

УДК: 629.5.018.712

Гравитационная буксировочная система для испытаний моделей судов.

Расширение возможностей малых опытовых бассейнов при буксировочных испытаниях моделей

Н. А. Тарануха, С. В. Кошкин, Е. И. Селиванов, М. П. Шадрин¹

Приводится принципиальная схема и описание гравитационной буксировочной системы Дальневосточного опытового бассейна КнАГТУ. Обсуждается выбор типа запряжки модели. Показан способ предсказания (прогнозирования) скорости движения модели исходя из записи скорости движения модели на участке разгона. Применение этого способа переводит малые опытовые бассейны, по своим техническим возможностям, в разряд бассейнов большей длины. Указан метод определения важнейшей инерционной характеристики модели (а значит, и судна) в процессе модельных испытаний для определения сопротивления воды движению судна. Это, в свою очередь, также расширяет технические возможности опытовых бассейнов с гравитационной буксировочной системой.

Gravitational towing system for testing ship models. Empowering small towing basin for towing tests of models. *Nikolay A. Taranukha, Sergey V. Koshkin, Evgeny I. Selivanov, Michail P. Shadrin, Komsomolsk-on-Amur State Technical University.*

Provides a schematic diagram and description of the gravitational towing system of the Far Eastern basin KnASTU. The choice of type of harnessing the model. Shows how the prediction (forecasting) velocity model based on the recording speed of the model in the area of overclocking. Application of this method takes the small towing basins, according to its technical capabilities in the discharge basin of greater length. Specified method for determining the critical inertial characteristics of the model (and hence the vessel) in the process of model tests to determine the water resistance of the vessel. This, in turn, also expands the technical capabilities of towing basins gravitational towing system.

Введение

Буксировочные испытания моделей судов в настоящее время являются наиболее достоверным способом прогнозирования сопротивления воды движению судна при его проектировании. Главной проблемой при использова-

¹ *Тарануха Николай Алексеевич* – заведующий кафедрой кораблестроения, доктор технических наук; *Кошкин Сергей Валентинович, Селиванов Евгений Игоревич, Шадрин Михаил Павлович* – сотрудники кафедры кораблестроения Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета.

нии результатов буксировочных испытаний является только частичное воспроизведение характера обтекания судна на его модели (частичное подобие моделируемых потоков). Но, кроме этой проблемы, возникает и ряд других, которые и рассматриваются в настоящем докладе.

Одной из проблем, относящихся к малым опытовым бассейнам, является малый участок равномерного движения модели после ее разгона, а то и полное его отсутствие. Для возможности использования малых по длине бассейнов как гидродинамической установки требуется разработать метод предсказания характеристик движения модели на участке равномерного движения по результатам замера характеристик на участке разгона.

Естественным желанием является возможность получения максимального количества характеристик (параметров) движения модели в процессе ее испытаний. При наличии участка движения с торможением модели появляется возможность определить присоединенную массу воды, вызванную движением судна (модели).

Гравитационная буксировочная система Дальневосточного опытового бассейна КнАГТУ

Наиболее простой для отработки условий эксперимента в опытовых бассейнах является буксировочная система гравитационного типа – движение модели под действием груза постоянной массы (ГБС). Применение ГБС исключает погрешность измерения скорости движения модели с помощью сложных датчиков, вертикальные колебания модели, связанные с движением буксировочной тележки, и ряд других факторов.

Кинематическая схема основных узлов буксировочной системы показана на рис. 1. Модель прикрепляется (запрягается) к бесконечному тросу, охватывающему передний и задний шкивы, находящиеся на концах бассейна. В качестве троса используется шнур плетеный «Мультитекс» шестнадцатипрядный с разрывным усилием 4500 Н и погонным весом 16 г/м. Масса всего троса составляет 1 кг, что предусматривает сравнительно небольшое его натяжение от провисания, а значит, уменьшит нагрузку (и соответственно силы) в подшипниковых узлах переднего и заднего шкивов. Для натяжения троса используется талреп, включенный в бесконечную нить за моделью.

Для изменения положения шкивов по высоте бассейна при использовании различных моделей и изменения уровня воды оба шкива перемещаются и закрепляются по высоте над уровнем воды в специальных каретках. Бесконечный буксировочный трос обеспечивает перемещение (ход) модели с помощью закрепления («запряжки») на ней и передачи буксировочного усилия R . Такая запряжка за счет увеличения длины L (рис. 3) обеспечивает повышение стабилизирующего момента модели:

$$M = R \cdot L \cdot \sin \varphi ,$$

при возникновении рыскания относительно курса, определяемого углом.

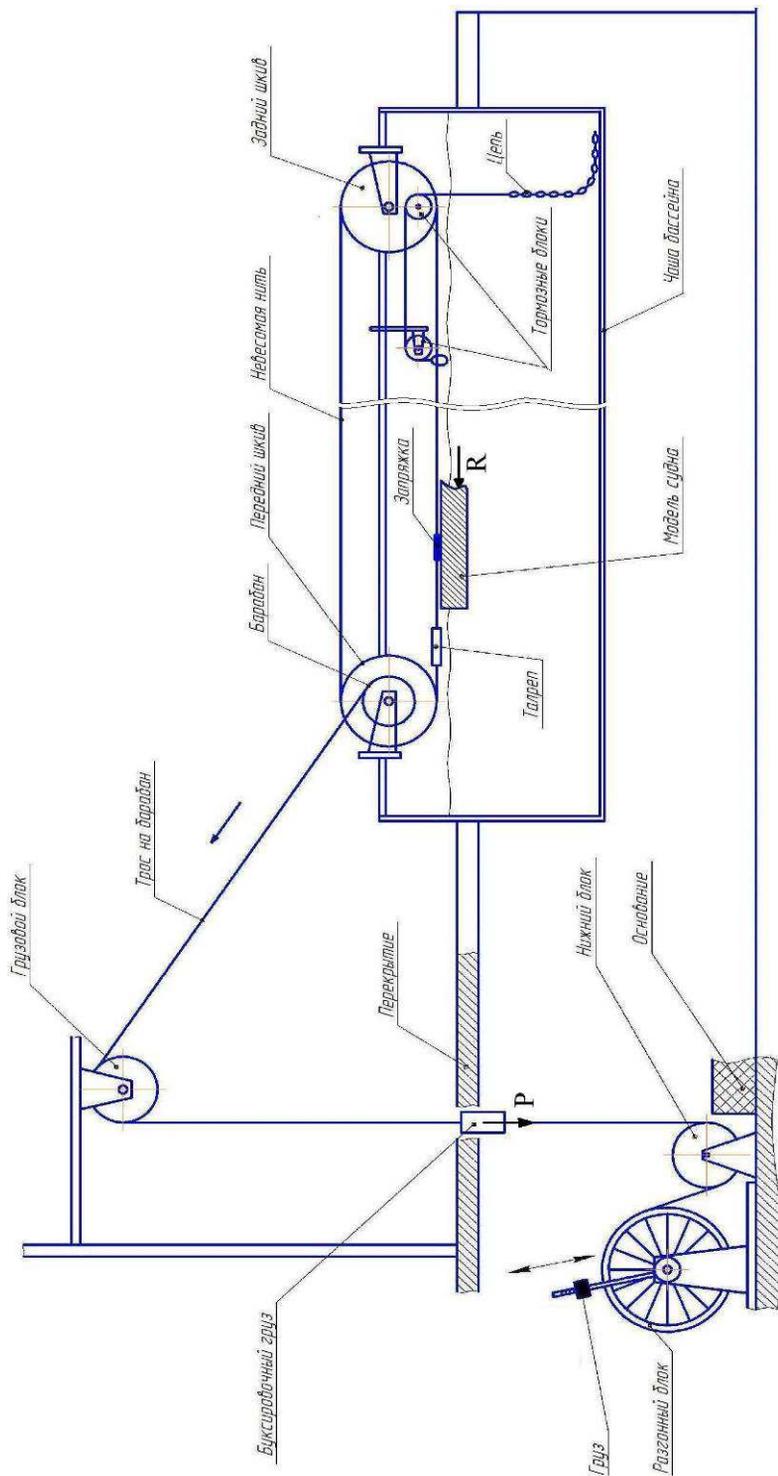


Рис. 1. Схема гравитационной буксировочной системы

Непосредственное закрепление троса к носу и корме модели обеспечивает меньший момент за счет уменьшения длины закрепления. Момент можно увеличивать и натяжением троса талрепом, включенным (рис. 1) в бесконечную его ветвь. Но чрезмерное натяжение увеличивает нагрузку на подшипниковые узлы шкивов и, соответственно, повышает механические потери в системе, являющейся измерительным устройством.

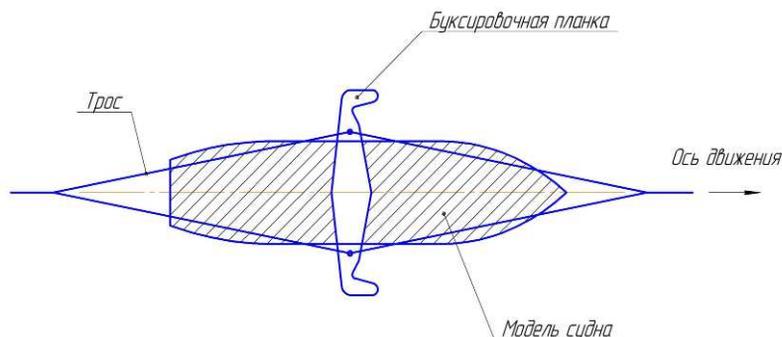


Рис. 2. Ромбовидная тросовая запряжка модели

На рис. 2 представлена схема крепления каната (троса) в виде ромба.

Крепление четырех концов осуществляется на концах буксировочной планки (рис. 3) с обоих бортов. Металлическая планка монтируется к подкрепленному участку палубы модели. По длине модели место крепления планки определяется центром тяжести действующей ватерлинии. Это обеспечивает свободный ходовой дифферент модели на корму, полностью идентичный соответствующему дифференту судна, а значит, не искажает его посадку в условиях модельного эксперимента.

Концы буксировочной планки сделаны в виде крючков для захвата петель тормозного устройства в конце пробега модели.

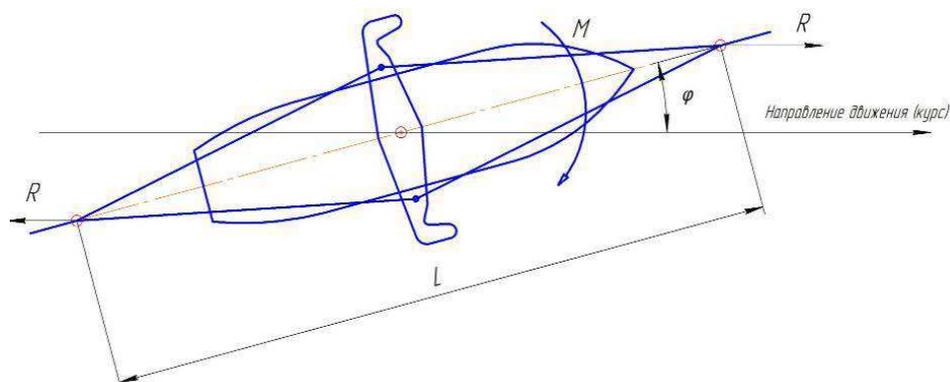


Рис. 3. Схема сил, возникающих в запряжке модели при ее рыскании

Характер испытания модели в Дальневосточном опытовом бассейне КнАГТУ представлен на рис. 4.

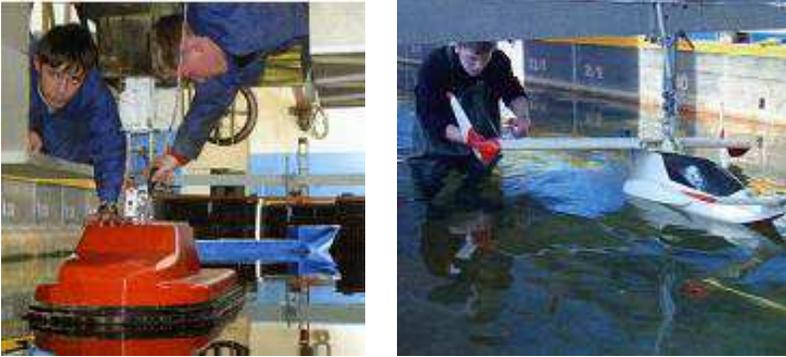


Рис. 4. Подготовка испытаний моделей в Дальневосточном опытовом бассейне КнАГТУ

Определения скорости моделей при испытаниях высокоскоростных судов и большегрузных моделей

Основной проблемой малых опытовых бассейнов является малая длина участка равномерного движения, на которой и определяется скорость движения модели v под действием буксировочного усилия P . В отдельных случаях, при испытаниях высокоскоростных судов и моделей значительных размеров, участок равномерного движения может отсутствовать. Для расширения возможностей бассейна предлагается метод определения (предсказания) скорости равномерного движения v_0 по кривой $v(t)$, определенной на последнем участке разгона модели (после прекращения действия разгонного устройства).

Измерительное устройство бассейна позволяет как фиксировать среднюю скорость движения v_0 на мерном участке, так и производить непрерывную запись изменения скорости во времени $v(t)$.

Для определения закона изменения скорости $v(t)$ будем придерживаться способа анализа скорости академика Г. Е. Павленко [1]. Дифференциальное уравнение движения модели с переменной скоростью имеет вид:

$$(D_M + \Delta D_1 + \Delta D_2) \frac{dv}{dt} = \frac{P}{n} - R_M(v) - P_n(v), \quad (2)$$

где $D_M + \Delta D_1 + \Delta D_2 = D$ – масса модели вместе с присоединенной массой воды ΔD_1 и увеличенная на влияние инерции частей ГБС ΔD_2 .

Члены в правой части (2), зависящие от скорости, можно объединить в единую функцию $f(v) = R_M(v) - P_n(v)$ и (2) запишется в виде:

$$D \frac{dv}{dt} = \frac{P}{n} - f(v). \quad (3)$$

При достаточно продолжительном движении модели $t \rightarrow \infty$ скорость стремится к постоянной v_0 , а ускорение модели исчезает $dv/dt \rightarrow 0$. Тогда из (3) получим равенство $(P/n) = f(v_0)$, а само уравнение (3) примет вид:

$$D \frac{dv}{dt} = f(v_0) - f(v) . \quad (4)$$

Будем рассматривать тот участок движения, при котором скорость v отличается от v_0 на малую величину. Считая функцию $v(t)$ непрерывной, разложим ее в окрестностях v_0 в ряд Тейлора, ограничиваясь первыми членами $f(v) = f(v_0) + (v - v_0)df/dv_0$, при абсолютной погрешности

$$\Delta f \sim 0,005[(d^2f/dv^2) + (1/30)(d^3f/dv^3)v_0 + \dots]v^2_0 ,$$

если $(v - v_0) \approx 0,1v_0$.

Тогда (4) примет вид:

$$D \frac{dv}{dt} = \frac{df}{dv}(v - v_0) . \quad (5)$$

При этом df/dv будет величиной постоянной, а интеграл уравнения (5) имеет вид:

$$v = v_0 - ae^{-bt} , \quad (6)$$

где a – постоянная интегрирования ($a > 0$ при замедленном движении и $a < 0$ при ускоренном); $b = (df/dv_0)/D$.

Таким образом, независимо от вида $R_M(v)$ и $R_{II}(v)$, на участке движения $v \rightarrow v_0$ кривая движения выражается одним и тем же асимптотическим законом, если рассматривать вопрос с точностью до малых второго порядка.

При использовании результатов записи пробега модели $v(t)$ задача определения v_0 сводится в соответствии с (6), к определению постоянных a и b . Для этого достаточно взять три точки на кривой $v(t)$: (t_1, v_1) , (t_2, v_2) и (t_3, v_3) (см. рис. 5).

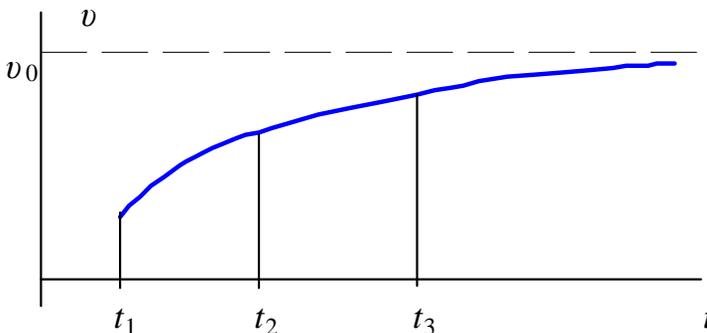


Рис. 5. Использование записи скорости $v(t)$ для определения v_0

В результате имеем три равенства вида $(v_0 - v_i) \approx -ae^{-bt}$, после исключения из которых коэффициентов a и b получим искомую зависимость $v_0(v_0, v_0, v_0, t_1, t_2, t_3)$ в неявном виде.

Искомая скорость равномерного движения может быть получена в явном виде $v_0 = (v_1 v_3 - v_2^2) / (v_1 + v_3 - 2v_2)$, если взять равные интервалы времени $(t_2 - t_1) = (t_3 - t_2)$.

Такой метод предсказания скорости значительно расширяет технические возможности малых опытовых бассейнов.

Определение инерционных характеристик судна по результатам буксировочных испытаний

Одной из важнейших характеристик судна является присоединенная масса воды ΔD_I . Она фигурирует в расчетах параметров неустановившегося движения судна – выбег, разгон, остановка при реверсе гребными винтами и т. д. Величину ΔD_I принято определять в долях от массы судна D в виде коэффициента $k_{II} = \Delta D_I / D$.

Наиболее простым способом определения k_{II} является приравнивание его к аналогичному коэффициенту для эллипсоида вращения обтекаемого идеальной безграничной жидкостью с отношением размеров, одинаковых с судном [3]. Эти значения k_{II} применяются только для первоначальных (оценочных) расчетов движения судна из-за погрешностей, вызванных несопадением с формой корпуса судна, неучетом влияния вязкости и волнообразования на поверхности воды. Для судовых обводов более точным является расчет по методу плоских сечений [2, 3]. Но и эти результаты не учитывают влияние вязкости и волнообразования.

Наиболее достоверными являются значения k_{II} , определяемые экспериментальными методами на режимах неустановившегося движения модели. При проведении эксперимента необходимо выполнить одновременно три условия (критерия) динамического пособия потоков:

– по числу Фруда:
$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} ;$$

– по числу Рейнольдса:
$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu} ;$$

– по числу Струхала:
$$Sh = \frac{L \cdot T}{\nu} ,$$

что технически невозможно (здесь v – скорость модели, L , T – характерные длина и время).

Для исключения (минимизации) влияния вязкости общепринято проводить испытания при $Re = (v_M L_M / \nu) > 10^6$, т. е. в области автомодельности. Это автоматически предопределяет, что число Фруда модели (при значении коэффициента кинематической вязкости воды для $t = 10^\circ\text{C}$, $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) должно быть:

$$Fr_M > 0,41 \cdot L_M^{-1,5} \quad (7)$$

При экспериментальном определении k_{11} основным уравнением, описывающим движение модели, является (2). Для исключения необходимости моделирования движения с учетом неизменности числа Sh , в уравнении (2) значение сопротивления $R_M(v)$ и потерь $R_{II}(v)$ определяются, исходя из гипотезы стационарности [6]: они принимаются соответствующим значениям R_M и R_{II} при скорости равномерного движения, равной мгновенной скорости неравномерного движения. Уравнение движения (2) позволяет для участка движения судна по инерции (действие буксировочного усилия прекращено, т. е. $(P/n) = 0$) выразить коэффициент присоединенной массы в виде

$$k_{11} = D_M^{-1} \left(\frac{R_M(v) + R_{II}(v)}{-\frac{dv}{dt}} - \Delta D_2 \right) - 1, \quad (8)$$

(здесь $(dv/dt) < 0$ при замедленном движении). Потери $R_{II}(v)$ и ΔD_2 определяются тарировкой и конструкцией ГБС. Значение ускорения dv/dt может быть непосредственно определено по кривой непрерывной записи скорости модели $v(t)$. Эти значения могут существенно меняться на пути торможения. Так, для модели длиной $L_M = 3$ м, условие (7) сводится к требованию $Fr_M > 0,18$. Но при таком режиме движения волнообразования практически не будет. Поэтому более обоснованно повысить минимальное число Рейнольдса до значения $Re = 1,5 \cdot 10^6$, что оправдано результатами испытания обтекания профилей [3]. Тогда требование к минимальному значению числа Fr возрастет до величины $Fr_M > 0,12$, для малых моделей с $L_M = 3$ м. При этом значении Fr волнообразование уже начинает проявляться. Таким образом, ускорение dv/dt должно определяться на начальном этапе торможения модели и не должно быть ниже значения $Fr_M \approx 0,12$. Для повышения точности определения k_{11} они могут быть вычислены для нескольких значений скорости $v(t)$. Если этих значений будет три – k_{11}^1 , k_{11}^2 и k_{11}^3 , то можно провести дополнительный анализ на наличие выбросов, полностью идентичный сделанному для скорости модели, и в качестве результата принять среднее значение $k_{11}^1 = (k_{11}^1 + k_{11}^2 + k_{11}^3) / 3$.

Литература

1. Павленко Г. Е. Сопротивление воды движению судов. – М.: Морской транспорт, 1956. – 508 с.
2. Справочник по теории корабля. – Том 1: Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / Под ред. Я. И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1989. – 328 с.
3. Короткин А. И. Присоединенные массы судна: справочник. – Л.: Судостроение, 1986. – 312 с.