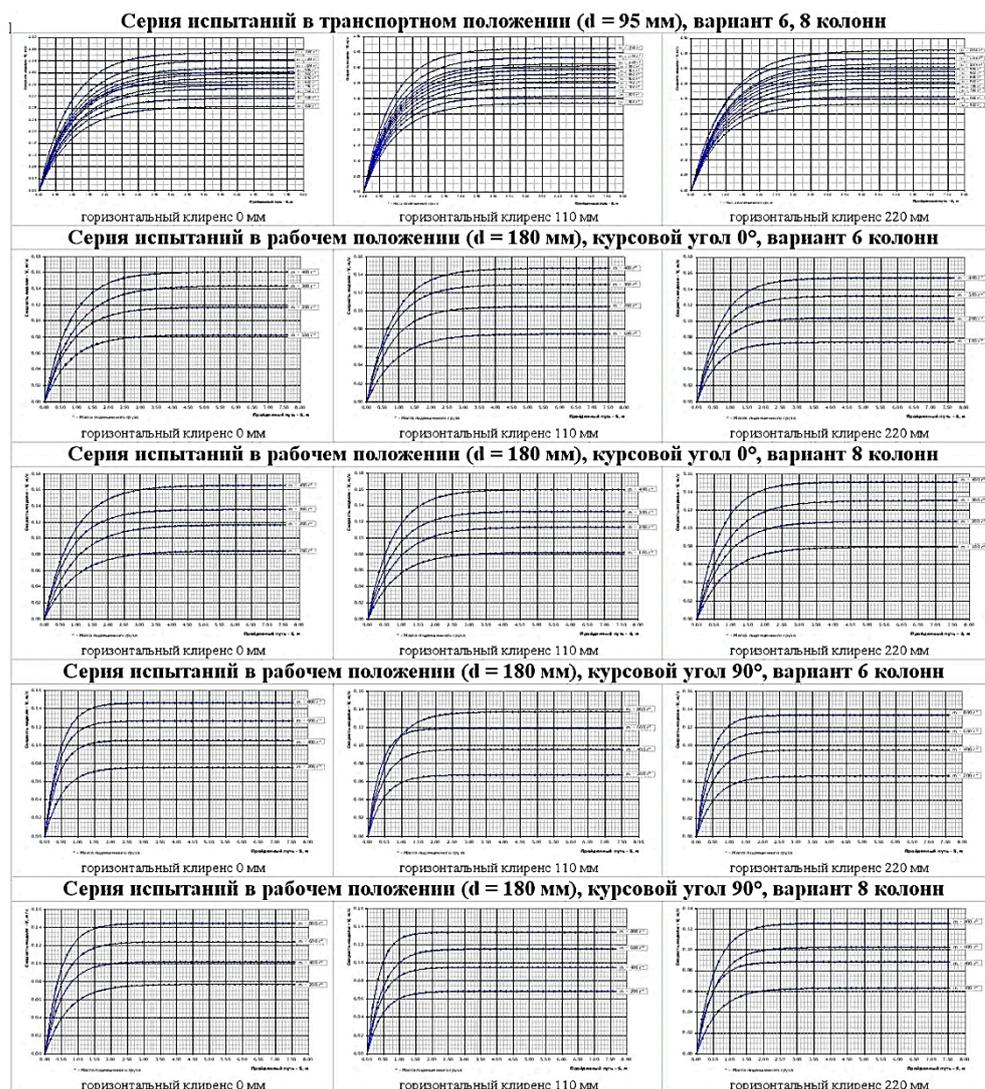
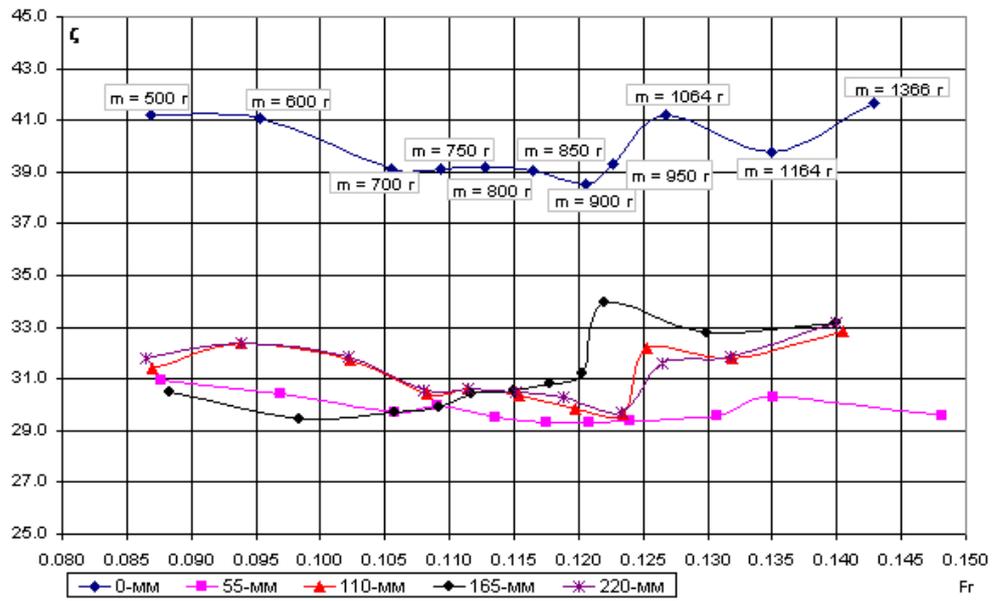
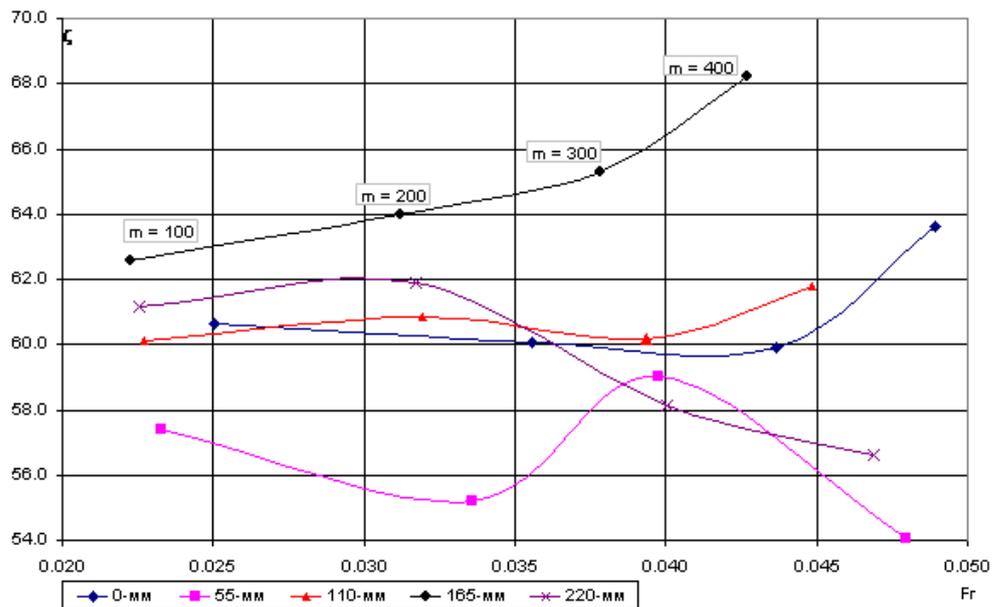


Рис. 5. Определение участков установившегося движения

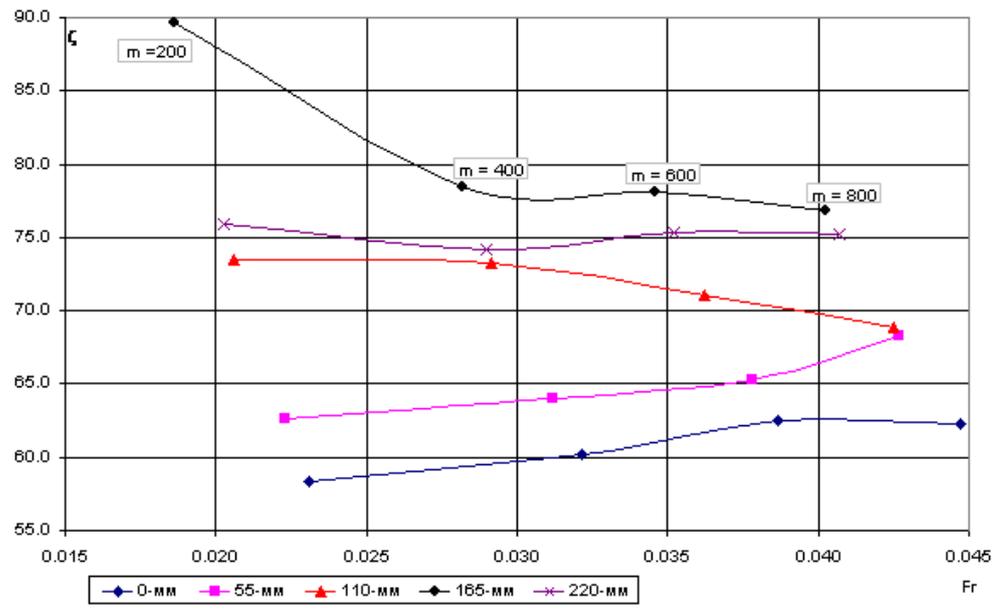
После обработки результатов буксировочных испытаний построены графики зависимостей относительного сопротивления от числа Фруда для исследуемых случаев комплектации и формы модели ППК. На рис. 6 показаны графики для транспортного и рабочего положения для курсовых углов 0° и 90° .



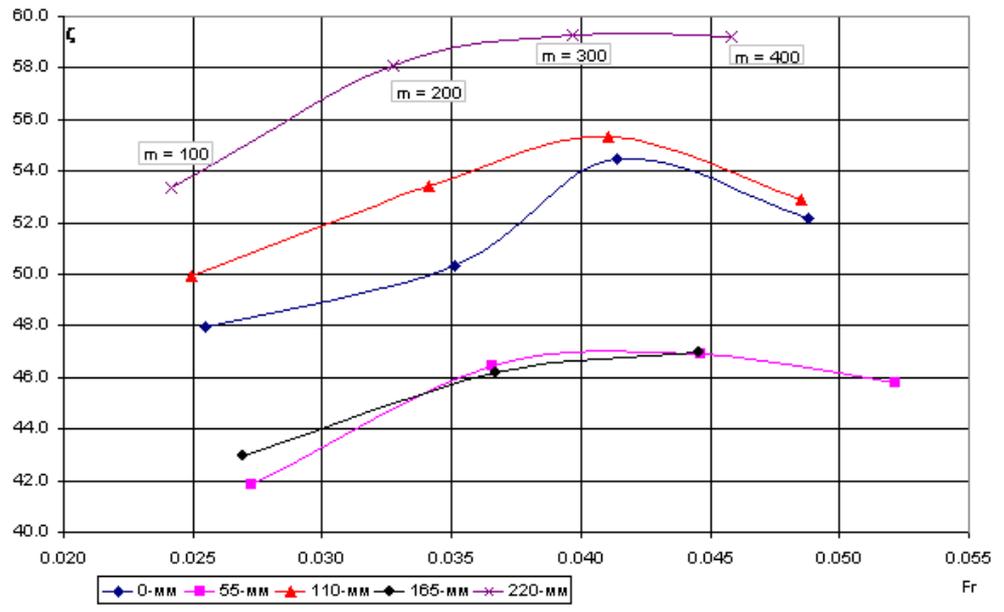
a)



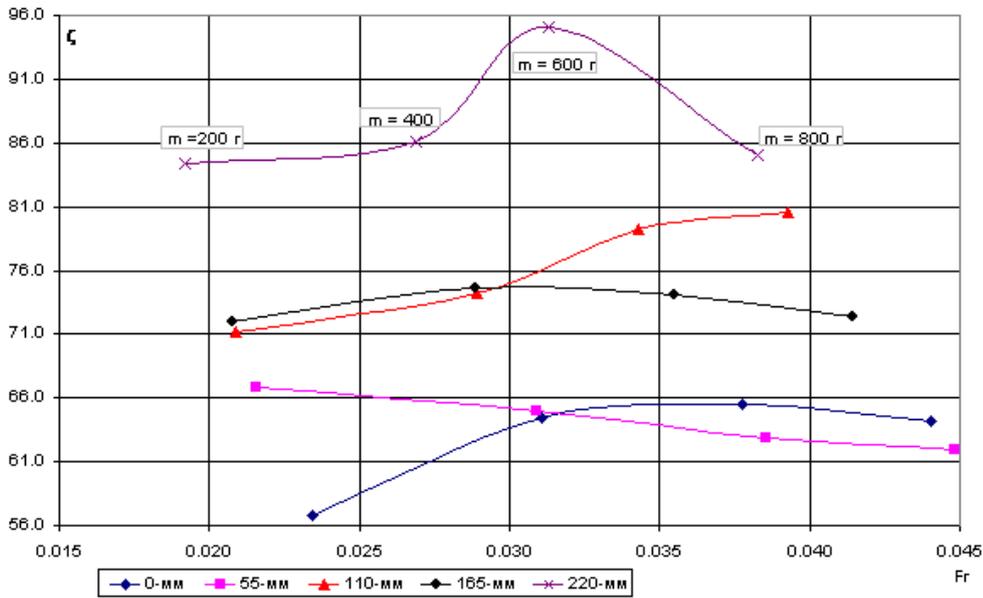
б)



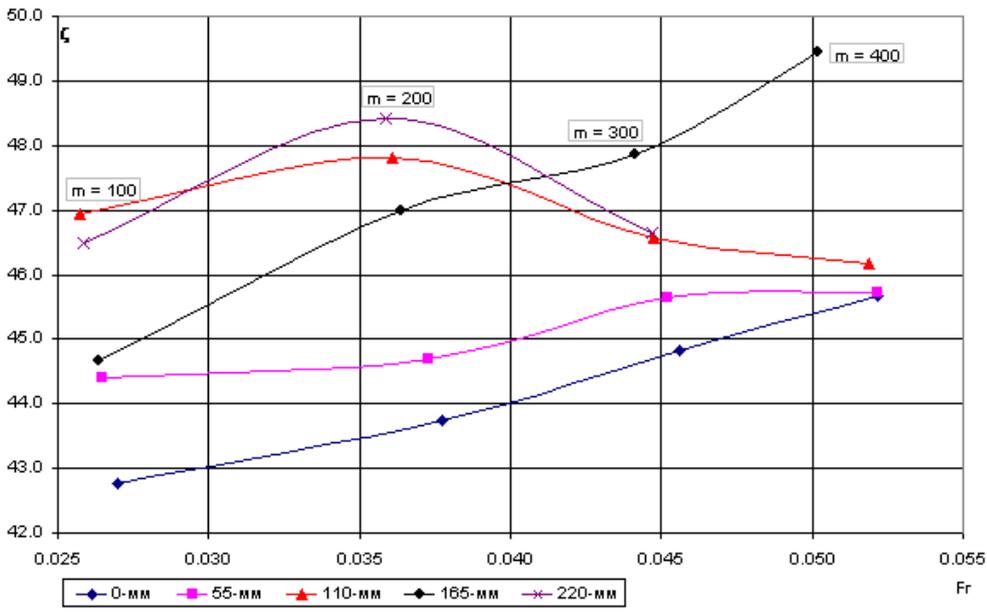
б)



в)



d)



e)

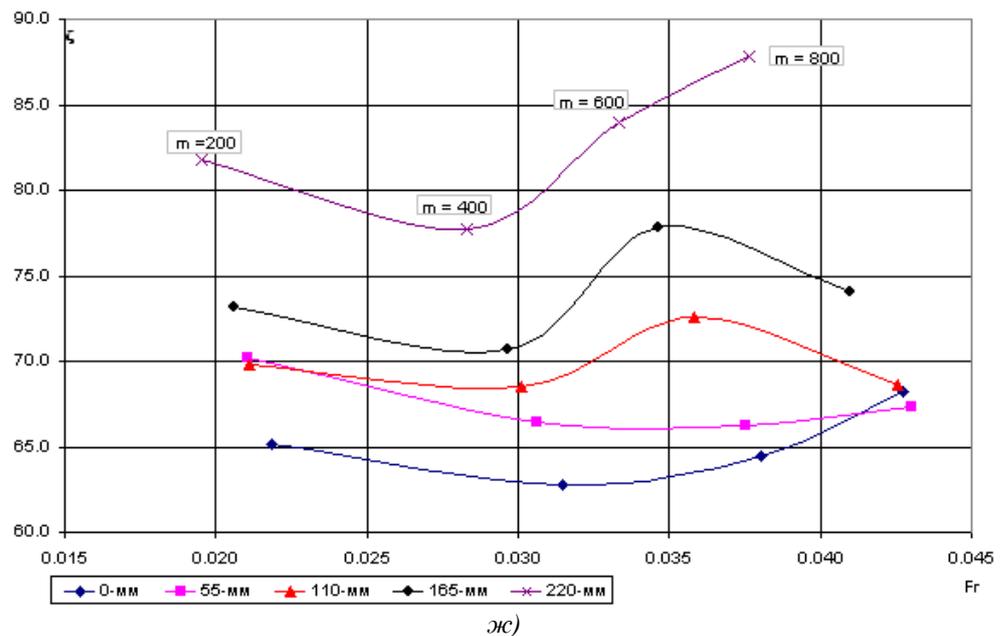


Рис. 6. Графики зависимости $\zeta = f(Fr)$ для транспортное и рабочее положений для курсовых углов 0° и 90° : а) транспортное положение; б) и в) рабочее положение, вариант 6 колонн, курсовые углы 0° и 90° ; г) и д) рабочее положение, вариант 8 колонн, курсовые углы 0° и 90° ; е) и ж) рабочее положение, вариант 6 колонн (средняя удлиненная), курсовые углы 0° и 90°

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования позволили получить зависимость от относительной скорости Fr величины относительного сопротивления ζ воды. Представленные графики дают возможность на начальных этапах проектирования полупогружных плавучих кранов оценить требуемую мощность главной и вспомогательной энергетической установки. Исходными данными для этого является скорость хода или течения, число стабилизирующих колонн величина и горизонтального клиренса.

Перспективы дальнейших исследований. Предполагается выполнить исследования по определению коэффициента дополнительного сопротивления от волнения рассмотренных случаев формы корпуса.

Список литературы

1. Борисов Р.В. Морские инженерные сооружения / Р.В. Борисов. В 2 ч. Ч. 1. – Морские буровые установки – СПб.:Судостроение, 2003 – 346 с.
2. Борисов А.М. Сравнительный анализ требований правил российского морского регистра судоходства и правил российского речного регистра к конструкции и прочности судов смешанного плавания классов «r3-rsn» и «m-сп 3,5,» / Гири С.Н., Пряничников К.Н./ вестник ВГАВТ. Научные проблемы водного транспорта – Н.Новгород 2019. № 59. С.27-41
3. Ваганов А.Б. Анализ поперечной остойчивости судна при произвольных по направлению и больших углах наклонов / Краснокутский И.Д., Гуров П.В. // Журнал Транспортные системы – Н.Новгород, 2019. № 2 (12). С. 25-37.

4. Ваганов А.Б. Динамика опрокидывания водоизмещающего судна при затоплении и действии наклоняющего момента/ Валяев А.В., Лукина Е.А., Самосюк А.И., Федосенко Ю.С. // НИЦ «МОРИНТЕХ»: научный журнал – Санкт-Петербург, 2020 - № 1-1 (47). С. 23-27.
5. Ваганов А.Б. Динамика судна при сложном внезапном воздействии внешних сил/ Тан Н.Н. // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология – г Архангельск 2014. № 4. С. 13-20.
6. Ваганов А.Б. Моделирование динамики морских краново-монтажных судов при позиционировании / Краснокутский И.Д., Гуров П.В., Балашов М.Г., Несин Д.Ю. // Журнал Транспортные системы – Н.Новгород, 2020 - № 1 (15). С. 29-40.
7. Ваганов А.Б. Применение численного метода расчета восстанавливающих сил и моментов водоизмещающего судна в исследованиях его динамики при воздействии внешних сил в условиях ветра и волнения моря/ Краснокутский И.Д., Нгуен Н.Т. // Журнал Транспортные системы – Н.Новгород, 2016. № 2. С. 7-17.
8. Войткунский Я.И. Справочник по теории корабля / Я.И. Войткунский, Р.Я. Першиц, И.А.Титов. – Л.: Судпромгиз, 1960. – 440 с.
9. Зиньковский-Горбатенко В.Г. Моделирование сопротивления судов в малом опытовом бассейне / В.Г. Зиньковский-Горбатенко, Г.Н. Грищенко // Вестник СевНТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. – Севастополь, 2005. – Вып. 75. – С.35 – 39.
10. Савинов В.Н. Расчет буксировочного сопротивления кильватерного состава и потребной мощности толкача/ В сборнике: Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве. Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Р.Е. Алексеева – Н.Новгород 2016. С. 140-144.
11. Савинов В.Н. Экспериментальное определение изменения остойчивости транспортной баржи при продольном сбросе опорного блока буровой платформы/ научный журнал Современные проблемы науки и образования – Пенза 2014. № 6. С. 297.
12. Чебан Е.Ю. Исследование влияния формы катера типа «RIB» на его гидродинамические характеристики численными методами./ Мартемьянова О.В., Гачев С.В., Мухина А.А// вестник ВГАВТ. Научные проблемы водного транспорта – Н.Новгород 2019. № 59. С.79-80.

References

1. Borisov R.V. Marine engineering structures / R.V. Borisov. At 2 h. h. 1. – Offshore drilling rigs – St. Petersburg:Shipbuilding, 2003 – 346 p.
2. Borisov A.M. Comparative analysis of the requirements of the rules of the Russian maritime Register of Shipping and the rules of the Russian river register for the design and strength of mixed navigation vessels of classes "r3-rsn" and "m-sp 3,5," / Girin S.N., Pryanichnikov K.N./ vestnik VГАVТ. Scientific problems of water transport – N.Novgorod 2019. No. 59. pp.27-41
3. Vaganov A.B. Analysis of the transverse stability of a vessel at arbitrary in the direction and large angles of inclination / Krasnokutsky I.D., Gurov P.V. // Journal Transport Systems – N. Novgorod, 2019. No. 2 (12). pp. 25-37.
4. Vaganov A.B. Dynamics of capsizing of a displacement vessel during flooding and the action of tilting moment/ Valyaev A.V., Lukina E.A., Samosyuk A.I., Fedosenko Yu.S. // SIC "MORINTECH": scientific journal – St. Petersburg, 2020 - No. 1-1 (47). pp. 23-27.
5. Vaganov A.B. Ship dynamics under complex sudden impact of external forces/
2. Tan N.N. // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology – Arkhangelsk 2014. No. 4. pp. 13-20.
6. Vaganov A.B. Modeling of dynamics of marine crane-mounting vessels during positioning / Krasnokutsky I.D., Gurov P.V., Balashov M.G., Nesin D.Yu. //
3. Journal Transport Systems – N.Novgorod, 2020 - No. 1 (15). pp. 29-40.
7. Vaganov A.B. Application of a numerical method for calculating the restoring forces and moments of a displacement vessel in studies of its dynamics under the influence of external forces in conditions of wind and sea waves/ Krasnokutsky I.D., Nguyen N.T. //

4. Journal Transport Systems – N.Novgorod, 2016. No. 2. pp. 7-17.
8. Voitkunsky Ya.I. Handbook on the theory of the ship / Ya.I. Voitkunsky, R.Ya. Pershits, I.A.Titov. – L.: Sudpromgiz, 1960. – 440 p.
9. Zinkovsky-Gorbatenko V.G. Modeling of ship resistance in a small experimental pool / V.G. Zinkovsky-Gorbatenko, G.N. Grishchenko // Bulletin of SevNTU. Ser. Mechanics, energy, ecology: collection of scientific tr. – Sevastopol, 2005. – Issue 75. – pp.35-39.
10. Savinov V.N. Calculation of the towing resistance of the wake composition and the required power of the pusher/ In the collection: Modern technologies in shipbuilding and aviation education, science and production. Collection of reports of the All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of R.E. Alekseev - N.Novgorod 2016. pp. 140-144.
11. Savinov V.N. Experimental determination of changes in the stability of a transport barge during longitudinal discharge of the support block of a drilling platform/scientific journal Modern Problems of science and education – Penza 2014. No. 6. p. 297.
12. Cheban E.Y. Investigation of the influence of the shape of a RIB-type boat on its hydrodynamic characteristics by numerical methods./ Martemyanova O.V., Gachev S.V., Mukhina A.A.// vestnik VGAVT. Scientific problems of water transport – N.Novgorod 2019. No. 59. pp.79-80.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Балашов Михаил Георгиевич, доцент кафедры «Океанотехника и кораблестроение» ФГАОУ ВО «СевГУ» Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования, «Севастопольский государственный университет» 229053, г.Севастополь, ул.Университетская, 33, e-mail: evgenymensh@gmail.com

Michael G. Balashov, Associate Professor of the Department of Shipbuilding and Oceantechnics Sevastopol State University, 229053, Sevastopol, Universitetska, 33

Ваганов Александр Борисович, профессор кафедры «Аэро-гидродинамика, прочность машин и сопротивления материалов», ФГБОУ ВО НГТУ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева " 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: yegor-timin@list.ru

Alexander B. Vaganov, Professor of the Department of Aerogidrodinamic, solid machins b soprotivlenie materials, Nizhniy Novgorod state technical university, 603950, Nizhniy Novgorod, Minina, 24

Орлов Юрий Федорович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Прикладная математика» ФГБОУ ВО "НГТУ" Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования " Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева " 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: fedor_nna@mail.ru

Yuri F. Orlov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Applied Mathematics, Nizhniy Novgorod state technical university, 603950, Nizhniy Novgorod, Minina, 24

Панов Алексей Юрьевич, профессор, доктор технических наук, Заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика» ФГБОУ ВО "НГТУ" Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования " Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева" 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24,

Alexey Yu. Panov, Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Nizhniy Novgorod state technical university, 603950, Nizhniy Novgorod, Minina, 24

e-mail:ivan_lisin_ggp@mail.ru

Савинов Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Аэро-гидродинамика, прочность машин и сопротивление материалов» ФГБОУ ВО "НГТУ" Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева" 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: mashtakova45@yandex.ru

Vladimir N. Savinov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Aero-Hydrodynamics, Strength of Machines and Resistance of Materials, Nizhniy Novgorod state technical university, 603950, Nizhniy Novgorod, Minina, 24

Статья поступила в редакцию 23.10.2023; опубликована онлайн 20.12.2023.
Received 23.10.2023; published online 20.12.2023.