

## Сравнительные исследования эффективности судовых волновых движителей различных типов

© В.В. Прокофьев, Е.В. Филатов, А.К. Такмазьян, А.Ю. Якимов

НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119192, Россия

*Исследовано влияние килевой качки на эффективность прямоточного волнового движителя. Показано, что в условиях килевой качки она снижается. Изучена зависимость эффективной работы волнового движителя от его размещения на корпусе судна. При одинаковых условиях проведен сравнительный анализ волновых движителей различных типов. Кроме прямоточного движителя рассмотрены гибкая пластина (плавник), качающаяся пластина с упругими связями, движитель типа подводного паруса. Установлено, что применение пластины-стабилизатора на корме судна повышает эффективность волнового движителя, а также носовой качающейся пластины во всем исследованном диапазоне волн, в то время как в случае паруса присутствие стабилизатора приводит к смещению зависимости скорости от частоты волн в сторону низких частот. Сравнение различных волновых движителей машущего типа показало заметное преимущество движителя типа подводного паруса.*

**Ключевые слова:** морские волны, волновой движитель, судно, прямоточный волновой движитель, подводный парус, эксперимент

**Введение.** Волновая энергетика моря весьма велика — средняя мощность волнения морей и океанов по данным International Energy Agency оценивается в 40...100 кВт/м [1]. Традиционные схемы волновых движителей ВД [2–6] имеют подвижные элементы, эффект создания в них тяги связан в основном с качкой самого судна, т. е. такие волновые движители можно рассматривать как разновидность машущих движителей.

Новый принцип устройства прямоточного волнового движителя, не имеющего подвижных элементов и никак не связанного с качкой судна, описан в работе [7]. Здесь использован эффект превращения потенциальной энергии в кинетическую при опрокидывании волн. В работе [8] с помощью физического и численного экспериментов приведены результаты исследования движения погруженной в жидкость пластины против волн при их опрокидывании на пластине. Пластина вертикально не перемещалась, поскольку была закреплена на тележке, свободно двигавшейся вдоль волнового канала по рельсам. Известны результаты экспериментального и численного исследования движения под действием волн модели судна-катамарана, в средней части которого установлена наклонная пластина-волнодвижитель [9]. Большая длина корпусов таких судов обеспечивает отсутствие для них килевой качки. Однако в отличие от пластины, жестко закрепленной на тележке, для судна-катамарана характерна

вертикальная качка, вызванная вертикальной составляющей переменной силы, действующей со стороны волн на пластину.

Используемый в прямоточном волновом движителе эффект связан с нелинейным взаимодействием волн и движителя, которое описывает только теория нелинейных волн.

В работах [10–14] на основе метода Буссинеска представлены нелинейные уравнения с учетом дисперсии, пригодные для описания эволюции длинных волн, распространяющихся в жидкости конечной глубины. Они использованы для случая опрокидывания волн при накате на наклонный берег [15–21]. Примеры современных достижений теории нелинейных волн приведены в работах В.Е. Захарова и соавторов [22–24]. Ими применен метод обратной задачи рассеяния, который позволяет по эволюции данных рассеяния восстановить эволюцию решения нелинейного уравнения.

Для расчета взаимодействия волн с наклонной пластиной-волнодвижителем авторы работ [8, 9] использовали численный метод решеточных уравнений Больцмана (Lattice Boltzmann methods, LBM) [25, 26], который в отличие от многих других методов не решает уравнение Навье — Стокса, а моделирует течение ньютоновской жидкости с помощью дискретного кинетического уравнения Больцмана. Главный аргумент — применимость метода для расчета опрокидывающихся волн с возможным изменением связности области течения.

С помощью вычислительного пакета XFlow™ компании Next Limit Technologies™ В.В. Ширококовым [27] проведено численное моделирование процесса возбуждения волн в канале с помощью клиновидного волнопродуктора и одновременно нелинейное взаимодействие этих волн с наклонной пластиной. Таким образом удалось определить основные причины, вызывающие движение пластины-волнодвижителя против волн.

Цель работы — экспериментально определить эффективность прямоточного волнового движителя в условиях значительной килевой качки судна, провести его сравнение с качающимися волновыми движителями, использующими качку, а также проанализировать эффективность качающихся волновых движителей различных конструкций.

Эффективность движителей определяется методом сравнения средних скоростей движения модели судна-катамарана на одинаковых волнах с сохранением примерно одинаковой площади различных волновых движителей (например, прямоугольной пластины и паруса). Испытания проводились в волновом канале НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова на укороченном судне-катамаране (длина 1,7 м) в условиях интенсивной килевой качки — периодические волны возбуждались клиновидным волнопродуктором. Выявлено, что эффективность установленного на носу судна прямоточного волнового

двигателя в этих условиях уступает его эффективности при отсутствии килевой качки, однако применение пластины-стабилизатора на корме судна повышает эффективность волнодвигателя до прежнего уровня. В то же время эффективность прямоточного волнодвигателя не уступает эффективности традиционного движителя типа качающейся пластины. Сравнительный анализ различных волновых движителей машущего типа показал существенное преимущество движителя типа подводного паруса.

**История вопроса.** Первые упоминания об использовании энергии морских волн для движения судов относятся к XIX в. В 1895 г. в Великобритании проводились испытания лодок, оснащенных движителем в виде эластичного плавника, установленного за кормой лодки. Скорость лодок против ветра и волнения достигала 4 узлов (7,4 км/ч). В СССР идея использования энергии качки судна была высказана и математически обоснована Г.Е. Павленко в середине 1930-х годов [28], который предложил устройство, состоящее из некоторого количества небольших плавников крылообразной формы, выступающих снаружи обшивки судна.

Препятствием к применению волновых движителей, с одной стороны, является нестабильность параметров реальных морских волн, с другой — существенная зависимость эффекта от параметров судна и волнового движителя. Тем не менее примеры применения волнового движителя довольно многочисленны. Интерес к этой научно-технической проблеме заметно возрос в 1970-е годы. Новые схемы крыльевых волновых движителей предложил Ю.Ф. Сенькин и соавторы [2, 29, 30], принципиально объяснив механизм создания тяги крыльевыми волновыми движителями [3]. В начале 1980-х годов некоторые конструкции были испытаны в Норвегии [4]. Норвежское правительство спонсировало работы по переоборудованию 180-тонного рыболовного НИС Kystfangs длиной 20 м с двумя опускающимися волновыми движителями — крыльями полной площадью около 3 м<sup>2</sup>. Отмечено, что при испытаниях на волнах высотой примерно 3 м при скорости судна 4–8 узлов (7...15 км/ч) крылья обеспечили тягу, составляющую 15...20 % полного сопротивления судна [31].

В 1989 г. началось проведение модельных испытаний различных судов с волновыми движителями в гидроканале НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова. Некоторые модели испытывались в мореходном бассейне ЦНИИ имени академика А.Н. Крылова (ныне ФГУП «Крыловский государственный научный центр») и в опытовом бассейне Калининградского технического института рыбной промышленности и хозяйства (ныне Калининградский государственный технический университет). В 1995–1996 годах создан и испытан опытно-промышленный образец малого рыболовного траулера типа

«Балтика» длиной 25,5 м и водоизмещением 174 т с выдвигаемыми крыльевыми движителями на носу судна [3]. Действующую полномасштабную модель судна с волновым движителем опробовал ее конструктор Кеничи Хори (Kenichi Hori) в 2008 г. На яхте Suntory Mermaid II, движимой исключительно волновым приводом, удалось пройти более 4000 миль (7400 км) [5]. Интересный пример промышленного использования аппарата с волновым движителем продемонстрирован компанией Liquid Robotics, которая вложила 45 млн дол. США в разработку самоходных автономных морских установок [32]. В 1995 г. была предложена математическая модель для расчета тяги волнового движителя с учетом килевой и вертикальной качки судна [6]. Использовалась линейная теория волн [33] и линейная теория качки, которые широко применялись для расчета качки судов на регулярных и нерегулярных волнах [34–39]. Кораблестроители использовали преимущественно теорию качки корабля М.Д. Хаскинда [40], учитывающую не только воздействие волн на корабль, но и влияние корабля на поле скоростей волнового движения. В работе [6] показано, что эффект создания тяги связан главным образом с качкой судна, и наибольшей тяги волнового движителя можно достичь при длине волны, соизмеримой с длиной судна.

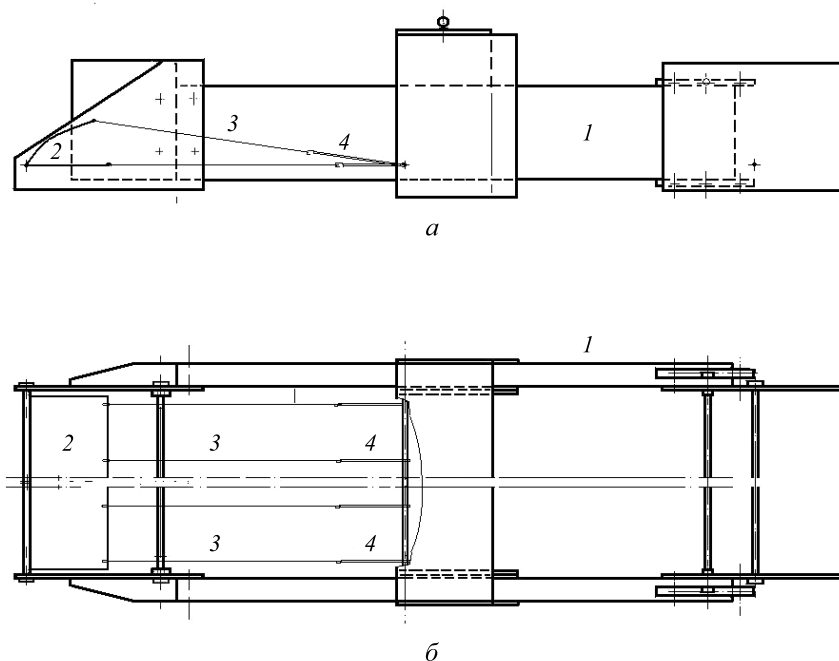
Ю.Л. Якимовым [41] проведены оценки максимального эффекта, связанного с использованием энергии морских волн, которую приобретает судно в пределах своей ширины.

Все рассмотренные выше схемы волновых движителей имеют подвижные элементы, и эффект связан в основном с качкой самого судна, т. е., как указано выше, их можно рассматривать в качестве разновидности так называемых машущих движителей.

**Испытания прямоточного волнового движителя.** Нами проведены испытания на укороченной (длина 1,7 м) модели катамарана (рис. 1), для которой, в отличие от удлиненной модели (6 м), существенное значение имеет килевая качка.

Получены данные испытаний в волновом канале прямоточного волнового движителя — жестко закрепленной, погруженной в воду наклонной пластины (рис. 2).

Скорость перемещения укороченного судна в области значительной килевой качки (при частоте волн 0,5...0,8 Гц) заметно меньше, чем удлиненного, несмотря на значительное уменьшение сопротивления трения и массы судна. После установки на корме дополнительно гибкой пластины-плавника скорость значительно возросла и достигла уровня, характерного для удлиненного судна. Установка на корме жесткой пластины вместо гибкой не приводит к существенным отличиям. По-видимому, эффект увеличения скорости связан со стабилизирующим действием устройства, расположенного на корме. Работа двух прямоточных волновых движителей, закрепленных на носу и корме судна, дает неудовлетворительный результат.



**Рис. 1.** Схема судна-катамарана:

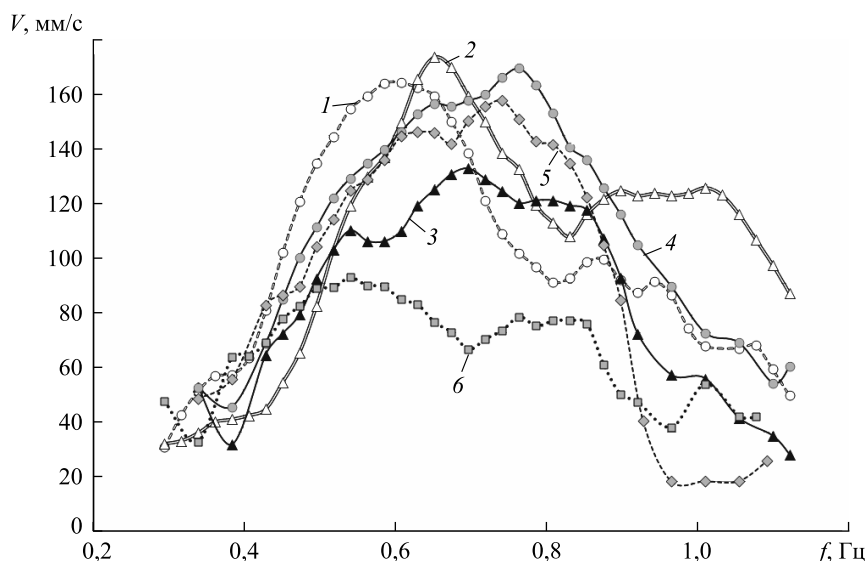
*a* — вид сбоку; *б* — вид сверху; *1* — корпус (из пенопласта); *2* — движитель (в прямоточном волновом движителе вместо паруса закреплена неподвижная относительно корпуса наклонная жесткая пластина); *3* — тяги-шнуры, соединяющие заднюю кромку паруса или подвижной пластины с закрепленной на корпусе штангой; *4* — натяжное устройство: резиновые петли с диаметром жгутов 2 или 1 мм

Следует отметить, что высота генерируемых в канале волн возрастает с увеличением частоты волн  $f$  и достигает максимума при  $f = 1,05$  Гц (рис. 3). Таким образом, максимум эффекта движения судна против волн здесь не связан с максимумом амплитуды или энергии генерируемых в канале волн.

**Движение судна с волновым движителем типа гибкой пластины.** Исследования проводились для волнового движителя типа гибкой тонкой пластины длиной 240 мм из оргстекла толщиной 1 мм при глубине канала 0,75 м. Положение пластины в покое — горизонтальное, глубина погружения — 100 мм.

При расположении гибкой пластины на корме отмечается большой размах качки носа (для низких частот он даже превосходит высоту волн), тогда как при расположении на носу размах качки носа весьма невелик (при этом наблюдается значительная качка кормы судна). Таким образом, центр качания судна перемещается в ту сторону, где расположен движитель. Если он расположен на корме, то работает неудовлетворительно — с возрастанием высоты волн проявляется сильный дрейф судна по волнам. При установке одинаковых гибких пластин на носу и корме скорость хода в некотором диапа-

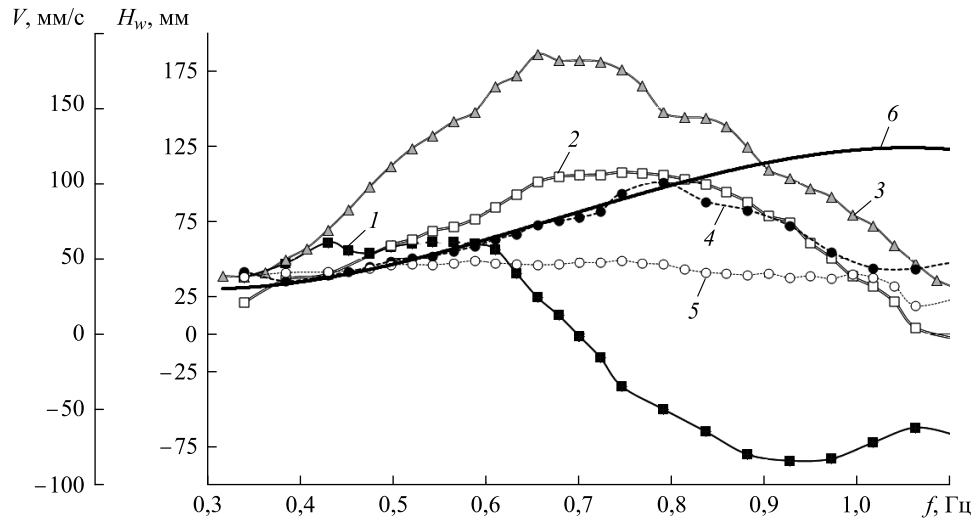
зоне волн значительно возрастет (почти в 2 раза) по сравнению с расположением одной гибкой пластины на носу. Аналогичный эффект наблюдается при одновременном расположении на носу судна прямого волнового движителя, на корме — дополнительной гибкой пластиной (см. рис. 2). Следует отметить, что максимум скорости судна при  $f = 0,6 \dots 0,7$  Гц не связан с максимальной амплитудой волн, характерной для значительно большей частоты — 1,05 Гц.



**Рис. 2.** Зависимость от частоты волн  $f$  средней скорости движения удлиненного (1, 2) и укороченного (3–6) катамаранов с прямоточным волновым движителем:

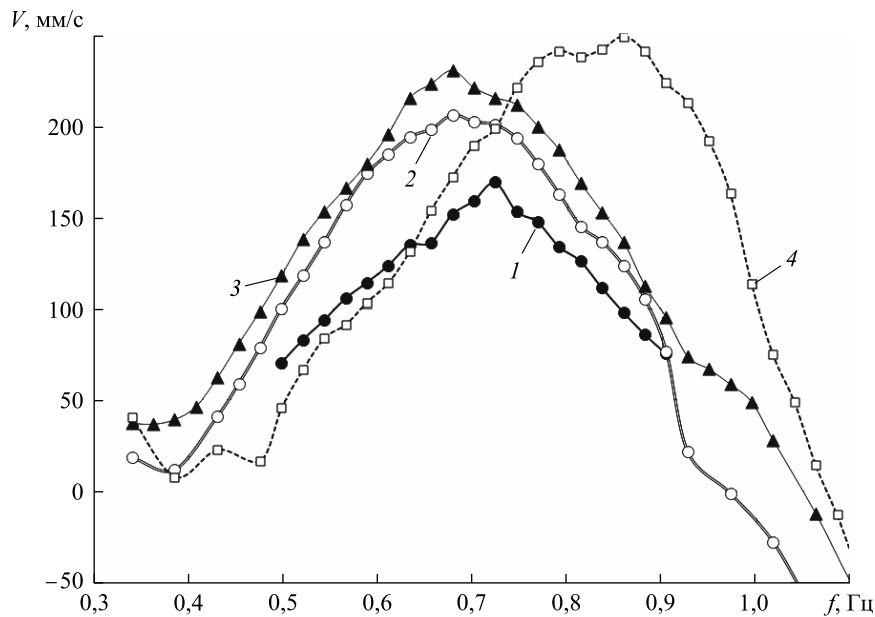
1 — длина катамарана 6 м, по центру укреплен жесткая пластина из оргстекла толщиной 5 мм и длиной 210 мм (ширина всех движителей 1 м; определяется расстоянием между корпусами катамарана), наклоненная под углом  $20^\circ$  (верхняя кромка пластины находится в состоянии покоя на уровне поверхности воды); 2 — то же, пластина с наклоном  $36^\circ$ ; 3 — длина катамарана 1,7 м, на носу такая же пластина (верхняя кромка — там же), но угол наклона  $30^\circ$ ; 4 — то же, на корме дополнительная гибкая пластина-плавник из оргстекла толщиной 1 мм, длиной 240 мм на глубине погружения 100 мм; 5 — то же, с заменой гибкой пластины на горизонтально закрепленную жесткую длиной 150 мм (стабилизатор); 6 — то же, но с жесткой пластиной, закрепленной на корме под углом  $30^\circ$  с заглублением верхней кромки в спокойном состоянии до 30 мм от невозмущенной поверхности (два прямоточных волновых движителя); глубина канала 0,95 м

**Движители с подвижными элементами, ограниченными упругими связями.** Представленные ниже результаты получены при глубине канала 0,95 м (с увеличением глубины при тех же частотах волн увеличивается их высота и, соответственно, скорость движения судна). В качестве волнового движителя использовалась пластина длиной 195 мм, кромка которой закреплена на оси, находящейся на глубине 80 мм (см. рис. 1). Противоположная кромка соединена пятью растяжками с натяжной штангой, расположенной на расстоянии 0,8 м от передней кромки пластины и на той же глубине.



**Рис. 3.** Зависимость от частоты волн  $f$  при глубине канала 0,95 м средней скорости движения судна с волновым движителем типа гибкой пластины (1–3) и размаха качки носа (4, 5):

1, 2 — расположение волнового движителя на корме и носу соответственно; 3 — одновременное расположение гибких пластин на корме и носу; 4, 5 — размах качки для первых двух случаев соответственно<sup>1</sup>; 6 — высота волн при глубине канала



**Рис. 4.** Зависимость от частоты волн  $f$  скорости движения судов с волновыми движителями, установленными на носу (1) (с упругими связями), на корме (2, 3), в носовой части под водой (4):

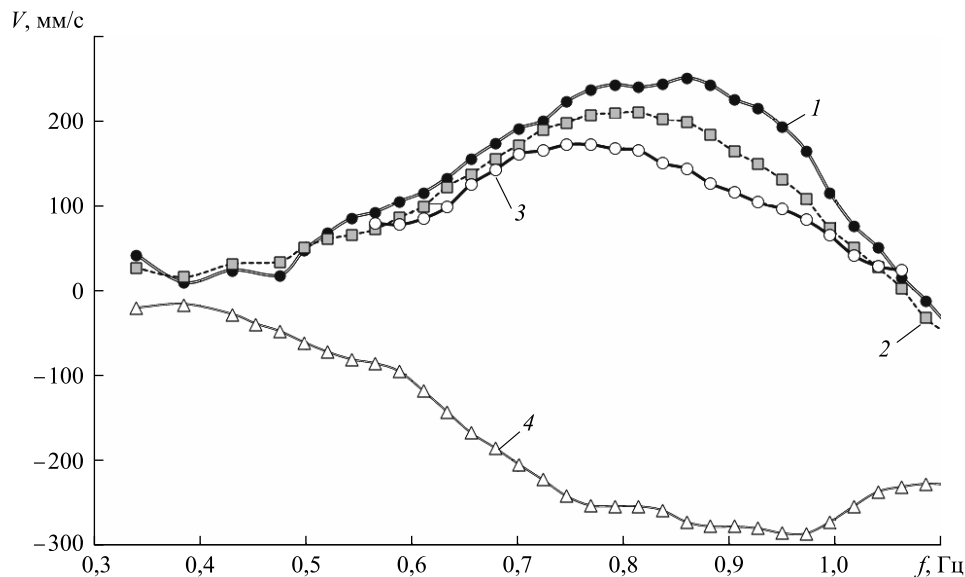
1 — качающаяся пластина длиной 195 мм; 2 — жесткая пластина длиной 165 мм; 3 — гибкая пластина длиной 163 мм; 4 — подводный парус длиной 200 мм

<sup>1</sup> Здесь и далее под размахом качки носа судна следует понимать среднюю за период наблюдения сумму максимальных для каждого периода качки отклонений носа по вертикали вниз и вверх от положения равновесия.

Натяжное устройство состоит из малорастяжимого шнура и резиновой петли длиной 150 мм (см. рис. 1, 3 и 4). Резиновая петля составлена из двух жгутов диаметром 2 мм каждый, модуль упругости резины  $100 \text{ г/мм}^2$ . Сила натяжения каждой из пяти растяжек составляет в покое примерно 98 Н.

Как и для прямоточного волнового движителя (см. рис. 2), так и для гибкой пластины (см. рис. 3) наблюдается значительное преимущество в скорости движения судна при установлении на его корме пластины-стабилизатора (гибкой или жесткой). Подводный парус, установленный на носу вместо пластины, работает иначе — при низкой частоте волн (и их малой высоте) его эффективность (скорость судна) близка к эффективности аналогичной пластины с упругими связями, но при увеличении частоты волн эффективность становится значительно выше даже со стабилизатором на корме.

Получены результаты исследований влияния упругих свойств натяжного устройства на эффективность работы волнового движителя типа подводного паруса (рис. 5). При фиксированных свойствах резиновых жгутов сила упругого натяжения при одинаковом отклонении паруса зависит от начальной (без отклонения паруса) длины двойной резиновой петли и от силы начального натяжения каждой тяги.



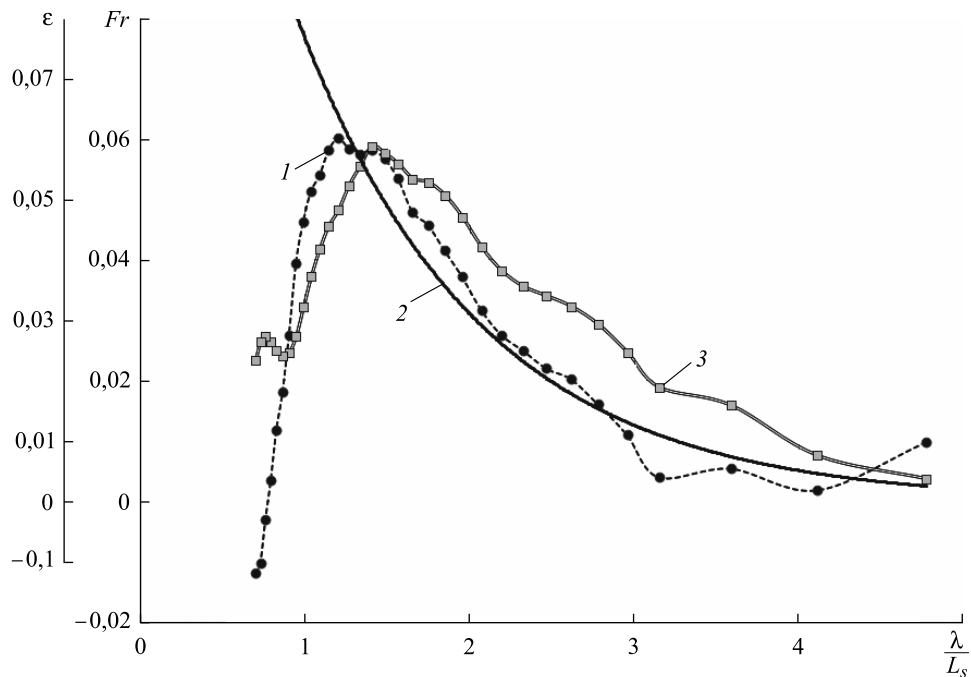
**Рис. 5.** Влияние упругих свойств натяжного устройства на эффективность волнового движителя при движении по попутным волнам катамарана, расположенного кормой к набегающим волнам:

1, 4 — длина двойной резиновой петли в покое 150 мм, сила начального натяжения каждой тяги 98 Н; 2 — длина 100 мм, сила 98 Н; 3 — длина 100 мм, сила 362 Н



В исследованном диапазоне коэффициентов упругости связи их уменьшение приводит к увеличению эффективности волнового движителя. Очевидно, имеется оптимальное натяжение, поскольку при отсутствии натяжения паруса движитель не должен создавать тягу. Уменьшение натяжения паруса не только увеличивает скорость во всем исследованном диапазоне частот волн, но и смещает максимум в сторону коротких волн. Судно с тем же волновым движителем, расположенное кормой к волнам, движется по волнам с несколько большей скоростью, чем против волн, а то, что скорость в этих двух случаях отличается незначительно, свидетельствует о высокой эффективности волнового движителя.

**Связь движения судна с качкой.** Проведен эксперимент с движителем типа подводного паруса (см. рис. 5, 1) и получены результаты (рис. 6) в безразмерном виде.

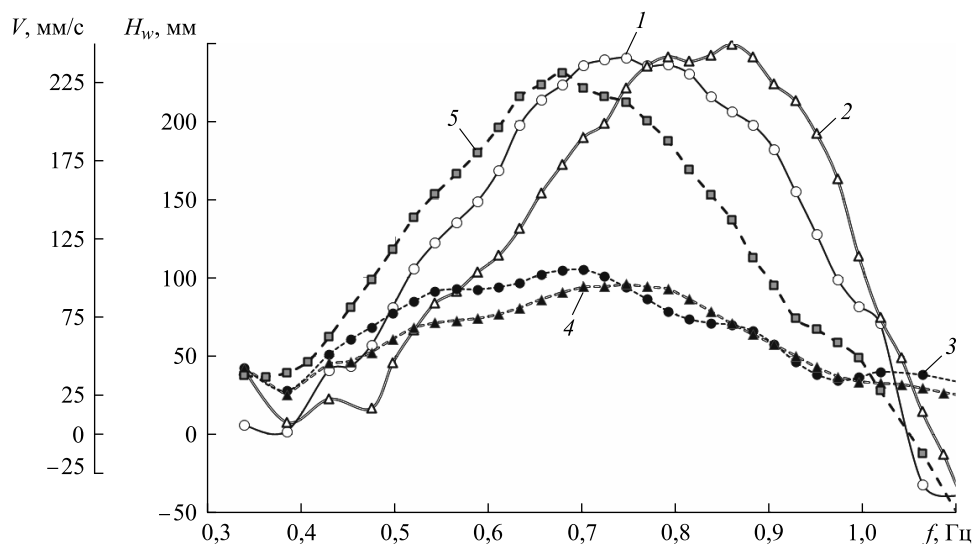


**Рис. 6.** Зависимость относительной качки носа судна и крутизны волн от отношения длины волны к длине судна (при глубине канала 0,95 м):

1 — число Фруда  $Fr = \frac{V}{\sqrt{gL_s}}$ ; 2 — крутизна волн 3, 5  $Fr_s \left( Fr_s = \frac{H_s f}{\sqrt{gL_s}} \right)$ ; 3 — относительная качка судна  $\left( \varepsilon = \frac{H_w}{\lambda} \text{ от } \frac{\lambda}{L_s} \right)$ ;  $V$  — средняя скорость движения судна;  $L_s$  — его длина;  $\lambda$  — длина волны;  $H_s$  — размах качки носа судна;  $H_s f$  — характерная скорость качающегося движителя в поперечном к набегающим волнам направлении

Из приведенных выше данных следует, что крутизна волн довольно далека от критических значений (для предельных волн Стокса  $\varepsilon = 0,14$ ). Можно заключить, что условия эксперимента моделируют режим морской зыби. Одинаковое поведение величин, характеризующих движение судна и интенсивность работы волнового движителя вследствие качки (см. рис. 6, 1 и 2), свидетельствует о том, что работа качающегося волнового движителя определяется в основном качкой судна. Максимальное значение числа Фруда достигается при длине волн, превосходящих длину судна примерно в 1,3 раза, и килевая качка судна близка к максимальной. Это согласуется с известными результатами [28].

Выше отмечено весьма полезное влияние на эффективность волнового движителя, размещенного на носу кормового стабилизатора. Для волнового движителя типа подводного паруса кормовой стабилизатор действует несколько иначе (рис. 7). Для качающейся пластины при наличии стабилизатора на корме скорость судна увеличивалась во всем исследованном диапазоне частот волн, а для паруса действие кормового стабилизатора сводится к смещению кривой в сторону более низких частот. Эффективность работы подводного паруса с кормовым стабилизатором несколько уступает эффективности качающейся пластины со стабилизатором при низких частотах (и амплитудах) волн, но значительно (до 2 раз) превосходит эффективность пластины при более высоких частотах волн.



**Рис. 7.** Зависимость от частоты волн  $f$  скорости движения судов с волновыми движителями типа подводного паруса со стабилизатором (пластина длиной 163 мм) на корме (1) и без него (2) и типа качающейся пластины со стабилизатором на корме (5) и соответствующие зависимости для размаха качки носа (3, 4):

1, 2 — длина подводного паруса 200 мм; 3, 4 — соответственно размах качки для судна со стабилизатором на корме и без него; 5 — длина качающейся пластины 195 мм; натяжное устройство во всех случаях одинаковое

Максимум размаха качки носа в присутствии стабилизатора на корме так же, как и для скорости судна, сдвигается в сторону низких частот. Тем самым изменение скорости судна в присутствии кормового стабилизатора здесь можно связать с изменением характера качки носа.

**Заключение.** Показано, что наличие килевой качки заметно уменьшает максимальную скорость судна, оборудованного прямоточным волнодвижителем. Однако установка пластины-стабилизатора на корме судна повышает эффективность волнового движителя до уровня, полученного в тех же условиях на удлиненном судне. При размещении на носу эффективность прямоточного волнодвижителя в условиях килевой качки судна не уступает эффективности волнодвижителя типа гибкой пластины, поскольку прямоточный волнодвижитель может работать и в условиях отсутствия качки.

Эффективность гибкой пластины, размещенной на корме судна, значительно снижается по сравнению с пластиной, размещенной на носу, — центр качания судна перемещается в ту сторону, где расположен движитель. Обнаружено, что две гибкие пластины, расположенные на носу и на корме судна, обеспечивают примерное удвоение скорости движения судна по сравнению с судном, на носу которого расположена одна носовая пластина.

Наибольшую эффективность показал расположенный в носовой части судна волнодвижитель типа подводного паруса. Оказалось, что для повышения его эффективности натяжное устройство должно допускать значительное отклонение паруса от стационарного положения. Такой же волновой движитель обеспечивает еще большую скорость при движении судна по волнам. Несущественное отличие скорости движения судна по волнам и против них свидетельствует о хорошей эффективности волнового движителя.

Сравнительный анализ подводного паруса и равной ему по площади поворачивающейся жесткой пластины с одинаковыми натяжными устройствами показали существенное преимущество паруса в области коротких волн. Наличие на корме судна пластины-стабилизатора значительно увеличивает эффективность качающейся пластины на носу во всем исследованном диапазоне волн, в то время как в случае паруса присутствие стабилизатора приводит просто к смещению характеристики в сторону низких частот.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-08-00807*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Барабанщиков Д.А., Сердюкова А.Ф. Электроэнергетика океана. *Молодой ученый*, 2016, № 11 (115), часть XVII, с. 1825–1828.

- [2] Сенькин Ю.Ф. Судовой волновой движитель. А.с. 592671 СССР, кл. В 63 Н 19/02, 04.09.1974. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/109/1093621.html> (дата обращения 26.12.2017).
- [3] Nikolaev M.N., Savitskiy A.I., Senkin Y.F. Basics of Calculation of the Efficiency of a Ship with Propulsor of the Wing Type. *Sudostroenie*, 1995, vol. 4 (7), pp. 7–10.
- [4] Jakobsen E. The Foil propeller, wave power for propulsion. *Second Int. Symp. on Wave and Tidal Energy, BHRA Fluid Engineering*, 1981, pp. 363–369.
- [5] Японец покорит Тихий океан с помощью силы волн. *Корреспондент.net*, 17.03.2008. URL: <https://korrespondent.net/tech/science/406480-yaпонec-pokorit-tihij-okean-s-pomoshchyu-sily-voln> (дата обращения 26.12.2017).
- [6] Константинов Г.А., Якимов Ю.Л. Расчет тяги движителя судна, использующего энергию морских волн. *Известия РАН. Механика жидкости и газа*, 1995, № 3, с. 139–143.
- [7] Якимов Ю.Л., Якимов А.Ю. Прямоточный волновой движитель судна. *Вестник Мос. ун-та. Серия 1: Математика. Механика*, 2005, № 4, с. 59–62.
- [8] 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. Механика жидкости и газа*, 2013, № 4, с. 27–34.
- [9] Прокофьев В.В., Такмазьян А.К., Филатов Е.В. Испытание и расчет движения модели судна с прямоточным волновым движителем. *Известия РАН. Механика жидкости и газа*, 2017, № 4, с. 24–38.
- [10] Madsen P.A., Schaffer H.A. Higher order Boussinesq-type equations for surface gravity waves: derivation and analysis. *Philos. Trans. Royal. Soc. London. Ser. A*, 1998, vol. 356, no. 1749, pp. 3123–3184.
- [11] Madsen P.A., Bingham H.B., Liu H. A new Boussinesq method for fully nonlinear waves from shallow to deep water. *J. Fluid Mech.*, 1966, vol. 462, pp. 1–30.
- [12] Peregrine D. Long waves on a beach. *J. Fluid Mech.*, 1967, vol. 27, pp. 815–827.
- [13] Nwogu O. An alternative form of the Boussinesq equations for nearshore wave propagation. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 1993, vol. 119, no. 6, pp. 618–638.
- [14] Wei G., Kirby J.T., Grilli S.T., Subramanya R.A. Fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Pt 1. Highly nonlinear unsteady waves. *J. Fluid Mech.*, 1995, vol. 294, pp. 71–92.
- [15] Tsuji Y., Nagata Yu. Stokes' expansion of internal deep water waves to the fifth order. *J. Ocean. Soc. Japan*, 1973, vol. 29, no. 2, pp. 61–69.
- [16] Афанасьев К.Е., Стуколов С.В. Накат уединенной волны на наклонный берег. *Вестник Омск. ун-та*, 1998, вып. 3, с. 9–12.
- [17] Carrier G.F. Gravity waves of variable water depth. *J. Fluid Mech.*, 1966, vol. 24, pp. 641–659.
- [18] Carrier G.F., Wu T.T., Yeh H. Tsunami run-up and draw-down on a plane beach. *J. Fluid Mech.*, 2003, vol. 475, pp. 79–99.
- [19] Synolakis C.E. The run-up of solitary waves. *J. Fluid Mech.*, 1987, vol. 185, pp. 523–545.
- [20] Tuck E.O., Huang L.-S. Long wave generation on a sloping beach. *J. Fluid Mech.*, 1972, vol. 51, pp. 449–461.
- [21] Spielvogel L.Q. Single wave run-up on sloping beaches. *J. Fluid Mech.*, 1976, vol. 74, pp. 685–694.
- [22] Захаров В.Е., Манаков С.В., Новиков С.П., Питаевский Л.П. *Теория солитонов: метод обратной задачи*. Москва, Наука, 1980, 320 с.

- [23] Геогджаев В.В., Захаров В.Е. Численный и аналитический расчет параметров степенных спектров гравитационных волн на глубокой воде. *Письма в ЖЭТФ*, 2017, 106 (3), с. 175–178.
- [24] Agafontsev D.S., Zakharov V.E. Integrable turbulence and formation of rogue waves. *Nonlinearity*, 2015, 28 (8), pp. 2791–2821.
- [25] Chen S., Doolen G. Lattice Boltzmann method for fluid flows. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 1998, vol. 30, pp. 329–364.
- [26] Succi S. *The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond*. Oxford, OUP (Oxford University Press), 2001, pp. 82–84.
- [27] Ширококов В.В. XFlow — новый программный комплекс для моделирования физических процессов, связанных с гидрогазодинамикой и теплообменом. *CADmaster*, 2011, № 5 (60).  
URL: [http://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm\\_60\\_13.html](http://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_60_13.html) (дата обращения 26.12.2017).
- [28] Павленко Г.Е. Использование энергии качки на волнении для движения судов. *Судостроение*, 1936, № 6, с. 394–401.
- [29] Сенькин Ю.Ф. Судовой волновой движитель. А.с. 1131770 СССР, заявка от 04.08.83. Опубликовано 30.12.1984.  
URL: <http://patents.su/3-1131770-sudovojj-volnovojj-dvizhitel.html> (дата обращения 26.12.2017).
- [30] Сенькин Ю.Ф. Движет судно энергия волн. *Катера и яхты*, 1987, № 2 (126), с. 22–27.
- [31] Berg A. Trials with Passive Foil Propulsion on M/S Kystfangst. *Trondheim. Techn. Rep.* Project No. 672.138 (1985).
- [32] Learn More. *Liquid robotics*. A Boeing Company. URL: <http://www.liquidrobotics.com> (дата обращения 26.12.2017).
- [33] Сретенский Л.Н. *Теория волновых движений жидкости*. 2-е изд. перераб. и доп., Москва, Наука, 1977, 815 с.
- [34] Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. *Качка судна на морском волнении*. Ленинград, Судостроение, 1969, 432 с.
- [35] Дроздов Ю.М., Нецветаев Ю.А. Расчет продольной качки судна на встречном волнении с помощью ЦВМ. *Тр. ЦНИИ им. А.Н. Крылова*, 1970, вып. 259, с. 64–73.
- [36] Войткунский Я.И., ред. *Справочник по теории корабля. В 3 т. Т. 1: Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители*. Ленинград, Судостроение, 1985, 764 с.
- [37] Басин М.А. *Компьютеры. Вихри. Резонансы: волновая теория взаимодействия структур и систем*. Часть 2. Санкт-Петербург, Норма, 2002, 144 с.
- [38] Journee J.H.J., Beukelman W. Trial. A computerprogram to calculate the behaviour of a ship in regular and irregular longitudinal waves. *Delft University of Technology Papers on Shiphydrodynamics*, 1975, vol. III. Rapp. 451–M.
- [39] Journée J.M.J. Prediction of speed and behavior of a ship in a seaway. *International Shipbuilding Progress*, 1976, vol. 23, pp. 1–24.
- [40] Хаскин Д.Д. *Гидродинамическая теория качки корабля*. Москва, Наука, 1973, 327 с.
- [41] Якимов Ю.Л. *О движении судна за счет энергии морских волн. Сб. статей*. Москва, Издательство Московского университета, 2013, с. 510–519.

Статья поступила в редакцию 22.12.2017 г.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Прокофьев В.В., Филатов Е.В., Такмазян А.К., Якимов А.Ю. Сравнительные исследования эффективности судовых волновых движителей различных типов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 3.  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-3-1743>

**Прокофьев Владислав Викторович** — канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова. Область научных интересов: нестационарная гидродинамика, экспериментальные исследования.  
e-mail: vlad.prokof@yandex.ru

**Филатов Евгений Васильевич** — ведущий инженер НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова. Область научных интересов: экспериментальная гидромеханика.

**Такмазян Андрей Куркенович** — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова. Область научных интересов: нестационарная гидродинамика, задачи устойчивости. e-mail: takmazian@gmail.com

**Якимов Андрей Юрьевич** — ведущий инженер НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова. Область научных интересов: нестационарная гидродинамика, экспериментальные исследования. e-mail: ajkimov@mail.ru

## Comparative studies of the efficiency of ship wave propulsors of various types

© V.V. Prokofiev, E.V. Filatov, A.K. Takmazyan, A.Yu. Yakimov

Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119192, Russia

*The purpose of the work was to examine the influence of pitching motions on the efficiency of a direct-flow wave propulsor. The study shows that in the conditions of pitching, the propulsor effectiveness is reduced. The dependence of the efficiency of the wave propulsor on its placement on the ship's hull is studied. Under the same conditions, a comparative analysis of the efficiency of wave propulsors of various types is carried out. In addition to the direct-flow propulsor, a flexible plate (fin), a swinging plate with elastic coupling, a propulsor of the type of underwater sail are considered. Results suggest that the use of a stabilizer plate at the stern of the vessel increases the efficiency of wave propulsion, as well as a bow swinging plate in the whole investigated wave range. However, in the case of the sail, the presence of the stabilizer leads to low frequencies of the waves. Comparison of different wave propulsors of the waving type has shown a noticeable advantage of the submersible sail propulsor.*

**Keywords:** sea waves, wave propulsor, vessel, direct-flow wave propulsor, underwater sail, experiment

### REFERENCES

- [1] Barabanshikov D.A., Serdyukova A.F. *Molodoy uchenyy (The Young Scientist)*, 2016, no. 11 (115), part XVII, pp. 1825–1828.
- [2] Senkin Yu.F. *Sudovoy volnovoy dvizhitel* [Ship wave propulsor]. Certificate of authorship 592671 USSR, cl. B63H19/02, September 04, 1974. Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/109/1093621.html> (accessed December 26, 2017).
- [3] Nikolaev M.N., Savitskiy A.I., Senkin Y.F. Basics of Calculation of the Efficiency of a Ship with Propulsor of the Wing Type. *Sudostroenie*, 1995, vol. 4 (7), pp. 7–10.
- [4] Jakobsen E. The Foil propeller wave power for propulsion. *Second Int. Symp. on Wave and Tidal Energy, BHRA Fluid Engineering*, 1981, pp. 363–369.
- [5] Yaponets pokorit Tikhii okean s pomoshchyu sily voln [The Japanese will conquer the Pacific Ocean with the help of wave power]. *Korrespondent.net*, 17.03.2008. Available at: <https://korrespondent.net/tech/science/406480-yaponec-pokorit-tihij-okean-s-pomoshchyu-sily-voln> (accessed December 26, 2017).
- [6] Konstantinov G.A., Yakimov Yu.L. *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza — Fluid Dynamics*, 1995, no. 3, pp. 139–143.
- [7] Yakimov Yu.L., Yakimov A.Yu. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 1: Matematika. Mekhanika — Moscow University Mathematics Bulletin. Moscow University Mechanics Bulletin*, 2005, no. 4, pp. 59–62.
- [8] Ocheretyanyy S.A., Prokofev V.V., Takmazyan A.K., Filatov E.V. *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza — Fluid Dynamics*, 2013, no. 4, pp. 27–34.
- [9] Prokofev V.V., Takmazyan A.K., Filatov E.V. *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza — Fluid Dynamics*, 2017, no. 4, pp. 24–38.
- [10] Madsen P. A., Schaffer H. A. Higher order Boussinesq-type equations for surface gravitywaves: derivation and analysis. *Philos. Trans. Royal. Soc. London. Ser. A*, 1998, vol. 356, no. 1749, pp. 3123–3184.

- [11] Madsen P.A., Bingham H.B., Liu H. A new Boussinesq method for fully nonlinear waves from shallow to deep water. *J. Fluid Mech.*, 1966, vol. 462, pp. 1–30.
- [12] Peregrine D. Long waves on a beach. *J. Fluid Mech.*, 1967, vol. 27, pp. 815–827.
- [13] Nwogu O. An alternative form of the Boussinesq equations for nearshore wave propagation. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 1993, vol. 119, no. 6, pp. 618–638.
- [14] Wei G., Kirby J.T., Grilli S.T., Subramanya R.A. Fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Pt 1. Highly nonlinear unsteady waves. *J. Fluid Mech.*, 1995, vol. 294, pp. 71–92.
- [15] Tsuji Y., Nagata Yu. Stokes' expansion of internal deep water waves to the fifth order. *J. Ocean. Soc. Japan*, 1973, vol. 29, no. 2, pp. 61–69.
- [16] Afanasev K.E., Stukolov S.V. *Vestnik Omskogo universiteta (Bulletin of Dostoevsky Omsk State University)*, 1998, no. 3, pp. 9–12.
- [17] Carrier G.F. Gravity waves of variable water depth. *J. Fluid Mech.*, 1966, vol. 24, pp. 641–659.
- [18] Carrier G.F., Wu T.T., Yeh H. Tsunami run-up and draw-down on a plane beach. *J. Fluid Mech.*, 2003, vol. 475, pp. 79–99.
- [19] Synolakis C.E. The run-up of solitary waves. *J. Fluid Mech.*, 1987, vol. 185, pp. 523–545.
- [20] Tuck E.O., Huang L.-S. Long wave generation on a sloping beach. *J. Fluid Mech.*, 1972, vol. 51, pp. 449–461.
- [21] Spielvogel L.Q. Single wave run-up on sloping beaches. *J. Fluid Mech.*, 1976, vol. 74, pp. 685–694.
- [22] Zakharov V.E., Manakov S.V., Novikov S.P., Pitaevskiy L.P. *Teoriya solitonov: metod obratnoy zadachi* [Soliton theory: the inverse problem method]. Moscow, Nauka Publ., 1980, 320 p.
- [23] Geogdzhayev V.V., Zakharov V.E. *Pisma v ZhETF — Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters (JETP Letters)*, 2017, no. 106 (3), pp. 175–178.
- [24] Agafontsev D.S., Zakharov V.E. Integrable turbulence and formation of rogue waves. *Nonlinearity*, 2015, 28 (8), pp. 2791–2821.
- [25] Chen S., Doolen G. Lattice Boltzmann method for fluid flows. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 1998, vol. 30, pp. 329–364.
- [26] Succi S. *The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond*. Oxford, OUP (Oxford) University Press, 2001, pp. 82–84.
- [27] Shirobokov V.V. *CADmaster*, 2011, no. 5 (60). Available at: [http://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm\\_60\\_13.html](http://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_60_13.html) (accessed December 26, 2017).
- [28] Pavlenko G.E. *Sudostroenie (Shipbuilding and Shiprepair)*, 1936, no. 6, pp. 394–401.
- [29] Senkin Yu.F. *Sudovoy volnovoy dvizhitel* [[Ship wave propulsor]. Certificate of authorship 1131770 USSR, appl. August 04, 1983, publ. December 30, 1984. Available at: <http://patents.su/3-1131770-sudovojj-volnovojj-dvizhitel.html> (accessed December 26, 2017).
- [30] Senkin Yu.F. *Katera i yakhty — Power and Sail Boats*, 1987, no. 2 (126), pp. 22–27.
- [31] Berg A. Trials with Passive Foil Propulsion on M/S Kystfangst. *Trondheim. Techn. Rep.* Project No. 672.138 (1985).
- [32] Learn More. *Liquid robotics*. A Boeing Company. Available at: <http://www.liquid-robotics.com> (accessed December 26, 2017).
- [33] Sretenskiy L.N. *Teoriya volnovykh dvizheniy zhidkosti* [The theory of wave motions of liquids]. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 1977, 815 p.



- [34] Boroday I.K., Netsvetaev Yu.A. *Kachka sudna na morskoy volnenii* [Ship motions at sea confusion]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1969, 432 p.
- [35] Drozdov Yu.M., Netsvetaev Yu.A. *Trudy TsNII im. A.N. Krylova — Transactions of the Krylov State Research Centre*, 1970, no. 259, pp. 64–73.
- [36] *Spravochnik po teorii korablya. V 3 tom. Tom 1: Gidromekhanika. Soprotivlenie dvizheniyu sudov. Sudovye dvizhiteli* [A guide to the theory of the ship. In 3 vol. Vol. 1: Hydromechanics. Resistance to the movement of ships. Ship propulsors]. Yu.I. Voytkunskiy, ed. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1985, 764 p.
- [37] Basin M.A. *Kompyutery. Vikhri. Rezonansy: Volnovaya teoriya vzaimodeystviya struktur i sistem. Chast 2* [Computers. Whirlwinds. Resonances: Wave theory of the interaction of structures and systems. Part 2.]. St. Petersburg, Norma Publ., 2002, 144 p.
- [38] Journee J.H.J., Beukelman W. Trial, A computer program to calculate the behaviour of a ship in regular and irregular longitudinal waves. *Delft University of Technology Papers on Ship hydromechanics*, 1975, vol. III, pp. 451–M.
- [39] Journée J.M.J. Prediction of speed and behavior of a ship in a seaway. *International Shipbuilding Progress*, 1976, vol. 23, pp. 1–24.
- [40] Khaskind M.D. *Gidrodinamicheskaya teoriya kachki korablya* [Hydrodynamic theory of ship motions]. Moscow, Nauka Publ., 1973, 327 p.
- [41] Yakimov Yu.L. *O dvizhenii sudna za schet energii morskikh voln. Sb. statey* [On the movement of the vessel due to the energy of sea waves. Coll. works]. Moscow, Lomonosov MSU Publ., 2013, pp. 510–519.

**Prokofiev V.V.**, Cand. Sc. (Phys.-Math.), Head of the Laboratory, Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University. Research interests: nonstationary hydrodynamics, experimental studies. e-mail: vlad.prokof@yandex.ru

**Filatov E.V.**, Lead Engineer, Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University. Research interests: experimental hydromechanics.

**Takmazyan A.K.**, Cand. Sc. (Phys.-Math.), Senior Research Fellow, Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University. Research interests: nonstationary hydrodynamics, stability problems. e-mail: takmazian@gmail.com

**Yakimov A.Yu.**, Lead Engineer, Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University. Research interests: nonstationary hydrodynamics, experimental studies. e-mail: ajkimov@mail.ru