

Use of Wave Propulsors of Various Types on Semisubmersible Catamarans

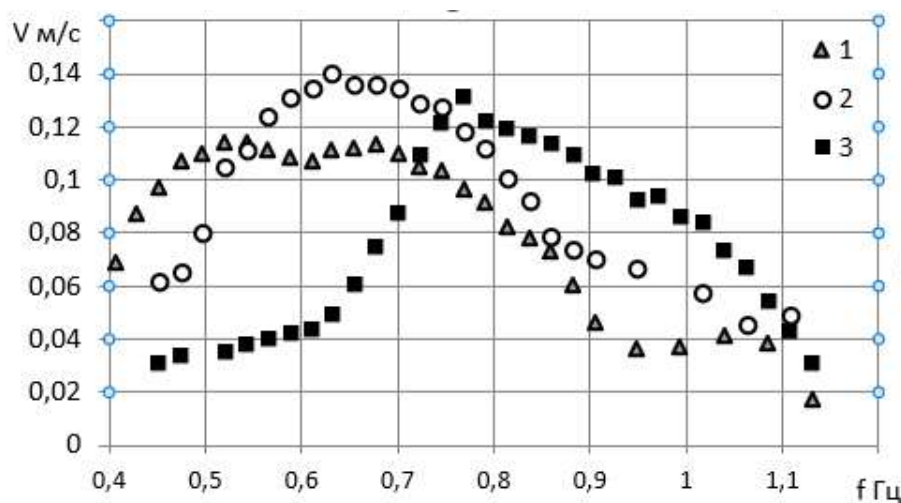
A. V. Boyko, V. V. Prokofiev, Y. A. Arkhangelsky

*Research Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University (MGU),
Moscow, 119192, Russia,
mailband@mail.ru*

Abstract

The article provides an overview of the work carried out at the Institute of Mechanics of Moscow State University in 2021-2024. The article presents the results of pilot studies of use efficiency for flapping wing wave propulsors (WP) and direct-flow WP (DFWP) on a 1700 mm long model of a small waterline area vessel (SWAV). The NACA0015 profile was used as a working element of both the flapping WP and the direct-flow WP. In the direct-flow WP, the profile was rigidly fixed against the vessel hull with a wing chord inclination of 30° . The efficiency of use of an underwater sail type WP was studied too. Various WP types were tested on a smaller scale SWAV model, 840 mm long. Comprehensive studies of efficiency for the direct-flow WP and the underwater sail type WP were conducted on the small model. An inclined plate was used as an operating part of the direct-flow WP. The optimal parameters of the direct-flow WP (length, inclination, plate immersion) were experimentally determined. The effect of the hull immersion depth (draft) and the immersion depth of the underwater sail type WP on the vessel speed against the waves was studied. The experiments showed that the efficiency of flapping wing or underwater sail wave propulsors in the operating range of wave frequencies is slightly higher than that of DFWP. However, in stormy sailing conditions, DFWP has an advantage, since it shows the highest efficiency just in such conditions, while the other options considered are effective in the operating range of wave lengths that depends on the vessel length and, generally speaking, does not coincide with the length of storm waves.

Keywords: sea waves, semisubmerged catamaran, underwater sail, wave propulsor, direct-flow wave propulsor.



Comparison of the speed of movement of a semisubmersible catamaran model against waves for three different types of wave propulsors

УДК 532.5.528

Применение волновых движителей различных типов на полупогружных катамаранах

А. В. Бойко, В. В. Прокофьев, Е. А. Архангельский

*НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова,
Россия, Москва, 119192, Мичуринский пр-т, д.1*

mailband@mail.ru

Аннотация

В статье содержится обзор работ, проведенных в Институте механики МГУ в период 2021–2024 гг. Представлены результаты экспериментальных исследований эффективности применения волновых движителей (ВД) типа качающееся крыло и прямоточного ВД (ПВД) на модели судна с малой площадью сечения по ватерлинии (СМПВ) длиной 1700 мм. В качестве рабочего элемента как качающегося, так и прямоточного ВД использовался профиль НАСА0015. В прямоточном ВД профиль был жестко закреплен относительно корпуса судна с наклоном хорды крыла 30° . Также исследовалась эффективность применения ВД типа подводный парус. Были проведены испытания различных типов ВД на модели СМПВ меньшего масштаба – длиной 840 мм. На малой модели были проведены всесторонние исследования эффективности прямоточного ВД и ВД типа подводный парус. В качестве рабочего органа движителя ПВД использовалась наклонная пластина. Экспериментально определены оптимальные параметры ПВД (длина, наклон, погружение пластины). Исследовано влияние на скорость движения судна против волн глубины погружения корпусов (осадки судна) и глубина погружения ВД типа подводный парус. Эксперименты показали, что эффективность волновых движителей типа качающееся крыло или подводный парус в рабочем диапазоне частот волн несколько выше, чем у ПВД. Однако, в случае штормовых условий плавания, ПВД имеет преимущество, так как именно в таких условиях показывает наивысшую эффективность, а остальные рассмотренные варианты эффективны в рабочем диапазоне длин волн, зависящем от длины судна и, вообще говоря, не совпадающим с длиной штормовых волн.

Ключевые слова: морские волны, полупогружной катамаран, подводный парус, волновой движитель, прямоточный волновой движитель.

1. Введение

Идея использования волновой энергии моря для движения судов возникла достаточно давно. Первые упоминания об использовании энергии морских волн для движения судов относятся еще к 19 веку. Препятствием к применению различных волновых движителей (ВД) является нестабильность параметров реальных морских волн и сильная зависимость эффекта от параметров самого судна и волнового движителя. Тем не менее, примеры применения ВД довольно многочисленны [1]. В гидроканале Института механики МГУ модельные испытания судов с ВД проводились с 1989 г. С использованием линейной теории волн и линейной теории качки была предложена математическая модель для расчета тяги волнового движителя с учетом килевой и вертикальной качки судна [2]. Показано, что эффект создания тяги главным образом связан с качкой судна, и наибольшая тяга волнового движителя достигается при длине волны соизмеримой с длиной судна. В [3] представлена схема нового волнового движителя, где механизм тяги связан не с качкой судна, а с опрокидыванием волн при взаимодействии с элементами конструкции ВД.

Традиционно, в качестве волнового движителя используется поворачивающееся крыло симметричного профиля с упругой заделкой [4]. В работах [1, 5] приведены результаты сравнительных испытаний трех различных типов волновых движителей, крыльцевого движителя, ВД типа подводный парус и прямоточного волнодвижителя (ПВД) на модели катамарана длиной 1.7 м с расстоянием между корпусами 1 м. В отличие от катамарана длиной 6 м [6] здесь наблюдалась значительная килевая качка, что способствовало работе качающихся волновых движителей, но ухудшало эффективность прямоточного. Однако, применение пластины стабилизатора на корме судна поднимает эффективность этого волнодвижителя до уровня, полученного для тех же условий на длинном судне.

Экспериментальные исследования, проведенные в условиях гидроканалов на гладких волнах [4, 5] показали, что скорость судна, оборудованного крыльцевыми волнодвижителями при фиксированной частоте волн пропорциональна высоте волн. Казалось бы, в штормовых условиях, где амплитуда волн приближается к максимальной, оправдано применение ВД. Однако, в штормовых условиях крутизна волн увеличивается, а скорость частиц жидкости на гребнях волн приближается к фазовой скорости волн. Это приводит к значительному увеличению сопротивления для судов, движущихся против волн.

Известна конструкция судов мало подверженных воздействию волн, это, так называемые, суда с малой площадью сечения по ватерлинии (СМПВ), также часто их называют полупогруженными катамаранами. За границей такие суда обозначаются как SWATH (Small Waterplane Area Twin Hull). Суда этого типа имеют специальную форму корпуса - расположенную над водой платформу, укрепленную на двух подводных понтонах с помощью нескольких (к примеру, четырёх) опор, которые образуют минимальную площадь сечения по ватерлинии. Такая конструкция применяется при постройке быстроходных судов, имеющих малое волновое сопротивление, а также, благодаря малой восприимчивости к воздействию морских волн, используется в конструкциях судов, предназначенных для ведения подводных работ в районах с большими глубинами. Исторический обзор и описание особенностей конструкции и мореходных характеристик СМПВ имеется, например, в работе [7].

Подводная часть СМПВ обычно выполняется в виде цилиндрической конструкции с носовым и кормовым обтекателями, надводная платформа судна крепится к ним при помощи вертикальных пилонов соответствующего сечения. Такая конструкция опор приводит к сокращению смоченной поверхности, а подводные корпуса-понтон призваны обеспечивать необходимую остойчивость, запас плавучести и т.д. Суда системы СМПВ имеют большое преимущество в остойчивости, как перед однокорпусными судами, так и перед катамаранами классической схемы. Они могут оставаться стабильными даже при сравнительно сильном волнении. Основные результаты снижения площади ватерлинии: снижение возмущающих сил и моментов качки, уменьшение продольной остойчивости и увеличение периодов качки, резкое снижение сопротивления и снижение качки на встречном волнении. Большие собственные периоды качки всех видов определяют встречное и лаговое волнение как наиболее благоприятные для СМПВ. Отмечается повышенная мореходность таких судов, а также высокая эффективность любых успокоителей качки. Последнее обстоятельство означает, что и воздействие традиционного волнового движителя (такого как качающееся крыло) на характеристики качки судна здесь гораздо сильнее чем на обычном судне. Таким образом, если для судна с плавающими корпусами размеры движителя малы по сравнению с размерами корпусов и качка судна определяется взаимодействием корпусов с волнами, то для погруженных корпусов качка в основном определяется взаимодействием движителя с волнами. Ниже будет показано, что при погруженных корпусах судна традиционные ВД достаточно эффективны при условии, если они расположены около поверхности воды в зоне наиболее интенсивного волнового движения жидкости. При этом интенсивность качки зависит от частоты (или длины) волн и максимальна в области резонансных частот.

На рис. 1 представлены зависимости высоты волн H_w (разность осредненных значений координат вершин и подошв волн) от частоты работы клиновидного волнопродуктора для

трех значений амплитуды качания клина (1-максимальная-max, 2-средняя-mid и 3- минимальная-min) при глубине канала 950 мм. Измерения проводились на расстоянии 20 м от клина ВП (здесь же находилась мерная база для испытания моделей судов). Видно, что высота волн в зависимости от частоты колебаний клина имеет максимум, особенно ярко выраженный для максимальной амплитуды качания клина (1 на рис. 1).

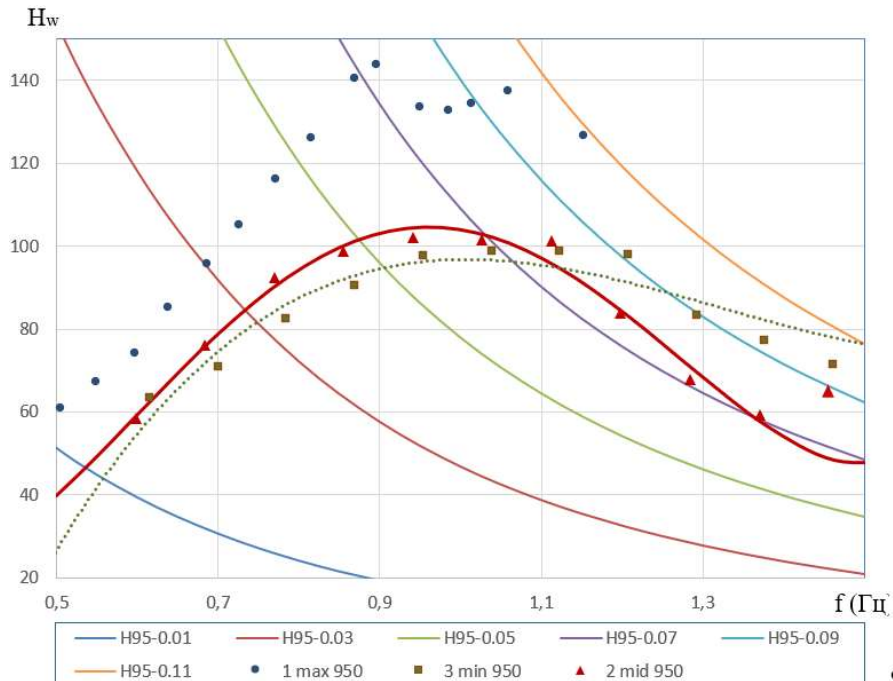


Рис. 1. Зависимость высоты волн H_w от частоты работы клиновидного волнопродуктора, пунктирная и красная линии – аппроксимации 3-го и 2-го режимов генерации волн полиномами. Нанесена сетка линий постоянной крутизны волн при глубине 950 мм (второе число в обозначениях – значение крутизны)

Для меньших амплитуд высота волн меняется более плавно – сплошные линии на рис. 1 аппроксимации экспериментальных точек полиномами для случаев 2 и 3. На том же рисунке тонкими линиями нанесена сетка кривых, соответствующих постоянным значениям крутизны волн (H_w/λ , где λ – длина волны). Из данных рис. 1 следует, что уменьшение высоты волн начинает происходить как раз в диапазоне крутизны $0.07 \div 0.09$ – это предельная крутизна штормовых волн. В этом диапазоне начинается опрокидывание волн, волнение теряет свой близкий к периодичному характер. Имеются основания предполагать, что волны с максимальной для канала крутизной могут моделировать штормовые морские волны. Отметим еще тот очевидный факт, что чем меньше амплитуда генерируемых волн, тем при большей частоте этих волн достигается крутизна штормовых волн.

В работе приведены результаты испытаний на волновом канале Института механики МГУ модели судна с малой площадью ватерлинии (СМПВ) длиной 1700 мм при различных погружениях корпусов судна под воду (начиная с плавающих корпусов), оборудованной волновым движителем типа машущее крыло с использованием подпружиненного жесткого крыльевого профиля НАСА 0015. Тот же профиль, жестко закрепленный между корпусами судна, использовался в качестве рабочего элемента прямоточного ВД. Проведены также испытания движителя типа подводный парус той же площадью в плане, что и жесткий профиль. Обнаружено, что с погружением корпусов катамарана под воду сильно меняются резонансные свойства судна при взаимодействии с волнами (при осадке, характерной для СМПВ, рабочие частоты уменьшаются примерно в два раза). Для более подробного изучения эффектов была создана модель катамарана меньшего масштаба (1:2), длиной 840 мм. Рабочие частоты

модели сместились соответственно в сторону больших частот (следовательно, более интенсивных волн, см. рис. 1), более удобных для исследований. На модели малого масштаба исследовалась также эффективность работы прямоточного ВД, в качестве рабочего органа которого использовалась жестко закрепленная на судне наклонная пластина. В результате серии экспериментов выяснено, что в области рабочих частот эффективность волновых двигателей типа качающееся крыло или подводный парус несколько выше, чем у ПВД. Однако, в случае штормовых условий плавания, ПВД имеет преимущество, так как именно в таких условиях, на наиболее крутых волнах, он показывает наивысшую эффективность вне зависимости от длины волн, а остальные рассмотренные варианты ВД эффективны в некотором диапазоне волн, длина которых превосходит длину корпусов судна примерно в три раза и, вообще говоря, не совпадающим с длиной штормовых волн.

2. Описание модели

Для испытаний в гидроканале были построены две модели судов с малой площадью сечения по ватерлинии (полупогружных катамаранов). Схематический чертеж модели с основными размерами судна показан на рис. 2 (вид спереди).

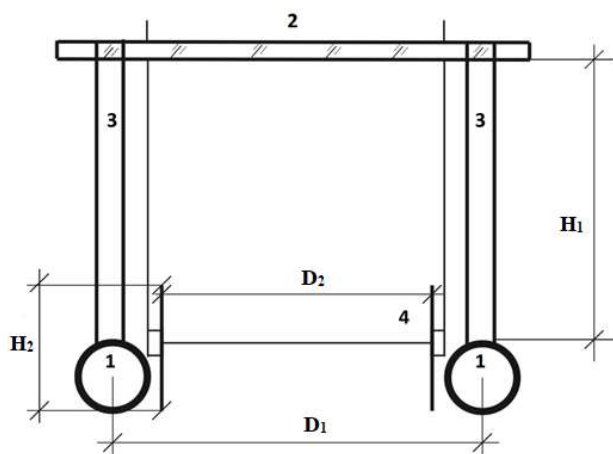


Рис. 2. Схема модели

Двухкорпусная плавающая конструкция состоит из двух полых цилиндрических пластмассовых корпусов-понтонов (1), диаметром D , длиной L_1 со съемными носовым и кормовым обтекателями специальной формы. К каждому корпусу с верхней стороны крепятся две пенопластовые стойки эллиптического сечения (3). H_1 – высота каждого из четырех пилонов модели. Верхняя площадка модели (2) образована пенопластовыми пилонами, связанными между собой прямоугольными деревянными рейками. Расстояние между центрами понтонов – D_1 . В зависимости от водоизмещения модели понтоны могут плавать на поверхности воды или погружаться под поверхность.

В пространстве между корпусами судна размещена проточная часть (4), формируемая двумя параллельными пластинами из оргстекла высотой H_2 , длиной немного меньшей длины судна L_1 и расстоянием между пластинами D_2 . В проточной части осуществляется крепления элементов волновых двигателей и стабилизатора, ширина рабочего элемента волнового двигателя и стабилизатора определяется шириной проточной части D_1 . Боковые пластины формируют течение жидкости близкое к двумерному, что особо существенно для работы прямоточного ВД. Положение проточной части относительно корпуса судна может регулироваться по вертикали, что позволяет регулировать заглубление рабочего органа ВД. В кормовой части размещен горизонтальный стабилизатор, который может устанавливаться на разной высоте относительно проточной части.

Проводились испытания моделей двух размеров. Основные размеры большой модели: длина понтонов 1700 мм, расстояние между центрами понтонов $D_1 = 1160$ мм, диаметр понтонов 110 мм, пластины проточной части имеют высоту $H_2 = 350$ мм, длину 1530 мм, расстояние между пластинами $D_2 = 960$ мм. Высота пилонов (сечение – эллипс с осями 200 и 82 мм) $H_1 = 900$ мм. Размеры малой модели: длина 840 мм, ширина $D_1 = 620$ мм, $D_2 = 460$ мм, высота пилонов $H_1 = 560$ мм.

3. Использование крыльевого и прямоточного движителей

Для большой модели проведена серия испытаний с использованием подпружиненного жесткого крыльевого профиля НАСА 0015.

Использовалась методика эксперимента, описанная в работах [3, 5, 6]. Уровень воды в канале составлял 950 мм. Графики изменения высоты и длины волн в зависимости от частоты были приведены ранее [5].

Испытания проводились в диапазоне частот $0.45 \div 0.9$ Гц, в котором амплитуда волн монотонно увеличивается с ростом частоты, а длина волн уменьшается, но при этом превосходит длину модели и приближается к ней только в конце диапазона (при частоте $f = 0.9$ Гц, длина волны 1.9 м). В качестве рабочего элемента ВД использовался симметричный крыльевой профиль НАСА 0015 с длиной хорды 170 мм (ширина профиля 960 мм). Упругая связь профиля осуществлялась с помощью горизонтально натянутых в невозмущенном состоянии резиновый жгутов.

На рис. 3 представлены зависимости скорости движения модели против волн от их частоты при неизменном заглублении 50 мм оси крыльевого движителя (расстоянии от поверхности воды до оси профиля в состоянии покоя) для различных величин осадки модели судна. Осадка определялась по положению относительно спокойной поверхности воды. Наименьшая осадка достигалась при пустых понтонах – 95 мм (кривая 1). В этом случае корпуса понтонов возвышаются над невозмущенной поверхностью воды на 15 мм (т.е. имеем обычный катамаран). Для остальных случаев понтоны находились под водой. Кривые 2 – 5 на рис. 3 соответствуют величинам осадки судна 210, 343, 660, 780 мм. Видно, что наибольшая скорость в исследованном диапазоне параметров волн достигается для плавающего на поверхности катамарана (кривая 1 на рис. 3).

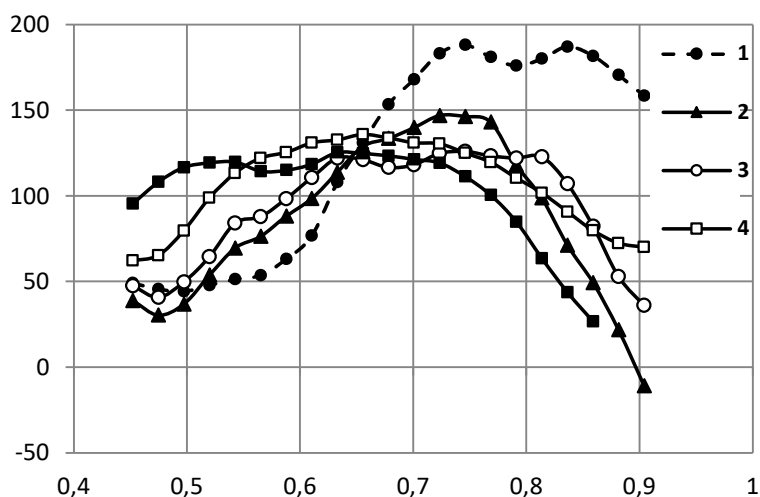


Рис. 3. Зависимость средней скорости движения судна против волн V (мм/с) от частоты волн f (Гц) при заглублении оси профиля 50 мм и различной осадке судна: 1 – 95 мм, 2 – 210 мм, 3 – 343 мм, 4 – 660 мм, 5 – 780 мм

С погружением понтонов под поверхность воды максимальная скорость движения судна против волн уменьшается (при осадки характерной для СМПВ примерно на 30 %).

4. Волнодвижитель типа подводный парус. Эффективность его работы

Парус длиной 195 мм был закреплен на втулке, зафиксированной на стенках проточной части модели. Упругая связь паруса осуществлялась с помощью 4-х горизонтально натянутых резиновых жгутов (длина каждого жгута 780 мм, общая сила натяжения в состоянии покоя – 1440 гс).

На рис. 4 представлены зависимости средней скорости (за время наблюдения) от частоты волн при изменении осадки судна от 80 до 720 мм (остальные параметры одинаковы, заглубление оси втулки паруса оставалось постоянным и равным 50 мм). При осадке 80 мм понтоны (диаметром 110 мм) находятся в плавающем состоянии. Максимум скорости достигается при частоте 0.77 Гц. Затем по мере роста осадки судна (уже при затопленных корпусах) скорость движения против волн уменьшается, достигает минимума и начинает возрастать. Максимум скорости смещается в сторону меньших частот волн. При осадке 720 мм он достигается при частоте 0.52 Гц. Скорость при этом лишь немного меньше случая плавающих корпусов. Нужно учесть, что высота волн здесь (65 мм) значительно меньше, чем в точке максимума для плавающих корпусов (116 мм).

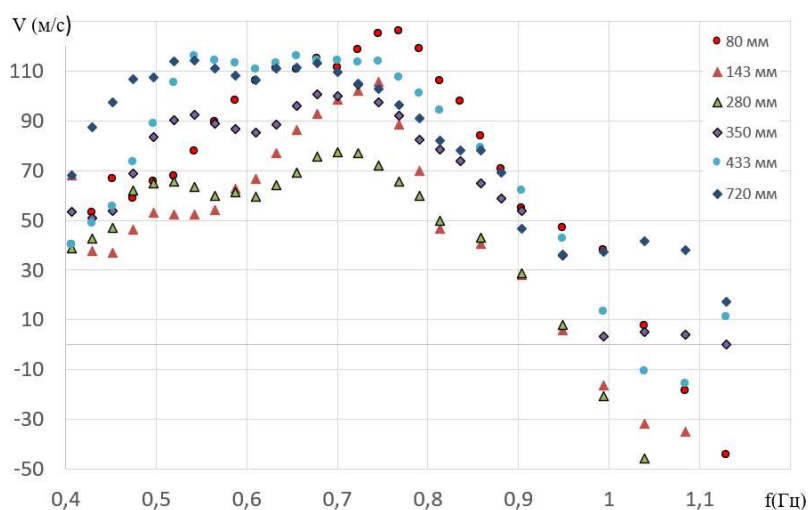


Рис. 4. Зависимость средней скорости от частот волн при изменении осадки судна

На рис. 5 представлены зависимости аналогичные рис. 4, только тут фиксирована осадка судна (720 мм) изменяется заглубление втулки паруса относительно невозмущенной поверхности воды.

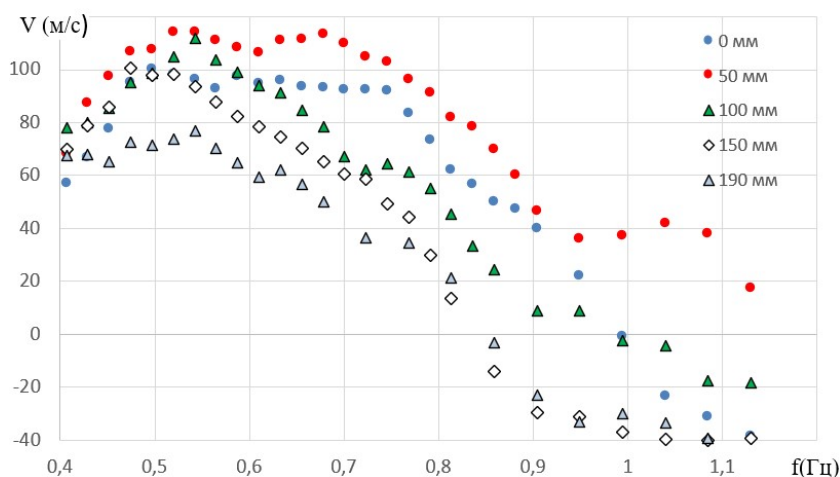


Рис. 5. Зависимость средней скорости от частот волн при осадке судна 720 мм при изменении глубины погружения (заглубления) движителя

Данные рис. 5 показывают, что наибольшая эффективность ВД наблюдается при заглиблении паруса 50 мм (аналогичный результат был получен для качающегося профиля [1]).

На рис. 6 представлено сравнение скорости движения против волн модели полупогруженного судна длиной 1700 мм с полностью погруженными корпусами – понтонами на одинаковых волнах (тах амплитуда работы волнопродуктора) для трех различных типов ВД: 1 – подводный парус длиной 195 мм, при заглиблении 50 мм с осадкой 720 мм; 2 – качающийся профиль НАСА-0015 длиной 200 мм при том же заглиблении и с осадкой 660 мм (параметры натяжных устройств примерно одинаковы); 3 – прямоточный ВД, в качестве рабочего элемента которого использовался тот же профиль, жестко установленный в проточной части модели судна под углом 30° , задняя кромка профиля на уровне невозмущенной жидкости, осадка судна 770 мм.

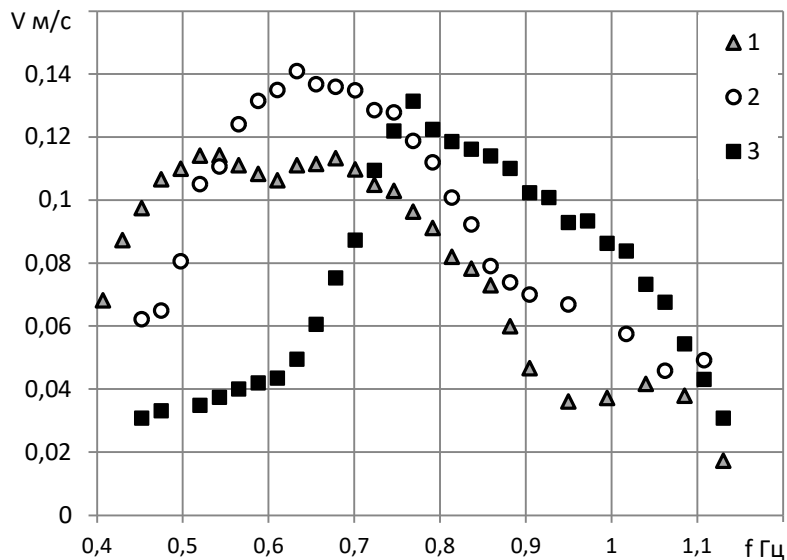


Рис. 6. Сравнение скорости движения модели против волн для трех различных типов ВД примерно с одинаковой площадью рабочего элемента и близкими осадками судна: 1 – подводный парус, 2 – жесткий профиль НАСА-0015 (оба заглиблены на 50 мм), 3 – прямоточный ВД (с наклоном профиля 30°)

Как и в случае плавающего катамарана [3] для СМПВ скорость движения с ВД типа подводный парус несколько меньше, чем ВД типа качающийся профиль, а область наиболее эффективной работы сдвинута в сторону меньших частот. Для прямоточного ВД максимум скорости движения против волн смещается в сторону волн большей частоты и приближается к области генерации волн максимальной крутизны, типа штормовых.

5. Эксперименты на малой модели СМПВ

Для модели полупогруженного катамарана (или СМПВ) длиной 1700 мм, сдвиг рабочего диапазона в сторону малых частот волн приводит в наших условиях и сдвиг в область небольших высот волн, что приводит к значительному уменьшению эффекта движения судна против волн. С целью переместить диапазон частот с наибольшей эффективностью работы ВД типа подводный парус в область более интенсивного волнения (см. рис. 1) была изготовлена модель СМПВ меньшего размера (длиной 840 мм). Основные размерения этой модели приведены выше. Парус движителя для этой модели имел длину 100 мм, ширину 460 мм (ширина проточной части судна). Натяжное устройство – 4 резиновых нити сечением $2,4 \times 2,4$ мм, длиной 280 мм.

Угол отклонения паруса (также как профиля) зависит от упругости натяжного устройства. На рис. 7 показана зависимость скорости движения судна от суммарной силы натяжения

нитей (в стационарных условиях) – эксперименты 1, 2, 3, 4 соответствуют силе натяжения 50, 100, 200, 300 г.

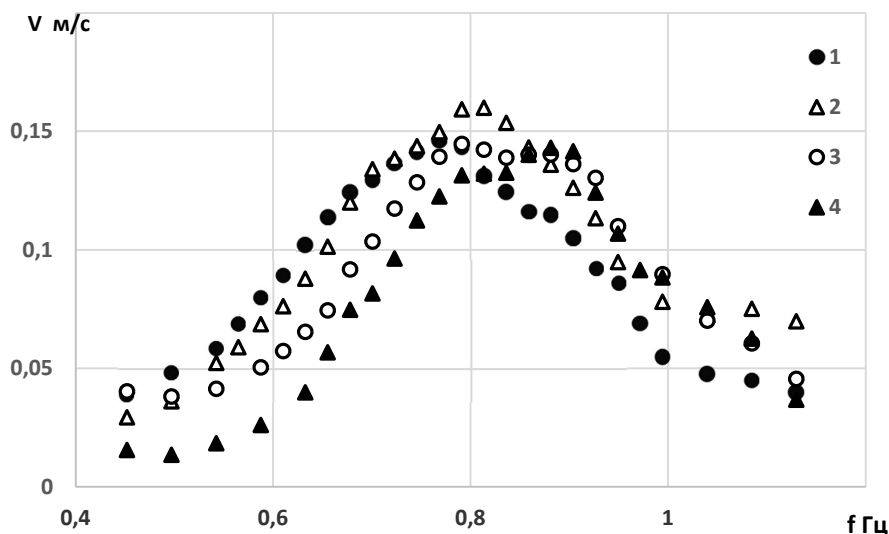


Рис. 7. Зависимость скорости движения судна с подводным парусом от суммарной силы натяжения нитей – 50, 100, 200, 300 гс, 1 – 4, соответственно

Осадка судна составляла $340 \div 360$ мм, заглубление втулки паруса $50 \div 60$ мм, погружение стабилизатора $200 \div 220$ мм. Очевидно, что при нулевом натяжении парус превращается в флюгер (вымпел) не создающей подъемной силы, при большом натяжении приближается к пластине жестко связанной с корпусом судна (стабилизатор). Данные рис. 7 показывают, что имеется оптимальная величина натяжения (в данном случае около 100 г).

На рис. 8 показаны результаты испытаний ВД типа подводный парус на моделях полупогруженного судна различных масштабов на одинаковых волнах (тах). Модель длиной 1700 мм с парусом длиной 195 мм и натяжением 1440 гс испытывалась при осадках 433 и 720 мм.

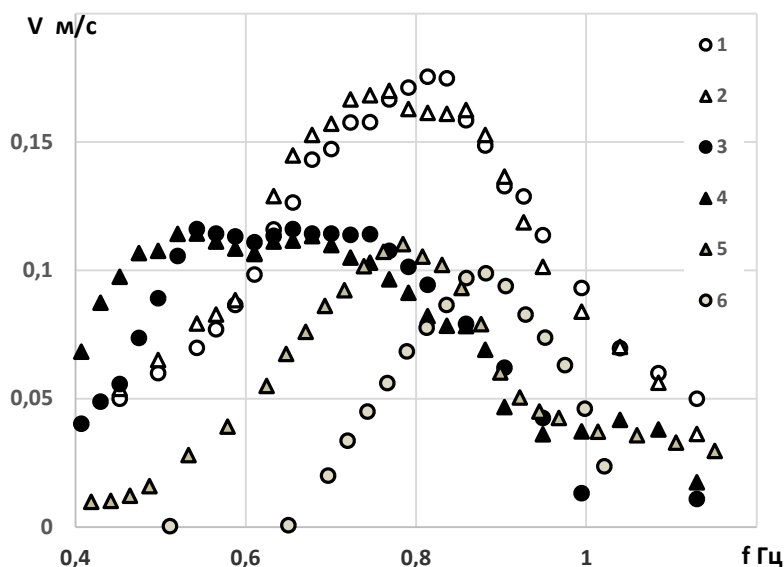


Рис. 8. Результаты испытаний ВД типа подводный парус на моделях полупогруженного судна различных масштабов на одинаковых волнах. Здесь обозначено: 1 и 2 малая модель при осадках катамарана 340 и 460 мм, 3 и 4 большая модель при 433 и 720 мм, 5 и 6 малая модель с ПВД, пластина длиной 100 и 300 мм

Малая модель длиной 840 мм с парусом длиной 100 мм и натяжением 380 гс испытывалась при осадках 340 и 460 мм. Видно, что для малой модели по сравнению с большой значительно увеличились частоты наиболее эффективной работы ВД (от 0.51 до 0.8 Гц), соответствующие длины волн уменьшились от 4.86 м до 2.46 м, то есть пропорционально уменьшению масштаба модели, поэтому отношение длины волн к общей длине судна остается примерно постоянным (2.85 для большого масштаба и 2.93 для малого). Для обычных водоизмещающих судов это отношение также постоянно, но меньше примерно в два раза. Видно (рис. 8), что скорость малой модели по сравнению с большой увеличилась примерно в 1.6 раза, высота волн при соответствующих частотах увеличилась в 2 раза.

На рис. 8 приведены также зависимости скорости движения против волн при использовании прямоточного ВД на малой модели полупогружного катамарана. В качестве рабочего органа использовались пластины из оргстекла длиной 100 и 300 мм, установленные под углом 30° к горизонтали. Осадка модели катамарана составляла 470 мм. Видно, что здесь максимум скорости движения судна сдвигается еще дальше в сторону больших частот вплоть до момента возникновения волн предельной крутизны (штормовых волн). Исследование подробностей применения прямоточного ВД на полупогружном катамаране приведены ниже.

6. Прямоточный волновой движитель

В волновом движителе с качающимся подпружиненным профилем тяга создается за счет подъемной силы крыла при его обтекании жидкостью. В прямоточном ВД работает другой механизм. Опрокидывающиеся на наклонной пластине (или профиле) волны создают повышенный уровень жидкости за пластиной. В работе [5] расчетным путем показано, что в процессе взаимодействия волн с пластиной профили давления на передней и задней поверхности пластины близки к гидростатическим. Наибольшая сила тяги возникает в момент начала взаимодействия подошвы волны с передней поверхностью пластины, когда имеется наибольшая разность уровней жидкости на передней и задней поверхностях пластины. В случае большой модели СМПВ в качестве рабочего органа прямоточного ВД использовался тот же профиль НАСА 0015 с хордой 170 мм, жестко закрепленный в проточной части модели, с наклоном хорды к горизонту 30° . Во всех экспериментах наклонная пластина (или профиль) устанавливались таким образом, чтобы задняя кромка находилась на уровне невозмущенной поверхности жидкости. На рис. 9 представлены зависимости скорости движения СМПВ против волн от частоты при различной осадке корпусов судна (кривые 1–6 соответствуют осадке 770, 660, 500, 435, 305 и 170 мм). Заглубление стабилизатора для всех случаев 500 мм.

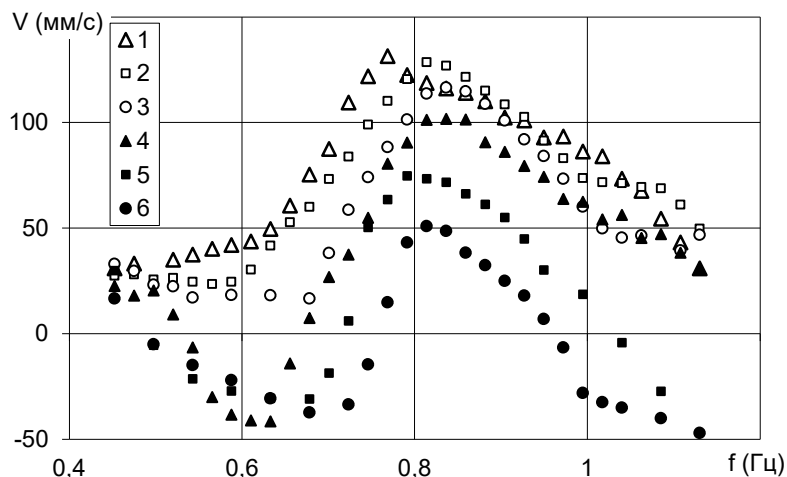


Рис. 9. Зависимости скорости движения большой модели СМПВ против волн от частоты при различной осадке корпусов судна (кривые 1–6 соответствуют осадке 770, 660, 500, 435, 305 и 170 мм)

Видно, что эффективность прямоточного ВД сильно зависит от осадки судна, причем, в отличие от крыльевого ВД, она монотонно растет с увеличением осадки.

Исследования эффективности работы прямоточного ВД (ПВД) на малом катамаране (длиной 840 мм) были проведены. при достаточно большой осадке – 470 мм. В качестве движителя использовалась пластина, верхняя кромка которой устанавливалась на уровне невозмущенной поверхности жидкости (вопрос об оптимальном заглублении пластины был исследован в работе [6]).

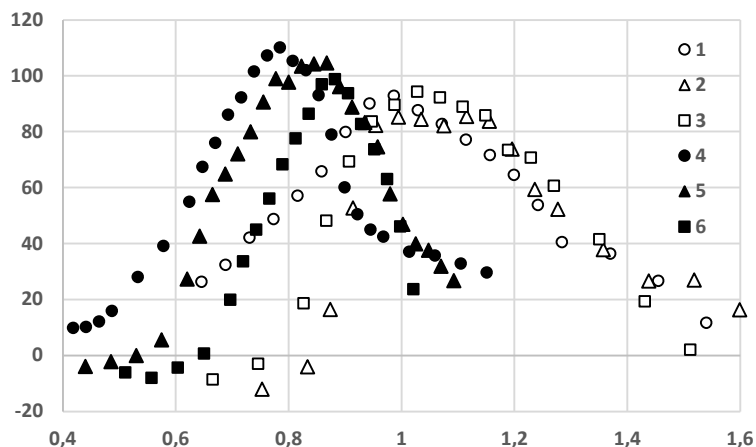


Рис. 10. Зависимость скорости движения против волн от длины пластины. Эксперименты 1–3 для min волн и длине пластины 100, 200, 300 мм, 4–6 для max волн и длине 100, 140, 300 мм

На рис. 10 представлены зависимости скорости движения против волн от длины пластины (наклон везде одинаков 30°) для максимального (max - темные знаки) и минимального (min – прозрачные) режимов работы волнопродуктора. Осадка судна 460 мм. Разумеется, скорость движения судна больше на волнах большей амплитуды. Кроме того, положение максимума скорости с уменьшением высоты волн смещается в сторону больших частот и для режима min (1–3, на рис. 10) не зависит от длины пластины и практически совпадает с максимумом высоты волн, соответствующему максимальной крутизне волн равной примерно $0.07 \div 0.09$ (см. рис. 1). Зависимость положения максимума скорости от длины пластины для режима max можно объяснить тем, что для короткой пластины (длина 100 мм) подошва волны может быть ниже нижней кромки такой пластины, находящейся на глубине 50 мм (а высота волны при частоте 0.8 Гц примерно 120 мм, см. рис. 1).

На рис. 11 представлены зависимости скорости от частоты волн (режим max) для пластины длиной 100 мм, осадка судна 470 мм, заглубление стабилизатора $170 \div 175$ мм. Изменялся угол наклона пластины.

Следовательно, нижняя кромка заглубляется по мере роста угла наклона (при изменении угла от 15° до 90° заглубление нижней кромки в покое меняется от 26 до 100 мм). Как было отмечено выше, уже при наклоне 30° заметен эффект взаимодействия подошвы волны с нижней кромкой пластины, при наклоне 15° максимум скорости достигается при высоте волн всего лишь 87 мм (см. рис. 11 и рис. 1) в три с лишним раза большей заглубления нижней кромки. При дальнейшем увеличении высоты волн нижняя кромка пластины в фазе взаимодействия с подошвой волны выходит из воды, эффект «плотины» исчезает, ситуация становится противоположной – доминирует фаза наката волны на верхнюю поверхность пластины. В этом случае имеет место дрейф судна по волнам (рис. 11). При наклоне 90° волны взаимодействуют с вертикальным торцом. На умеренной интенсивности волнения здесь имеет место дрейф судна по волнам. Интересно, что с ростом волн опять появляется эффект «плотины» с эффектом движением судна против волн. Однако, этот эффект весьма мал, наибольший же эффект наблюдается при наклоне пластины 30° .

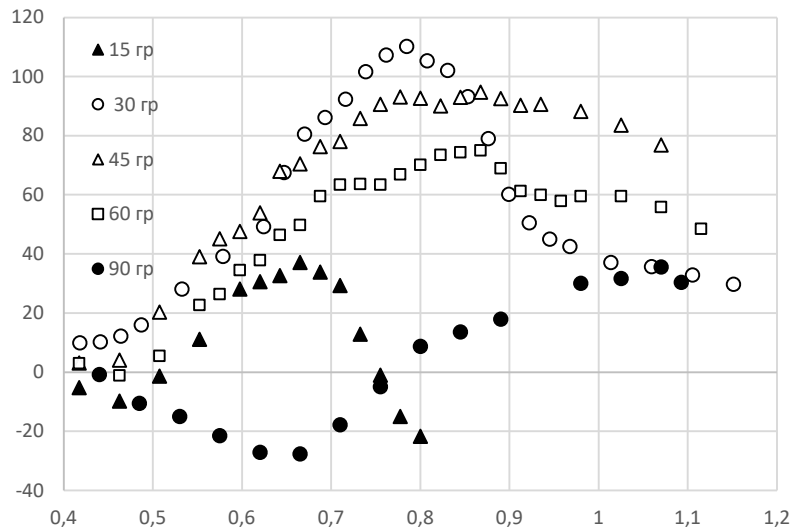


Рис. 11. Зависимость скорости от частоты волн для пластины длиной 100 мм при углах наклона 15, 30, 45, 60, 90°

Были также проведены эксперименты при различных углах наклона пластин с верхней кромкой на уровне поверхности воды (в покое), и одинаковым заглублением нижней кромки – 70 мм (такое заглубление соответствует примерно половине максимальной высоте волн в канале и взаимодействие с подошвой волны здесь слабое). Эти эксперименты показали, что наибольшие скорости судна против волн реализуются при углах наклона пластины в диапазоне $30^{\circ} \div 45^{\circ}$.

7. Заключение

В гидроканале института механики МГУ проведены экспериментальные исследования движения против волн моделей судна с малой площадью сечения по ватерлинии (СМПВ), или полупогруженного катамарана, длиной 1700 мм и 840 мм, оснащенных волновым движителями типа подпружиненное машущее крыло (профиль НАСА-0015) и подводный парус. Обнаружено, что при значительно погруженных корпусах катамарана основным источником килевой качки судна является сам движитель в отличие от обычных судов, где причиной качки является непосредственное взаимодействие корпуса судна с волнами. При погружении корпусов катамарана (при постоянном заглублении движителя) максимальная скорость движения судна сначала падает, а затем увеличивается, причем длина наиболее эффективных волн увеличивается примерно в два раза по сравнению со случаем плавающих корпусов. Качка, а также эффективность таких движителей максимальна при положении движителя вблизи свободной поверхности (на уровне подошвы волны) и быстро убывает с погружением на глубину.

Были проведены эксперименты с прямоточным волновым движителем ПВД (для большой модели использовался жестко закрепленный профиль НАСА-0015, на малой - наклонная, пластина), которые показали, что максимум скорости движения судна значительно сдвигается в сторону коротких волн, вплоть до момента возникновения волн предельной крутизны (штормовых волн) с крутизной примерно равной $0.07 \div 0.09$. Эффективность ПВД для плавающих корпусов катамарана невелика, но она быстро растет с погружением корпусов под воду, приближаясь к эффективности ВД типа качающийся профиль.

Проведены экспериментальные исследования влияния на эффективность работы прямоточного движителя его параметров, которые показали, что для эффективной работы пластины ПВД ее нижняя кромка должна находиться несколько ниже подошвы набегающих волн, оптимальный угол наклона пластины находится в диапазоне $30^{\circ} \div 45^{\circ}$. Увеличение длины пластины сверх оптимального размера приводит к уменьшению скорости движения судна.

Эффективность волновых движителей типа качающееся крыло или подводный парус в рабочем диапазоне частот несколько выше, чем у ПВД. Однако, в случае штормовых условий плавания, ПВД имеет преимущество, так как именно в таких условиях показывает наивысшую эффективность, а остальные рассмотренные варианты эффективны в диапазоне длин волн, зависящим от длины судна и, вообще говоря, не совпадающим с длиной штормовых волн (как это и имеет место в представленных экспериментах).

Благодарности и ссылки на гранты

Авторы выражают благодарность Филатову Евгению Васильевичу за участие в экспериментах.

Литература

1. Прокофьев В.В., Филатов Е.В., Такмазьян А.К., Якимов А.Ю. Сравнительные исследования эффективности судовых волновых движителей различных типов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. № 3. С. 1–17.
2. Константинов Г.А., Якимов Ю.Л. Расчет тяги движителя судна, использующего энергию морских волн // Изв. РАН МЖГ. 1995. № 3. С. 139–143.
3. Очеретяный С.А., Прокофьев В.В., Такмазьян А.К., Филатов Е.В. Воздействие волн на погруженную в жидкость подвижную пластину: физический и численный эксперимент // Известия РАН МЖГ, 2013, № 4, с.27–34.
4. Глушко В.Н. Исследование влияния параметров морского волнения на величину тяги, создаваемой волновым движителем в виде колеблющегося крыла с упругой заделкой // Прикладная гидромеханика. 2009. Т. 11. С. 47–53.
5. Прокофьев В.В., Такмазьян А.К., Филатов Е.В. Результаты испытаний судна с различными волновыми движителями в гидроканале // Известия РАН МЖГ. 2019. № 6. С. 38–47.
6. Прокофьев В.В., Такмазьян А.К., Филатов Е.В. Испытание и расчет движения модели судна с прямоточным волновым движителем // Известия РАН МЖГ. 2017. № 4. С. 24–38
7. Дубровский В.А. Главное о судах с малой площадью ватерлинии // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. Т. 3. № 397. С. 75–82.

References

1. Prokofiev V. V., Filatov E. V., Takmazyan A. K., Yakimov A. Yu., Comparative studies of efficiency of ship wave propulsors of different types, *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, pp. 1–17.
2. Konstantinov G.A. Yakimov Yu. L., Calculation of the thrust of a ship's propulsion system using the energy of sea waves, *Izv. RAN Fluid and Gas Mechanics*, 1995, № 3, pp. 139–143.
3. Ocheretyanyi S.A., Prokofiev V.V., Takmazyan A.K., Filatov E.V., Wave Action on a Movable Plate Immersed into a Fluid. Physical and Numerical Experiments, *Fluid Dynamics*, 2013, vol. 48, no. 4, pp. 445–451. DOI: 10.1134/S0015462813040030
4. Glushko V. N., Study of the influence of sea wave parameters on the amount of thrust created by a wave mover in the form of an oscillating wing with elastic fastening, *Applied fluid mechanics*, 2009, vol. 1, pp. 47–53.
5. Prokofiev V. V., Takmazyan A. K., Filatov E. V., Testing a Boat with Different Wave Propulsors in a Hydrodynamic Channel, *Fluid Dynamics*, 2019, vol. 54, no. 6, pp. 774–784. DOI: 10.1134/S0015462819060089

6. Prokofiev V. V., Takmazyan A. K., Filatov E. V., Testing and Calculations of the Motion of a Model Ship with a Direct-Flow Wave Propulsor, *Fluid Dynamics*, 2017, vol. 52, no. 4, pp. 481–494. DOI: 10.1134/S0015462817040032
7. Dubrovsky V. A., The Main Thing About Small Waterline Area Vessels, *Proceedings of the Krylov State Scientific Center*, 2021, vol. 3, no. 397, pp. 75–82.

Статья поступила в редакцию 30 октября 2024 г.