

УДК 629.5.018.71

В.А. Кочин, В.В. Мороз

**БУКСИРОВОЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
МОДЕЛИ ЧАСТИЧНО РАЗГРУЖЕННОГО С ПОМОЩЬЮ ВОЗДУШНОЙ
ПОДУШКИ КАТАМАРАНА, КОТОРЫЙ ДВИЖЕТСЯ В КАНАЛЕ
В ДИАПАЗОНЕ КРИТИЧЕСКИХ СКОРОСТЕЙ**

Приводятся результаты буксировочных испытаний модели частично разгруженного с помощью воздушной подушки катамарана в опытном бассейне. Акцентируется внимание на особенностях возникновения и развития волн-солитонов перед судном, движущимся в диапазоне критических скоростей.

Ключевые слова: *опытовый бассейн, буксировочные испытания, буксировочное сопротивление, волна-солитон.*

Наведено результати буксировочних випробовувань моделі частково розвантаженого за допомогою повітряної подушки катамарана в дослідному басейні. Акцентується увага на особливостях виникнення та розвитку хвиль-солітонів перед судном, що рухається в діапазоні критичних швидкостей.

Ключові слова: *дослідний басейн, буксировочні випробовування, буксировочний опір, хвиля-солітон.*

Results of towing tests of partial air cushion supported catamaran model in a towing tank are presented. Special attention is accented on features of origin and development of soliton-waves in front of a vessel which moves in a range of critical speeds.

Keywords: *towing basin, towing tests, towing resistance, soliton-wave.*

На современном этапе развития мировой транспортной системы задача быстрой доставки груза или пассажиров в конечный пункт назначения становится доминирующей [1]. Поэтому водный транспорт по показателям скорости должен конкурировать с автомобильным и железнодорожным транспортом. В этих условиях становится уже невозможным рассматривать в качестве критерия эффективности транспортного средства исключительно экономические критерии, например, стоимость доставки груза, как это было раньше.

С точки зрения транзитных возможностей Украина имеет исключительно выгодное географическое положение. Через территорию Украины проходит сеть транспортных коридоров, которые соединяют страны СНГ со странами Европы. Некоторые из них проходят водным путем. В частности, 7-й европейский международный коридор проходит водным

путем по маршруту Вена – Братислава – Будапешт – Белград – Рени – Измаил – Усть-Дунайск с перспективой продолжения в направлении Николаева и Херсона. Значительная часть этого маршрута проходит в условиях ограниченного фарватера. Основным транспортным средством на этом маршруте должно быть быстроходное судно для перевозки контейнеров и колесной техники.

Для обозначения границы скорости, выше которой судно может считаться «быстроходным» конвенция **SOLAS** (**Safety of Life at Sea**) дает следующее определение [2]: «Быстроходное судно – это судно, способное развивать максимальную скорость v_{max} (м/с) большую, чем та, которая рассчитана по формуле $v = 3,7 \cdot V^{0,1667}$ (здесь V – объемное водоизмещение судна)». Анализ этой формулы показывает, что для «быстроходного» судна число Фруда Fr_V , вычисленное по объемному водоизмещению, должно превышать величину $Fr_V \geq 1,18$. Это означает, что с точки зрения гидродинамики судна «быстроходное» судно движется в переходном режиме движения.

На сегодняшний день существует достаточно широкий спектр гидродинамических схем судов, предназначенных для эксплуатации в переходном режиме движения. В 2001 году группой европейских государств была инициирована разработка проекта скоростного судна для 7-го европейского международного транспортного коридора. Этот проект получил условное обозначение **PACSCAT** – **Partial Air Cushion Supported CATamaran** [3].

В основу гидродинамической схемы **PACSCAT** было положено гидродинамическую схему судна на воздушной подушке скегового типа [4]. Скоростные характеристики этого судна и его эксплуатация в условиях ограниченного фарватера дают все основания считать, что судно будет приближаться к критическим скоростям движения, или даже в отдельных случаях переходить к сверхкритическим скоростям движения [5]. Под сверхкритической скоростью, как правило, понимают скорость судна $v > \sqrt{gh}$ (здесь h – глубина фарватера). Преимущества движения судна со сверхкритическими скоростями очевидны – относительно низкое сопротивление и малое волнообразование, однако переход судна к сверхкритическим скоростям сопряжен с преодолением так называемого «горба сопротивления» и очень интенсивным волнообразованием в диапазоне критических скоростей [5]. Особый интерес представляют волны-солитоны, которые возникают перед судном, движущимся в канале в диапазоне критических скоростей [6].

Учитывая эти обстоятельства, изучение гидродинамических характеристик и процесса волнообразования судна типа **PACSCAT** во время его движения в условиях ограниченного фарватера является **актуальной** задачей.

Целью работы является определение буксировочного сопротивления и параметров волн-солитонов, генерируемых судном типа *PACSCAT* в мелководном канале.

Изложение основного материала. Проект *PACSCAT* развивается рядом европейских государств с 2001 года. Исполнителями проекта являются 14 ведущих европейских научно-исследовательских организаций в области судостроения и водных перевозок, в частности, University of Southampton (UoS), Germanischer Lloyd AG (GL), Europäisches Entwicklungszentrum für Binnen und Küstenschiffart (VBD) и другие. Целью проекта является создание скоростного судна с низким уровнем волнообразования, которое будет способно работать на магистральных направлениях перевозок в бассейнах рек Рейна и Дуная. Грузоподъемность судна планируется на уровне 2000 тонн, а скорость будет составлять до 20 узлов (37 км/час). Осадка судна на ходу будет составлять около 1,5 метра, а на стоянке – около 2,5 метра.

С точки зрения теории корабля в основу гидродинамической схемы судна типа *PACSCAT* положено схему судна на воздушной подушке скегового типа [4]. В соответствии с классической схемой судна такого типа воздушная подушка под его днищем ограждается в носовой и кормовой частях при помощи гибкого ограждения, а по бортам – при помощи жестких корпусов-скегов. В проекте *PACSCAT* эта классическая схема была трансформирована следующим образом:

1. Была существенно развита ширина боковых корпусов, и они приобрели объемы, характерные для водоизмещающих судов.
2. Нижняя часть боковых корпусов была изготовлена плоской и ее форма характерной для глиссирующих судов.

Характерный вид поперечного сечения судна типа *PACSCAT* показан на рис. 1.

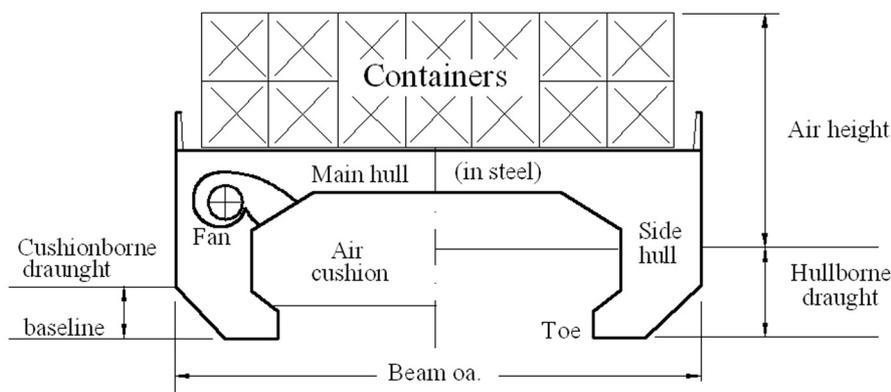


Рис. 1. Характерный вид поперечного сечения судна типа *PACSCAT*

Таким образом, судно типа *PACSCAT* является гибридным судном, в котором использованы элементы водоизмещающего судна и элементы судов с динамическими принципами поддержания – глиссирующего судна и судна на воздушной подушке.

Структура гидродинамических сил, которые действуют на судно типа *PACSCAT*, существенным образом отличаются от аналогичной структуры сил, действующих на судно на воздушной подушке скегового типа: главным образом за счет возникновения сил гидродинамической природы, которые действуют на боковые корпуса.

В гидродинамике судна, как правило, рассматривается два вида ограниченного фарватера – мелководье и канал. Мелководье характеризуется ограничением глубины воды и не имеет ограничений по ширине водоема, а канал имеет ограничения как по глубине, так и по ширине водоема. Плавание судна в реке в большей мере имеет признаки канала, а плавание судна в лимане или прибрежной морской зоне в большей мере имеет признаки мелководья.

В канале существует диапазон критических скоростей, при которых сопротивление воды движению судна резко увеличивается ($\mathcal{G}_{k1} - \mathcal{G}_{k2}$ и $\mathcal{G}_{k1} - \mathcal{G}_{k2}$ на рис.2, а) [7].

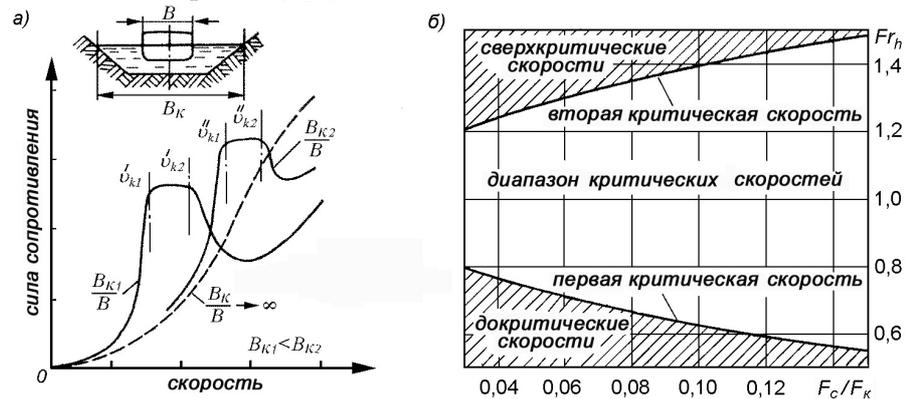


Рис.2. Сила сопротивления (а) и диапазон критических скоростей (б) при движении судна в канале

Скорость, при которой это явление начинает наблюдаться, имеет название первой критической скорости (на рис.2, а эта скорость обозначена индексом «k1»), а скорость, при которой это явление исчезает, имеет название второй критической скорости (на рис.2, а эта скорость обозначена индексом «k2»).

Основным фактором, влияющим на величину диапазона критических скоростей, является соотношение площадей поперечного сечения судна и канала [5]. На рис.2, б показан характерный вид зависимости диапазона критических скоростей от величины соотношения площадей по-

перечного сечения судна F_C и канала F_K . При этом скорость судна на рис.2, б представлена в виде числа Фруда, вычисленного по глубине канала $Fr_h = v / \sqrt{gh}$ (здесь v – скорость судна; g – ускорение свободного падения; h – глубина канала). Таким образом, при уменьшении соотношения F_C/F_K диапазон критических скоростей сужается. Скорости судна, меньше первой критической скорости, представляют собой область докритических скоростей, а скорости, больше второй критической скорости, представляют собой область сверхкритических скоростей. Следует отметить, что рост силы сопротивления в диапазоне критических скоростей сопровождается чрезвычайно интенсивным волнообразованием, которое приводит к разрушению берегов водного пути и размыву фарватера. Поэтому в практике судоходства каналами устанавливается ограничение максимальной скорости движения судна в виде процентов относительно первой критической скорости (обычно, около 75 %). Собственно, именно это обстоятельство и является основной причиной низкой скорости движения судов в канале.

В бассейне института гидромеханики НАН Украины были проведены буксировочные испытания модели судна типа *PACSCAT*, которое движется в условиях канала. Ширина бассейна составляет 6,7 метра, а уровень налива воды составлял $h \approx 150$ мм.

Модель судна была изготовлена из стеклопластика, армированного деревянным каркасом. Характерный вид миделевого сечения модели показан на рис.3, а. В носовой части модели межкорпусное пространство было ограждено гибким ограждением юбочного типа. В кормовой части межкорпусное пространство было ограждено с помощью трехкамерного гибкого ограждения (рис.3, б). На верхней палубе модели имелось несколько люков для укладки балласта и удифферентовки модели. Модель крепилась к буксировочной системе опытового бассейна при помощи специальных пилонов (рис.3, б). Точка крепления модели к пилонам находилась на пересечении линии действия упора движителя и поперечной плоскости в районе расположения центра тяжести.

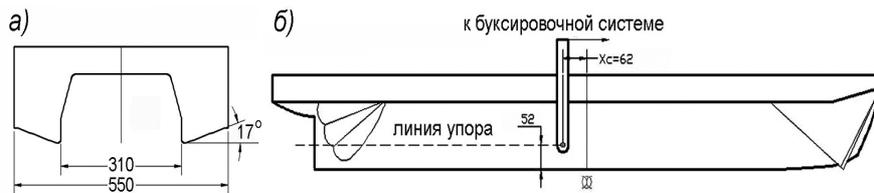


Рис.3. Характерный вид миделевого сечения (а)
и схема крепления модели (б) к буксировочной системе
опытового бассейна

На палубе модели размещались вентиляторы для создания давления в межкорпусном пространстве и кормовом гибком ограждении.

Также на модели были установлены сенсоры давления, которые позволяли регистрировать давление воздуха в межкорпусном пространстве и в кормовом гибком ограждении.

Модель имела следующие главные размерения:

- длина между перпендикулярами 1425 мм;
- длина максимальная 1600 мм;
- ширина общая 550 мм;
- ширина бокового корпуса 120 мм;
- угол килеватости днища на миделе 17 град;
- весовое водоизмещение 18,72 кг.

С помощью вентиляторов в межкорпусном пространстве модели создавалось давление 250 Па. Такая величина давления обеспечивала разгрузку модели судна приблизительно на $2/3$ его весового водоизмещения, т.е. при таком давлении воздуха в межкорпусном пространстве модель всплывала до такой ватерлинии, при которой Архимедова сила поддержания составляла только $1/3$ ее веса, а остальная часть веса модели поддерживалась за счет воздушной подушки.

Размеры модели судна и уровень налива воды были выбраны таким образом, что при соотношении площадей поперечного сечения судна и канала $F_c/F_k = 0,03$ (см. рис.2, б) диапазон критических скоростей охватывал числа Фруда от $Fr_h = 0,8$ (первая критическая скорость) до $Fr_h = 1,2$ (вторая критическая скорость).

На участке установившегося движения вдоль направления движения на расстоянии 140 мм от правого борта модели был установлен двухсенсорный волновой профилограф, который позволял регистрировать профили волн, которые образуются во время движения модели судна (см. рис.4).

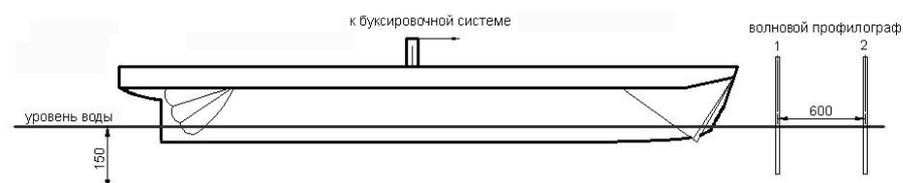


Рис.4. Схема установки волнового профилографа в опытном бассейне

Учитывая то, что расстояние между сенсорами профилографа в продольном направлении составляло $\Delta l = 0,6$ метра, то скорость распространения волн в направлении движения модели судна вычислялась по формуле $v = \Delta l / \Delta t$, где Δt – промежуток времени между характерными точками профилей волны, зарегистрированными соответственно первым

и вторым сенсорами профилографа. При этом регистрация профиля волны была синхронизирована с регистрацией положения модели судна относительно профилографа при помощи автоматизированной системы сбора и обработки данных опытового бассейна [8].

Как и ожидалось, перед моделью судна, которое движется в диапазоне критических скоростей, происходит генерирование волн-солитонов.

На рис. 5 показан пример записи профиля волны, которая регистрируется двухсенсорным волновым профилографом во время прохождения вдоль него модели судна.

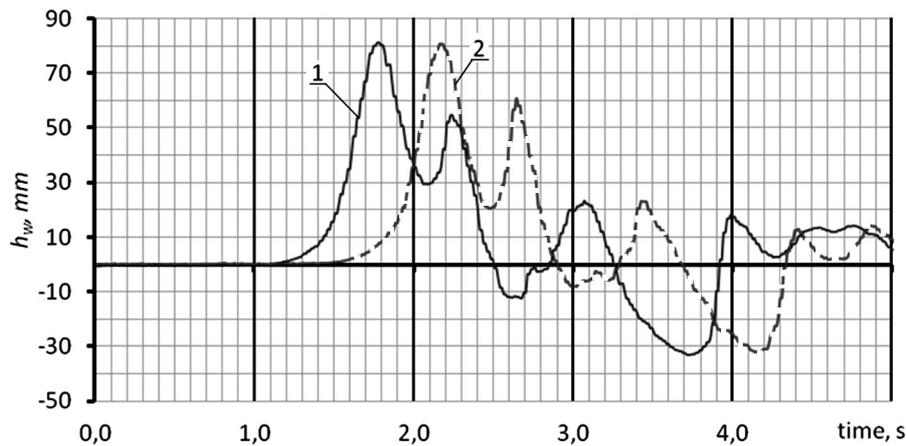
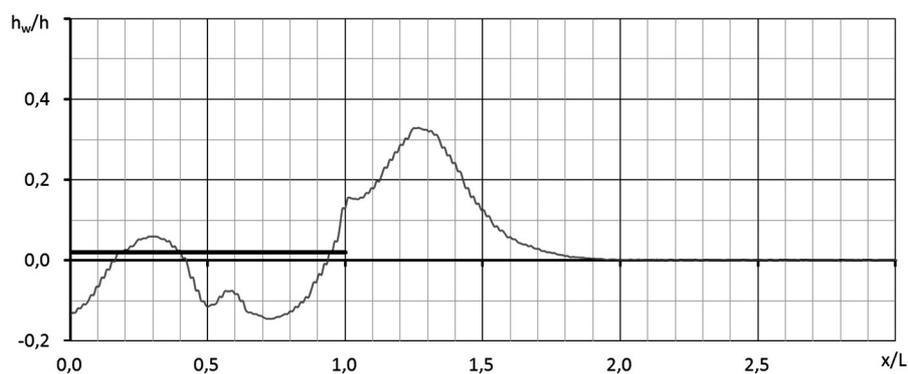


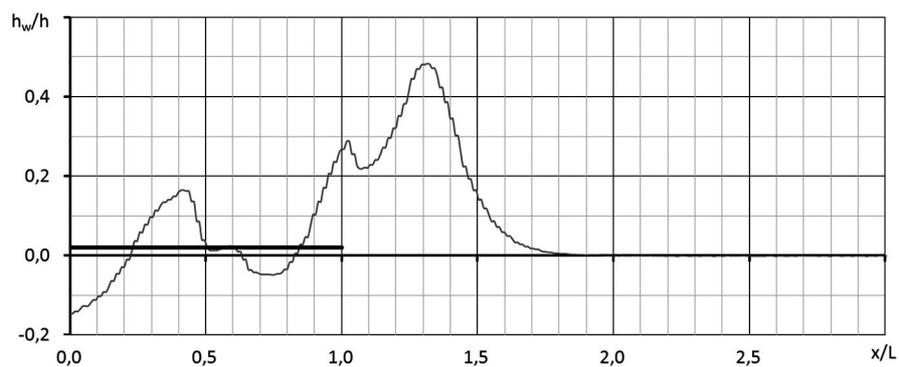
Рис. 5. Пример записи профиля волны, которая регистрируется двухсенсорным волновым профилографом:
1 – первый сенсор; 2 – второй сенсор

На рис.6 отображен во времени процесс развития волн-солитонов в жестко связанной с моделью судна системе координат, начало которой расположено в кормовой части модели. При этом ось абсцисс направлена по направлению движения модели, а ось ординат – вертикально вверх. Скорость движения модели соответствовала $Fr_h=1,0$.

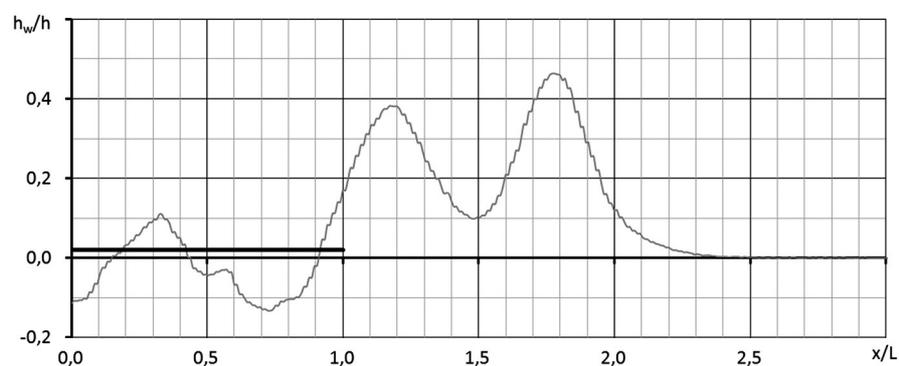
На ось абсцисс нанесена относительная дистанция распространения волн-солитонов в направлении движения модели, т.е. продольная координата x отнесена к длине модели судна L . На оси ординат нанесена относительная высота волн, которые генерируются моделью судна, т.е. высота волн h_w отнесена к глубине воды в бассейне h . Таким образом, координаты графика при $h_w/h = 0$ отображают профиль волны в кормовой части модели судна, при $h_w/h = 1$ – профиль волны в носовой части модели судна, а при $h_w/h = 2$ – профиль волны на расстоянии двух длин корпуса от кормы в направлении движения модели судна.



a)



б)



в)

Рис.6. Процесс развития волн-солитонов:
а) начальная стадия; б) формирование одиночного солитона;
в) формирование двойного солитона

Наблюдения за процессом возникновения волн-солитонов начинался с того момента, когда модель после старта уже достигла стационарной скорости. До этого момента вокруг модели судна сформировался

профиль водной поверхности, который полностью соответствует представлениям о волнообразовании вокруг судна, которое движется в диапазоне критических скоростей на мелководье ($Fr_h=1,0$), а именно: в носовой части судна наблюдается повышение уровня воды, а в кормовой части – понижение.

С течением времени наблюдается дальнейшее повышение уровня воды в носовой части модели судна (см. рис. 6, а). При этом уровень понижения воды в кормовой части остается неизменным. Фактически, уже к этому моменту времени повышение уровня воды в носовой части модели судна имеет все признаки уединенной волны, которая начинает двигаться в направлении движения со скоростью, которая превышает скорость модели. При этом происходит также и рост ее высоты. На момент отрыва волны от судна она уже имеет все явные очертания солитона и достигает своей максимальной высоты (см. рис. 6, б).

В момент полного отхода от модели первого из сформировавшихся солитонов и формирования второго солитона обращает на себя внимание то обстоятельство, что в этот момент времени уровень подъема воды в средней части модели, равно как и уровень понижения воды в кормовой части, достигают величин, зафиксированных в начале процесса (см. рис.6, в).

Следует также отметить, что максимальная высота волн-солитонов может составлять величину близкую к 50 % глубины воды в канале, в то время как понижение воды в кормовой части судна составляет величину 12-20 % глубины воды в канале.

При исследовании скорости распространения волн-солитонов в диапазоне критических скоростей оказалось, что она превышает скорость движения модели и равняется второй критической скорости. Это несколько отличается от традиционных представлений о скорости распространения волн-солитонов, в соответствии с которыми скорость распространения волн-солитонов зависит от ее высоты и глубины канала. В данном же случае – несмотря на то, что при увеличении скорости судна высота волн-солитонов также увеличивается, скорость распространения остается неизменной.

Чрезвычайно интересной оказалась зависимость гидродинамического сопротивления R модели судна типа *PACSCAT* от скорости движения в канале (см. рис. 7).

Оказалось, что характер этой зависимости отличается от традиционной, показанной на рис. 2, а. Прежде всего обращает на себя внимание то обстоятельство, что в диапазоне критических скоростей (диапазон $0,8 < Fr_h < 1,2$ на рис. 7, а) отсутствует явно выраженный «горб сопротивления», который характерен для традиционных типов водоизмещающих судов. Кроме этого, в диапазоне сверхкритических скоростей ($Fr_h > 1,5$) отсутствует заметное снижение гидродинамического сопротивления. Хотя наблюдения за картиной волнообразования свидетельствует о том, что волновое сопротивление этого судна уменьшается. Зависимость обратно-

го гидродинамического качества $\varepsilon = R/D$ (здесь D – весовое водоизмещение судна в состоянии покоя) модели судна типа *PACSCAT* от числа Фруда, вычисленного по объемному водоизмещению (см. рис. 7, б), более характерна для глиссирующих судов. К тому же величины ε на уровне 0,15-0,17 характерны именно для глиссирующих судов. Такое поведение зависимости обратного гидродинамического качества ε модели судна типа *PACSCAT* требует дополнительного исследования гидродинамических характеристик как глиссирующих пластин на мелководье, так и полей давления, которые движутся на мелководье.

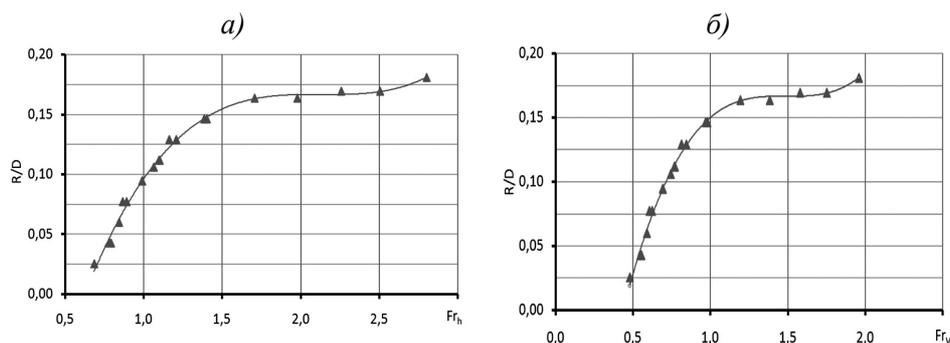


Рис. 7. Зависимость обратного гидродинамического качества модели судна типа *PACSCAT* от числа Фруда, вычисленного по глубине (а) и по водоизмещению (б)

Выводы. Проведенные в опытовом бассейне буксировочные испытания модели частично разгруженного с помощью воздушной подушки катамарана, движущегося в условиях мелководного канала, позволили сделать следующие выводы:

1. В диапазоне критических скоростей на зависимости буксировочного сопротивления от скорости нет характерного для водоизмещающих судов «горба сопротивления». Кривая зависимости буксировочного сопротивления от скорости имеет вид, характерный для глиссирующих судов.
2. Переход судна в зону сверхкритических скоростей сопровождается возникновением больших волн-солитонов, высота которых может достигать 50 % глубины воды в канале.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дубровский В.А., Соколов В.П. Каким быть парому Санкт-Петербург–Хельсинки // Судостроение – СПб. – 2002. – № 3. – С.11-16.

2. Канифольский А.О. Термин «быстроходное малое судно прибрежного плавания» // Вісник ОНМУ. – 2010. – № 29. – С.17-25.
3. Clements R.J., Ivanov P., Lewthwaite J.C., Molland A.F., Wilson P.A. The potential for the use of a novel craft, PACSCAT (Partial Air Cushion Supported CATamaran), in inland European waterways // International Conference on Fast Sea Transportation FAST'2005, June 2005, St.Petersburg, Russia.
4. Смирнов С.А. Суда на воздушной подушке скегового типа. – Л.: Судостроение, 1983. – 216 с.
5. Басин А.М., Веледницкий И.О., Ляховицкий А.Г. Гидродинамика судов на мелководье. – Л.: Судостроение, 1976. – 320 с.
6. Кочин В.О., Мороз В.В. Виникнення та розвиток хвиль-солітонів перед судном, що рухається в каналі в діапазоні критичних швидкостей // Доповіді НАН України. – 2005. – № 1. – С.59-64
7. Басин А.М. Ходкость и управляемость судов. – М.: Транспорт, 1977. – 456 с.
8. 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 21 вересня 2012 р.