

УДК 532.593.3

А.С. Котельникова, В.А. Кочин, В.В. Мороз,  
В.И. Никишов, В.Ю. Филимонов

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОРАБЕЛЬНЫХ УЕДИНЕННЫХ ВОЛН  
С ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТЕНКОЙ ПРИ НАКЛОННОМ ПАДЕНИИ**

*Представлены результаты экспериментального исследования взаимодействия уединенной волны, сгенерированной моделью судна, двигающейся в мелководном канале в диапазоне критических скоростей, с вертикальной стенкой при наклонном падении. Продемонстрировано возникновение волны Маха, распространяющейся вдоль стенки. Проведены измерения параметров падающей волны и волны Маха. Рассмотрен случай составной вертикальной стенки, имеющей форму угла.*

**Ключевые слова:** корабельная уединенная волна, мелкая вода, наклонное падение, вертикальная стенка, «ножка» Маха.

*Представлено результати експериментального дослідження взаємодії поодинокі хвилі, яка генерувалась моделлю судна, що рухається в мілководному каналі в діапазоні критичних швидкостей, з вертикальною стінкою при нахиленому падінні. Продемонстровано виникнення хвилі Маха, що поширюється вздовж стінки. Проведено вимірювання параметрів падаючої хвилі і хвилі Маха. Розглянуто випадок складеної вертикальної стінки, яка має форму кута.*

**Ключові слова:** корабельна поодинокі хвиля, мілка вода, нахилене падіння, вертикальна стінка, «ніжка» Маха.

*The results of experimental study of the interaction of obliquely incident solitary wave with a vertical wall are presented. A solitary wave is generated by the model of ship moving in the shallow water channel in the critical speed range. The emergence of Mach wave propagating along the wall is shown. Measurements of parameters of the incident wave and the Mach wave are carried out. The case of the sectional vertical wall having an angle shape is considered.*

**Keywords:** ship solitary wave, shallow water, oblique incidence, vertical wall, Mach stem.

**Введение.** Исследования корабельных волн на мелкой воде в последнее время приобретают все больший интерес. Во-первых, это связано с тем, что в мелководных и ограниченных акваториях большая вероятность генерации нелинейных волн, в частности, уединенных, движущимися суднами. Во-вторых, взаимодействие таких волн друг с другом или с береговыми структурами может приводить к появлению областей высокого локального поднятия уровня свободной поверхности.

---

© Котельникова А.С., Кочин В.А., Мороз В.В., Никишов В.И., Филимонов В.Ю., 2015

Области аномально больших волн могут образовываться не только в виде внезапного всплеска, но и существовать в течение относительно долгого времени, увеличивая тем самым вероятность столкновения с суднами и морскими сооружениями. При этом большое значение играет угол падения волн.

Обычно полагается, что волна, которая сталкивается с препятствием, будет либо отражаться от него, либо рассеиваться, либо и то и другое. Но существует другой сценарий взаимодействия, когда в случае наклонного падения на преграду наблюдается существенная деформация свободной поверхности, а при определенных углах падения имеет место нелинейное взаимодействие падающей и отраженной волны с образованием новой волны (stem wave), которая связана с «маховским» отражением [1]. Это явление не ограничивается только корабельными волнами и может происходить во многих других областях исследований. Оно является универсальным механизмом возбуждения возмущений в ситуации, где нелинейные и дисперсионные эффекты определенно сбалансированы [2].

Актуальность изучения описанного явления обусловлена необходимостью изучения механизмов нелинейного взаимодействия волн для выяснения вопроса об устойчивости формирующейся волны, выработки прогнозных оценок для определения степени воздействия волны на прибрежную зону и гидротехнические сооружения, а также для безопасного и экономического проектирования береговых структур.

**Обзор литературы.** Особенности образования нелинейных уединенных волн движущимся судном рассмотрены в работах [2-5]. Согласно [2] механизм их формирования становится эффективным, когда групповая скорость длинных волн, излучающихся из области силового воздействия, является близкой к скорости судна. Локальные волны получают энергию от движущегося источника в течение относительно длительного временного интервала. В результате в ограниченных водных путях формируются уединенные нелинейные волны, описываемые уравнениями Кортевега-де Вриза, которые часто движутся перед судном. Скорость судна является определяющим фактором в формировании этих волн. Уединенные волны являются наиболее интенсивными при транскритической скорости судна, когда число Фруда находится в интервале  $0,84 < Fr < 1,15$  [3]. При этом численные исследования, проведенные в работе [4], продемонстрировали существенную роль фактора изменчивости числа Фруда на формирование и развитие уединенных волн, генерируемых движущимся судном. Авторы показали, что следует различать режимы с уменьшающимися и растущими числами Фруда и что уединенные волны с большими амплитудами генерируются, когда число Фруда изменяется медленно при переходе через транскритическую область.

Важным параметром, определяющим генерацию уединенных волн на мелкой воде, является также коэффициент блокировки, который представляет собой отношение площадей поперечных сечений судна и канала [5; 6].

Изучение явления «маховского» отражения уединенных волн представлено работами [1; 7-13]. Наблюдения [1] и эксперименты [7] показали, что в зависимости от значения угла падения отражение уединенной волны от вертикальной стенки может быть регулярным или нерегулярным (маховское отражение). Продемонстрировано, что если угол падения составляет меньше  $45^\circ$ , кроме падающей и отраженной волн, возникает третья волна (называемая «ножкой» Маха), фронт которой перпендикулярен стенке. При этом вершины падающей и отраженной волны и «ножка» Маха пересекаются в точке, которая находится на некотором расстоянии от стенки.

Теоретический анализ наклонного падения уединенной волны на стенку проведен в [8]. Показано, что процесс взаимодействия наклонно падающей уединенной волны с препятствием и последующим появлением третьей волны эквивалентен случаю резонансного взаимодействия двух идентичных уединенных волн, распространяющихся под углом друг к другу. Получены аналитические формулы для максимального наката, амплитуды отраженной волны, угла отражения, и угла, при котором может быть сформирована «ножка» Маха. Показано, что маховское взаимодействие имеет место, когда угол между волнами меньше некоторого критического значения, а подъем уровня свободной поверхности может в 4 раза превышать амплитуду уединенной волны.

Теоретическая модель маховского отражения [8] была протестирована лабораторными экспериментами [9]. Отмечено, что ширина и высота «ножки» Маха увеличиваются, когда волна распространяется вдоль стенки, но вместе с тем существует несоответствие между моделью [8] и измерениями наката, выполненными в [9]. Некоторые отличия с теорией [8] замечены также в работе [10], основанной на численном моделировании процесса маховского отражения с применением спектрального метода высокого порядка. В частности, переход от маховского отражения солитонов к регулярному происходит при меньших углах, не обнаружено четырехкратного увеличения уровня свободной поверхности и др. Результаты расчетов, выполненных на основе дискретной модели несжимаемой жидкости [11], подтвердили факт существования тройных конфигураций в случае нелинейных взаимодействий уединенных волн и показали, что результаты асимптотической теории [8] могут быть применены для волн относительно малой амплитуды. Получено неплохое соответствие с результатами экспериментальных исследований [9]. Проведенные экспериментальные исследования [12; 13] также показали постепенное возрастание маховской волны при ее перемещении вдоль стенки, однако ограниченные поперечные размеры волнового лотка не позволили достигнуть асимптотического значения амплитуды, прогнозируемого в [8].

Тем не менее, увеличение амплитуды волны до 2,5 раз для некоторых волн было получено. В работах [12; 13] увеличение наклонно падающей уединенной волны на вертикальной стенке также было проанализировано, основываясь на уравнении Кадомцева-Петвиашвили, которое эквивалентно по степени аппроксимации теории, развитой в [8].

Цель данной работы заключается в установлении основных характеристик волн, образующихся при взаимодействии поверхностной корабельной уединенной волны с вертикальной стенкой при наклонном падении, а также исследовании волновой картины процесса взаимодействия в случае составной вертикальной стенки, имеющей форму угла. Работа основана на экспериментальном исследовании, проведенном в опытовом бассейне Института гидромеханики НАН Украины.

**Описание экспериментальной установки.** Эксперименты были выполнены в опытовом бассейне шириной 6,8 м и длиной 50 м. Глубина воды составляла 0,15 м.

Генерация уединенных волн осуществлялась путем буксирования модели водоизмещающегося судна в диапазоне критических скоростей. В качестве модели судна была использована схематизированная модель частично разгруженного с помощью воздушной подушки катамарана [14].

Как уже отмечалось, наравне с числом Фруда, которое выражает отношение скорости судна к максимальной скорости распространения волны при данной глубине воды,  $Fr_h = U/\sqrt{gh}$  ( $U$  – скорость судна;  $g$  – ускорение свободного падения;  $h$  – глубина канала), на процесс генерации уединенных волн в условиях мелкого фарватера существенное влияние оказывает коэффициент блокировки, представляющий собой отношение максимальной площади поперечного сечения корабля к площади поперечного сечения канала [5; 6]. При проведении исследований размеры модели судна и уровень налива воды были выбраны таким образом, что при соотношении площадей поперечного сечения судна и канала  $F_c/F_k = 0,03$  диапазон критических скоростей охватывал числа Фруда от  $Fr_h = 0,8$  (первая критическая скорость) до  $Fr_h = 1,2$  (вторая критическая скорость).

Для регистрации профиля волн, которые образуются во время движения модели судна, на разгонном участке бассейна вдоль направления движения модели был установлен волновой профилограф. При этом регистрация профиля волны была синхронизирована с регистрацией положения модели судна относительно профилографа при помощи автоматизированной системы сбора и обработки данных опытового бассейна [15]. На рис.1 отображен характерный вид волнообразования вокруг модели судна в жестко связанной системе координат, начало которой расположено в кормовой части модели.

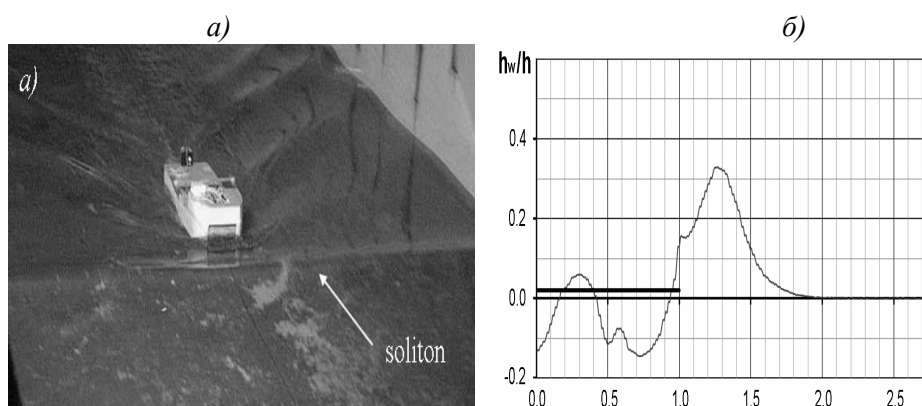


Рис. 1. Характерный вид волны-солитона при движении судна в канале:  
а) общий вид; б) профиль волны

Наблюдения за процессом возникновения волны-солитона начались с того момента, когда модель после старта уже достигла стационарной скорости. К этому моменту вокруг модели судна уже сформировался профиль водной поверхности, который полностью соответствует представлениям о волнообразовании вокруг судна, которое движется в диапазоне критических скоростей на мелководье, а именно: в носовой части судна наблюдается повышение уровня воды, а в кормовой части – понижение. С течением времени повышение уровня воды в носовой части модели судна увеличивается и приобретает все признаки уединенной волны. После формирования перед судном уединенной волны модель судна останавливалась, а волна-солитон продолжала свое движение.

Для исследования отражения наклонно падающих уединенных волн от вертикальных препятствий в мелководном канале на рабочем участке опытового бассейна была смонтирована и установлена под углом  $40^\circ$  к продольной оси бассейна вертикальная стенка высотой  $500$  мм и длиной  $8000$  мм (рис. 2).

Распространение уединенной волны в канале и ее взаимодействие с вертикальной стенкой также регистрировалось с помощью серийной фотосъемки, что позволяло проводить сравнение результатов, полученных от профилографа и при анализе цифровых фотографий.

**Результаты экспериментальных исследований.** В процессе проведения экспериментов модель судна буксировалась со второй критической скоростью  $U \approx 1,45$  м/с. На расстоянии примерно  $20$ - $25$  метров от места старта модель судна останавливалась, а сформированная уединенная волна продолжала свое движение по направлению к вертикальной стенке со скоростью  $v \approx 1,3$ – $1,4$  м/с. Относительная высота генерируемой волны составляла  $h_w/h \approx 0,3$ ... $0,35$  (см. рис. 1, б). Спустя небольшой промежуток времени уединенная волна достигала переднего края препятствия.



*Рис. 2. Фотокадр рабочего участка опытового бассейна*

При взаимодействии корабельного солитона с препятствием наблюдалось заметное увеличение локального уровня свободной поверхности и возникновение волны Маха, которая распространяется вдоль стенки. Измерение профиля и определение основных параметров этой волны (максимальной высоты  $h_w$  и скорости ее распространения  $v_w$ ) проводилось с использованием многоканального волнового профилографа, установленного в непосредственной близости от вертикальной стенки. Для получения общей картины исследуемого явления менялось положение профилографа относительно вертикальной стенки (вдоль стенки или перпендикулярно ей) и место установки относительно переднего края препятствия. Расстояние между сенсорами волнового профилографа составляло 200 мм.

Характерный вид волны Маха и записи данных датчиками на расстоянии 3-х метров от переднего края препятствия представлены на рис.3. Отметим, что профилограф был установлен перпендикулярно вертикальной стенке. Запись максимального поднятия уровня свободной поверхности соответствует датчику, расположенному вблизи стенки. Дальний датчик регистрирует падающий и отраженный возмущенный фронты у внешнего края ножки Маха.

Анализ полученных данных показал, что амплитуда маховской волны приблизительно в два раза превышает амплитуду падающей волны (на вертикальной стенке относительная высота волны составляла  $h_w/h \approx 0,6...0,7$ ), а ее скорость также значительно выше скорости солитона ( $v_w = 1,88 м/с$ ).

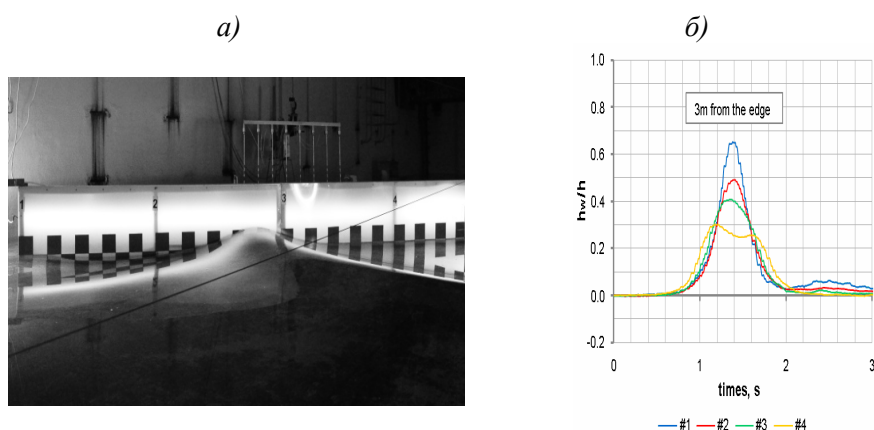


Рис.3. Характерный вид волны Маха, распространяющейся вдоль вертикальной стенки: а) общий вид; б) профиль волны

При этом скорость распространения волны Маха определялась по результатам измерений, полученных двумя крайними датчиками (профилограф расположен вдоль стенки), расстояние между которыми составляло  $\Delta L = 980 \text{ мм}$ . Необходимо также заметить, что скорость распространения маховской волны вдоль вертикальной стенки зависит от угла установки вертикальной стенки относительно фронта корабельного солитона.

Таким образом, можно отметить, что при взаимодействии уединенной волны с вертикальным препятствием при наклонном падении наблюдается конфигурация трех возмущений около стенки – это падающий и отраженный волновой фронт и непрерывно растущая «ножка» Маха, формирующаяся перпендикулярно к стенке. Отраженный волновой фронт разветвляется от падающего на некотором расстоянии от вертикальной стенки – у внешнего края «ножки» Маха. В экспериментах отраженная волна становилась ярко выраженной на расстояниях более 3-х метров от переднего края вертикальной стенки.

Для изучения влияния формы вертикальной стенки на процесс отражения корабельных уединенных волн были проведены исследования с составной вертикальной стенкой, имеющей форму угла (некоторая модель бухты).

Для этого была создана модель вертикальной стенки, состоящая из двух частей высотой 500 мм и длиной 4000 мм, которые были установлены под углом  $40^\circ$  градусов к продольной оси опытового бассейна (рис. 4).

На рис. 4, б также схематически отображена картина распространения волн в случае сложенной вертикальной стенки. Видно, что формирование волны Маха и отраженной волны происходит на каждой составной части границы. Скорость распространения волн Маха при этом остается примерно постоянной. Высота корабельного солитона и волн Маха соответствует вышеизложенным результатам.

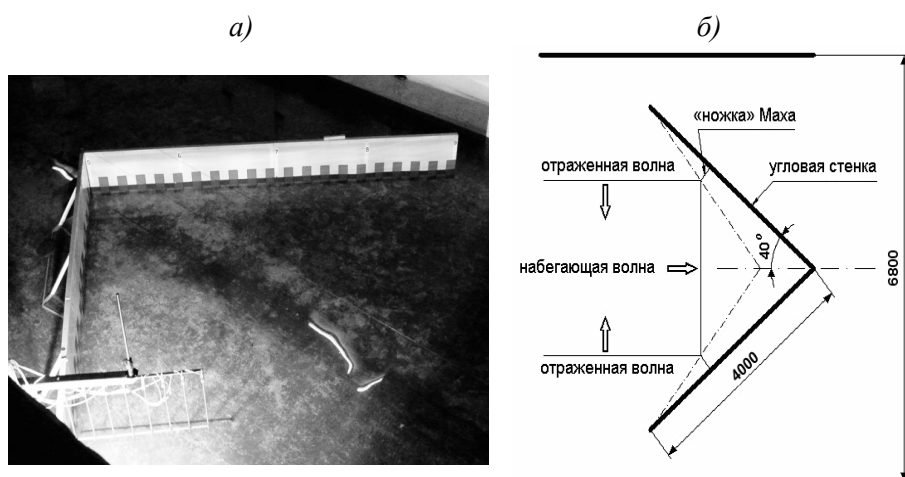


Рис. 4. Фотокадр рабочего участка (а) и схема установки сложенной вертикальной стенки в опытном бассейне (б)

В результате распространения «маховских» волн вдоль стенок составного вертикального препятствия наблюдается сложный процесс взаимодействия таких волн в зоне угла с существенным увеличением возмущений свободной поверхности. Происходит преобразование волн Маха в кумулятивную струю, высота которой в несколько раз превышает высоту самой волны Маха.

Фотокадры серийной съемки процесса распространения «ножки» Маха вдоль составной вертикальной стенки представлены на рис.5.

Видно, что данная форма стенки приводит к концентрации волновой энергии. Т. е. проведенные исследования еще раз подтверждают факт, что появление волны Маха может оказаться важным механизмом повышения локального уровня жидкости и, в частности, приводит к образованию на мелкой воде аномально высоких т. н. «волн-убийц», опасных для судоходства и способных вызвать значительные разрушения на берегу.

**Выводы.** В работе экспериментально исследованы процессы взаимодействия корабельной уединенной волны с вертикальной стенкой при наклонном падении. Продемонстрировано возникновение волны Маха, распространяющейся вдоль стенки. Проведены измерения параметров падающей волны и волны Маха. Показано, что амплитуда маховской волны в два раза превышает амплитуду падающей волны, а ее скорость заметно выше скорости корабельного солитона.

Также исследована волновая картина процесса взаимодействия в случае составной вертикальной стенки, имеющей форму угла. Показано, что волна Маха и отраженная волна формируется на каждой части стенки.



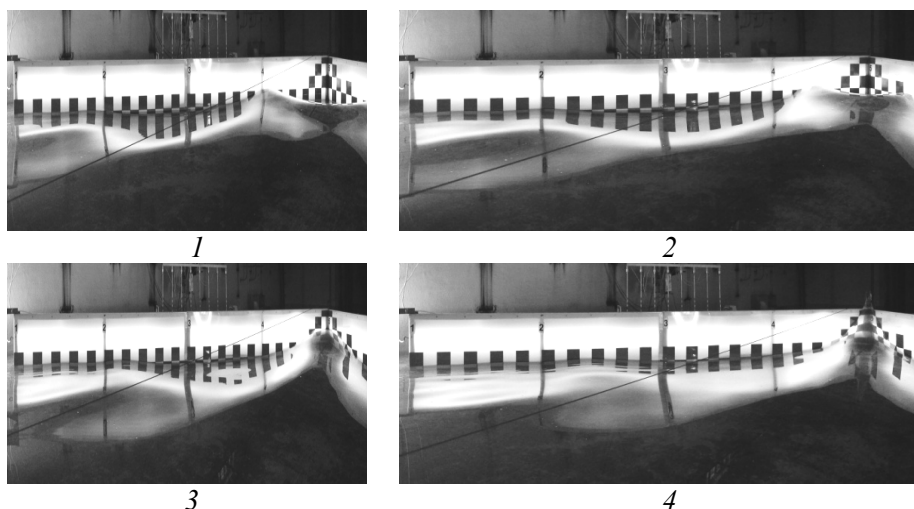


Рис. 5. Фотокадры взаимодействия маховских волн в зоне угла сложенной вертикальной стенки

При этом наблюдается сложный процесс взаимодействия маховских волн вблизи вершины угла составной стенки и существенное увеличение локального уровня свободной поверхности. Другими словами, данная форма стенки приводит к концентрации волновой энергии.

Полученные результаты имеют важное практическое значение для повышения безопасности эксплуатации судов, движущихся в каналах, а также предупреждения опасных ситуаций, связанных с накатом нелинейных волн на берег.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Wiegel R. L. Water wave equivalent of Mach reflection / R.L. Wiegel // Proc. 9<sup>th</sup> Conf. Coastal Engineering A.C.S.E., cha.6. – 1964. – P. 82-102.*
2. *Soomere T. Fast ferries as wavemakers in a natural laboratory of rogue waves // Rend. Sem. Mat. Univ. Pol. Torino. – 2007. – Vol. 65, 2. – P. 287-299.*
3. *Li Y., Sclavounos P. D. Three-dimensional nonlinear solitary waves in shallow water generated by an advancing disturbance / Y. Li, P. D. Sclavounos // J. Fluid Mech. – 2002. – Vol. 470. – P. 393-410.*
4. *Torsvik T., Dysthe K. and Pedersen G. Influence of variable Froude number on waves generated by ships in shallow water / T. Torsvik, K. Dysthe, G. Pedersen // Phys. Fluids. – 2006. – 18, 062101. – P. 1-11.*
5. *Pedersen G. Three-dimensional wave patterns generated by moving disturbances at transcritical speeds // J. Fluid Mech. – 1988. – Vol. 196. – P. 39-63.*

6. Zhang D., Chwang A. T. *On solitary waves forced by underwater moving objects* / D. Zhang, A.T. Chwang // *J. Fluid Mech.* – 1999. – Vol. 389. – P. 119-135.
7. Chen T. *Experimental study on the solitary wave reflection along a straight sloped wall at oblique angle of incidence* // *U.S. Beach Erosion Board Tech. Mem.* 124. – 1961. – P. 1-24.
8. Miles J. *Resonantly interacting solitary waves* // *J. Fluid Mech.* – 1977. – Vol. 79, part 1. – P. 171–179.
9. Melville W. *On the mach reflexion of a solitary wave* // *J. Fluid Mech.* – 1980. – Vol. 98, part 2. – P. 285-297.
10. Tanaka M. *Mach reflection of a large-amplitude solitary wave* // *J. Fluid Mech.* – 1993. – Vol. 248. – P. 637-661.
11. Serebrennikova O. A., Frank A. M. *Numerical modeling of mach reflection for solitary waves* / O.A. Serebrennikova, A.M. Frank // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics.* – 1993. – Vol. 34, Issue 5. – P. 610-618.
12. Li W., Yeh H., Kodama Y. *On Mach reflection of a solitary wave: revisited* / W. Li, H. Yeh, Y. Kodama // *J. Fluid Mech.* – 2011. – Vol. 672. – P.326-357.
13. Yeh H., Li W., Kodama Y. *Mach reflection and KP solitons in shallow water* / H. Yeh, W. Li, Y. Kodama // *Eur. Phys. J. Special Topics.* – 2010. – 185. – P. 97-111.
14. Кочин В.А., Мороз В.В. *Буксировочные исследования модели частично разгруженного с помощью воздушной подушки катамарана, который движется в канале в диапазоне критических скоростей* // *Вісник ОНМУ.* – Одеса: Вид-во ОНМУ. – 2013. – Вып.1 (37). – С. 28-38.
15. Кочин В., Мороз В. *Автоматизированная система сбора и обработки данных скоростного опытового бассейна* // *Современные технологии автоматизации.* – 2009. – № 3. – С. 48-50.

Стаття надійшла до редакції 20.11.2015