

ФЛОТ И КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ
FLEET AND SHIPBUILDING

Тарануха Н. А., Кошкин С. В., Селиванов Е. И., Шадрин М. П.
N.A.Taranukha, S.V.Koshkin, E.I.Selivanov, M.P.Shadrin

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ БУКСИРОВОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ МОДЕЛЕЙ СУДОВ В ОПЫТОВОМ БАССЕЙНЕ

A METHOD FOR PROCESSING THE RESULTS OF TOWING TESTS ON SHIP MODELS IN A MODEL BASIN



Тарануха Николай Алексеевич – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Кораблестроение» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: taranukha@knastu.ru.

Mr. Nikolay A. Taranukha – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Shipbuilding Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: taranukha@knastu.ru.



Кошкин Сергей Валентинович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Кораблестроение» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

Mr. Sergey V. Koshkin – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Shipbuilding Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University



Селиванов Евгений Игоревич – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

Mr. Evgeny I. Selivanov – PhD candidate at the Department of Shipbuilding Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University



Шадрин Михаил Павлович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

Mr. Mikhail P. Shadrin – PhD candidate at the Department of Shipbuilding Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University.

Аннотация. В статье показаны практические приемы графического и аналитического «сглаживания» зависимости сопротивления движению модели $R(v)$. Разработаны способ предсказания (прогнозирования) скорости движения модели, исходя из записи скорости движения модели на участке разгона, и метод определения важнейшей инерционной характеристики модели в процессе модельных испытаний для определения сопротивления воды движению судна.

Summary. The paper presents some practical techniques of graphical and analytical "smoothing" of the resistance-to-motion graph for a model ($R(v)$). A method is proposed for prediction (forecasting) of the velocity of a model's movement via recording the speed of the model along the acceleration area; also a method is suggested for determining the essential inertial characteristic of a model during model tests in order to define water resistance to the vessel's motion.

Ключевые слова: кораблестроение, опытовый бассейн, модели судов, погрешность.

Key words: shipbuilding, towing basin, model ships, error.

УДК 629.5.018.712

Введение

Буксировочные испытания моделей судов в настоящее время являются наиболее достоверным способом прогнозирования сопротивления воды движению судна при его проектировании. Главной проблемой при использовании 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 настоящей работе. Как и любые технические измерения, измерения в опытовом бассейне производятся с погрешностью. Это приводит к тому, что для зависимости сопротивления модели R от скорости её движения v нарушается монотонность её возрастания с ростом скорости – кривая сопротивления $R(v)$ становится «не гладкой». Методы «сглаживания», рассматриваемые в настоящей работе, по существу, являются одним из этапов расчетного прогнозирования сопротивления модели по результатам буксировочных испытаний.

Другая проблема относится к малым опытовым бассейнам, с, соответственно, малым участком равномерного движения модели после её разгона, а то и полным его отсутствием. 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 её испытаний. При наличии участка движения с торможением модели появляется возможность определить присоединенную массу воды, вызванную движением судна (модели).

1. Оценка погрешности. Исключение выбросов. «Сглаживание» кривой сопротивления воды движению модели

Результаты буксировочных испытаний модели судна на первом этапе их обработки сводятся к определению пар значений – сопротивление модели R и соответствующая скорость её движения v . Измерение R при использовании гравитационной буксировочной системы (ГБС) относится к классу косвенных измерений, так как R не определяется непосредственно, а «задается» буксировочным грузом P и уменьшается на величину потерь R_{Π} в узлах ГБС:

$$R = \frac{P}{n} - R_{\Pi},$$

где n – передаточное отношение ведущего (переднего) узла ГБС (см. рис. 1).

Погрешность измерения сопротивления ΔR в этом случае будет зависеть от погрешности измерения буксировочного груза ΔP и погрешности тарировочной кривой ΔR_{Π} .

Погрешность ΔP относится к инструментальной и может быть сведена к пренебрежимо малой за счет повышения точности взвешивания на весах. Тогда погрешность ΔR будет полностью определяться ошибкой тарировочной кривой $R_{\Pi}(v)$, т.е. переходить в класс прямых измерений. Эта погрешность ΔR минимизируется при тщательной тарировке потерь в буксировочной системе.

Определение скорости v , за счет принятой измерительной системы, также можно отнести к классу прямых измерений.

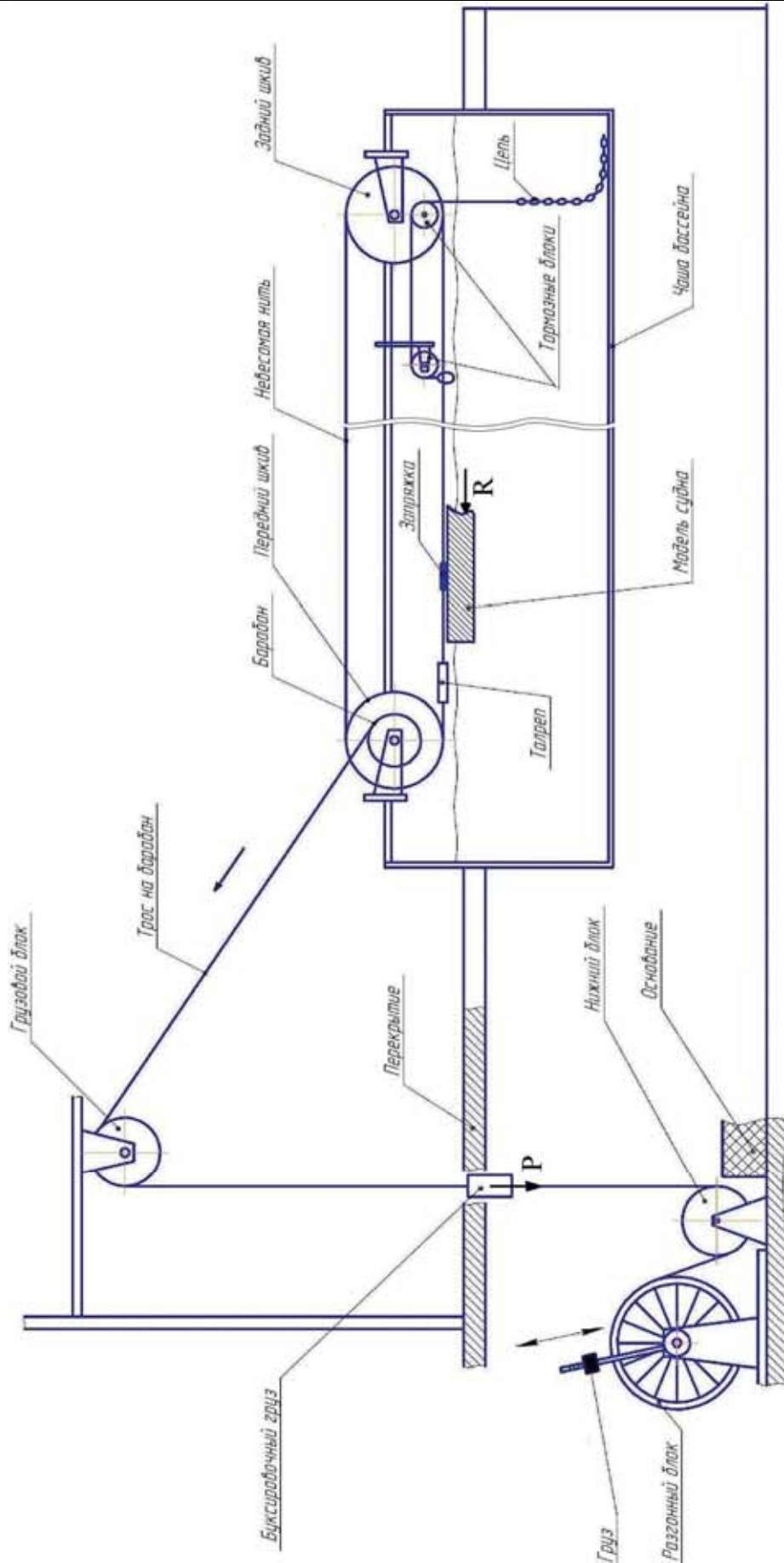


Рис. 1. Схема гравитационной буксировочной системы

На первом этапе обработки результатов прямых измерений необходимо выявить так называемые «промахи» (выбросы), т.е. случайные, несистематические ошибки измерений. При отработанной методике буксировочных испытаний определяют только одну пару значений (v , R) в каком-то заданном диапазоне скорости. Таким образом, исключение выбросов возможно проводить только на этапе отработки методики модельных испытаний или при определении сопротивления морских объектов с особым характером обтекания корпуса, а также в областях резкого изменения сопротивления («горбов сопротивления»).

Применение ГБС дает возможность при повторных испытаниях исследовать на промах только полученные значения скорости (R , определяемое весом буксировочного груза P и потерями R_{II} , постоянно). Минимальное количество пробегов модели, при котором возможен анализ ошибок в определении v , равно трем. На практике возможно увеличение числа пробегов модели. Но оказывается [3; 10], что одновременно с увеличением точности среднего значения скорости вероятность появления больших отклонений (промахов), возникающих вследствие статистического разброса, растет при увеличении числа измерений. Более детально с вопросами оценки погрешностей измерений, в том числе, связанных с окружением численных значений результатов, можно ознакомиться в работе [9].

Суть исключения выбросов заключается в том, что из трех значений скорости v_1 , v_2 и v_3 выбирается подозрительное максимальное v_{\max} или минимальное значение v_{\min} и определяется случайная величина [3; 10]: $v = 1,225(v_{\max} - \bar{v})/\Delta S_3$ – в первом случае или $v = 1,225(\bar{v} - v_{\min})/\Delta S_3$ – во втором. Здесь под ΔS_3 понимается корень квадратный из дисперсии отклонений трех измерений скорости $\Delta S_3^2 = [(v_1 - \bar{v})^2 + (v_2 - \bar{v})^2 + (v_3 - \bar{v})^2]/2$ от среднего значения скорости $\bar{v} = (v_1 + v_2 + v_3)/3$. Вычисленный параметр v сравнивается со значением 1,41. В случае $v < 1,41$ разброс значений v объясняется статистическим разбросом с надежностью не менее 99 %, а при $v > 1,41$ подозрительное значение v_{\max} или v_{\min} является выбросом и должно быть исключено из серии измерений (не принято к обработке). Соответственно, после проведенного анализа к обработке принимается среднее значение скорости $\bar{v} = (v_1 + v_2)/2$ – при наличии промаха, и $\bar{v} = (v_1 + v_2 + v_3)/3$ – при его отсутствии.

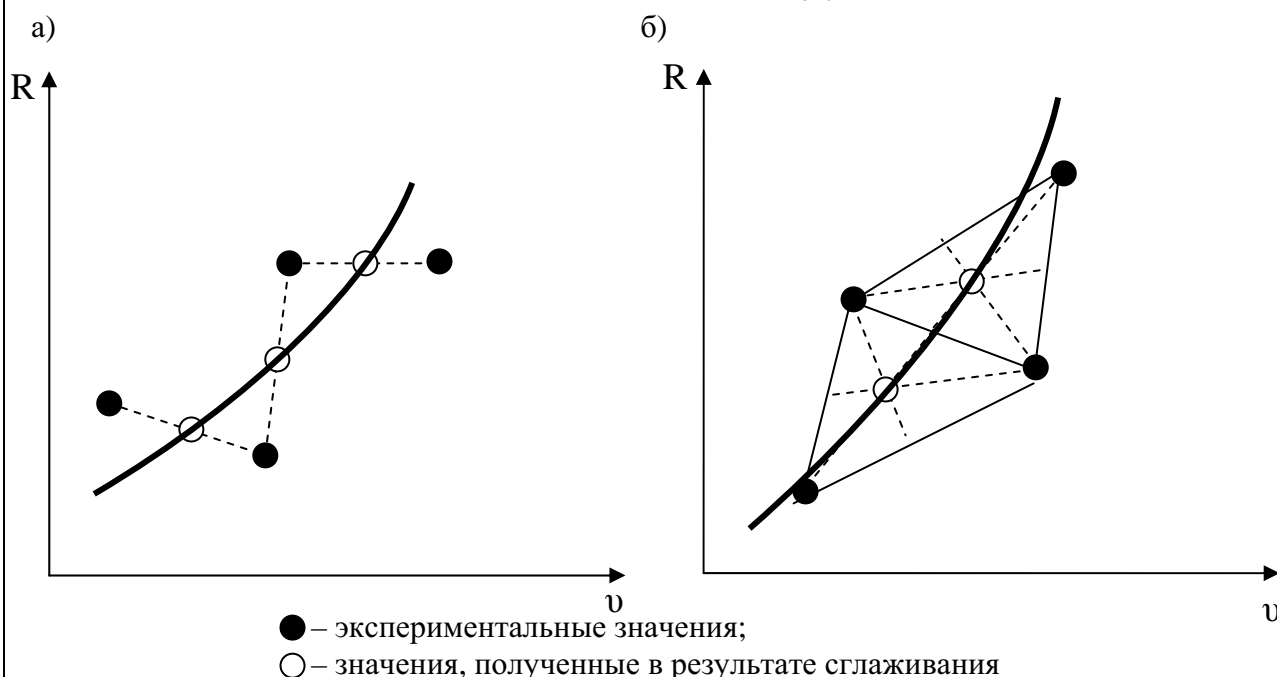


Рис. 2. Сглаживание кривой $R(v)$: а – по двум соседним точкам;
б – по трем соседним точкам

При буксировочных испытаниях моделей судов традиционного типа (без гидродинамических особенностей) определяют одну пару значений (v, R) в интересующем диапазоне чисел Фруда с заданным шагом. Целью обработки результатов модельных испытаний является получение зависимости коэффициента остаточного сопротивления $C_{ост}(v)$. Для этого по полученным парам значений (v, R) должна быть построена кривая сопротивления модели $R(v)$, которая из-за погрешностей измерений не является гладкой (см. рис. 2). Проводится процедура сглаживания кривой, которая является, по существу, методом исключения погрешностей. Непосредственными методами сглаживания являются графические [5].

Наиболее простым является метод нахождения средних значений по абсциссам и ординатам двух соседних точек. Смысл метода понятен из рис. 2, а.

Более сильное сглаживание получается при отыскании средних значений с использованием трех соседних точек. Они принимаются за вершины треугольника, центр тяжести которого находится в точке пересечения медиан. Суть метода проиллюстрирована на рис. 2, б.

В отношении процедуры графического сглаживания надо отметить следующие обстоятельства:

- последний способ сглаживания аналогичен стандартному решению навигационной задачи по определению места судна по трем взятым пеленгам [6; 7], апробированному многолетней морской практикой;

- перед процедурой сглаживания необходимо проанализировать: не является ли значение $R(v)$ в отдельных районах результатом резкого изменения сопротивления – «горбом» сопротивления? Это, в первую очередь, относится к судам с динамическими принципами поддержания, а также к водоизмещающим судам. У последних «холмы» и «впадины» на кривой $R(v)$, вызванные интерференцией носовой и кормовой системы волн, зависят от параметров формы корпуса судна и числа Фруда $Fr = v/\sqrt{gL}$ (здесь L – длина по ватерлинии) [5] и могут проявляться уже со значения $Fr = 0,17$;

- точки, полученные сглаживанием, как по первому, так и второму способу, для достижения большей степени сглаживания могут быть подвергнуты новому (повторному) сглаживанию.

Математическое представление (интерполяция), а значит и сглаживание кривой $R(v)$ применяется только в отдельных случаях. Вызвано это, в первую очередь, тем, что любой способ основан на тех или иных предположениях. В частности, не известен сам вид математической зависимости (вид функции) $R(v)$ для реальных форм корпусов судов.

Возможные методы интерполяции многочисленны [1]: регрессивный анализ, гармонический анализ с помощью рядов Фурье и т.д. Наиболее распространенным способом подбора коэффициентов функции, отображающей полученные экспериментальные точки кривой сопротивления $(v_1, R_1), (v_2, R_2), \dots, (v_k, R_k)$, считается метод наименьших квадратов, что априори подразумевает, что разброс пар значений (v_i, R_i) , полученных в результате эксперимента от действительной кривой $R(v)$, подчиняется закону нормального распределения Гаусса. Наиболее употребительной является параболическая интерполяция [1; 3; 10]

$$R = a_1 v + a_2 v^2 + \dots + a_n v^n. \quad (1)$$

Для наилучшего приближения $R(v)$ в соответствии с (1), т.е. для численного определения коэффициента a_j , используется известное положение, что сумма квадратов всех отклонений ординат точек кривой $\Delta S^2 = \sum_1^k [R_i - (a_0 + a_1 v + \dots + a_n v_i^n)]^2$ будет минимальной. Это имеет место, когда все частные производные ΔS^2 по коэффициентам a_j равны нулю $\partial \Delta S^2 / \partial a_j = 0$ при $j = 0, 1, 2, \dots, n$, что дает систему $n+1$ линейных уравнений для определения такого же числа коэффициентов $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$.

Общий вид уравнений системы для определения a_j будет

$$\sum_{i=1}^k v_i^j [R_i - (a_0 + a_1 v_i + a_2 v_i^2 + \dots + a_n v_i^n)]^2 = 0 \text{ при } j = 0, 1, 2, \dots, n.$$

Таким образом, число коэффициентов n в полиномиальном разложении (1) ограничено количеством полученных точек (v_i, R_i) при модельных испытаниях и для надежного математического представления $R(v)$ в соответствии с (1) должно быть не менее 6 – 7.

2. 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 испытании высоко-скоростных судов и моделей значительных размеров) участок равномерного движения может отсутствовать (см. рис. 3, а).

Для расширения возможностей бассейна, когда участок равномерного движения отсутствует, предлагается метод определения (предсказания) скорости равномерного движения v_0 по кривой $v(t)$.

Измерительное устройство бассейна позволяет фиксировать как среднюю скорость движения v_0 на мерном участке равномерного движения, так и производить непрерывную запись изменения скорости во времени $v(t)$. При этом кривая $v(t)$ берется на последнем участке разгона модели (после прекращения действия разгонного устройства) с тем, чтобы скорость v отличалась от v_0 на малую величину.

Дифференциальное уравнение движения модели с переменной скоростью имеет вид

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

где D_M – масса модели; ΔD_1 – присоединенная масса воды; ΔD_2 – учитывает влияние инерции частей ГБС.

Для определения закона изменения скорости $v(t)$ будем придерживаться способа анализа скорости, предложенного академиком Г.Е. Павленко [5]. Им показано, что если разности скоростей $(v-v_0)$ малы и в разложении функции $f(v) = R_M(v) + P_{II}(v)$ в ряд Тэйлора ограничиться первыми членами разложения, то интеграл уравнения (2) имеет вид

$$v = v_0 - a e^{-bt}, \quad (3)$$

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 (3), 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. 3, б).

В результате имеем три равенства вида

$$\begin{cases} v_1 = v_0 - a e^{-bt_1}; \\ v_2 = v_0 - a e^{-bt_2}; \\ v_3 = v_0 - a e^{-bt_3}, \end{cases}$$

после исключения из которых коэффициентов a и b получим искомую зависимость $v_0(v_1, v_2, v_3, t_1, t_2, t_3)$ в неявном виде.

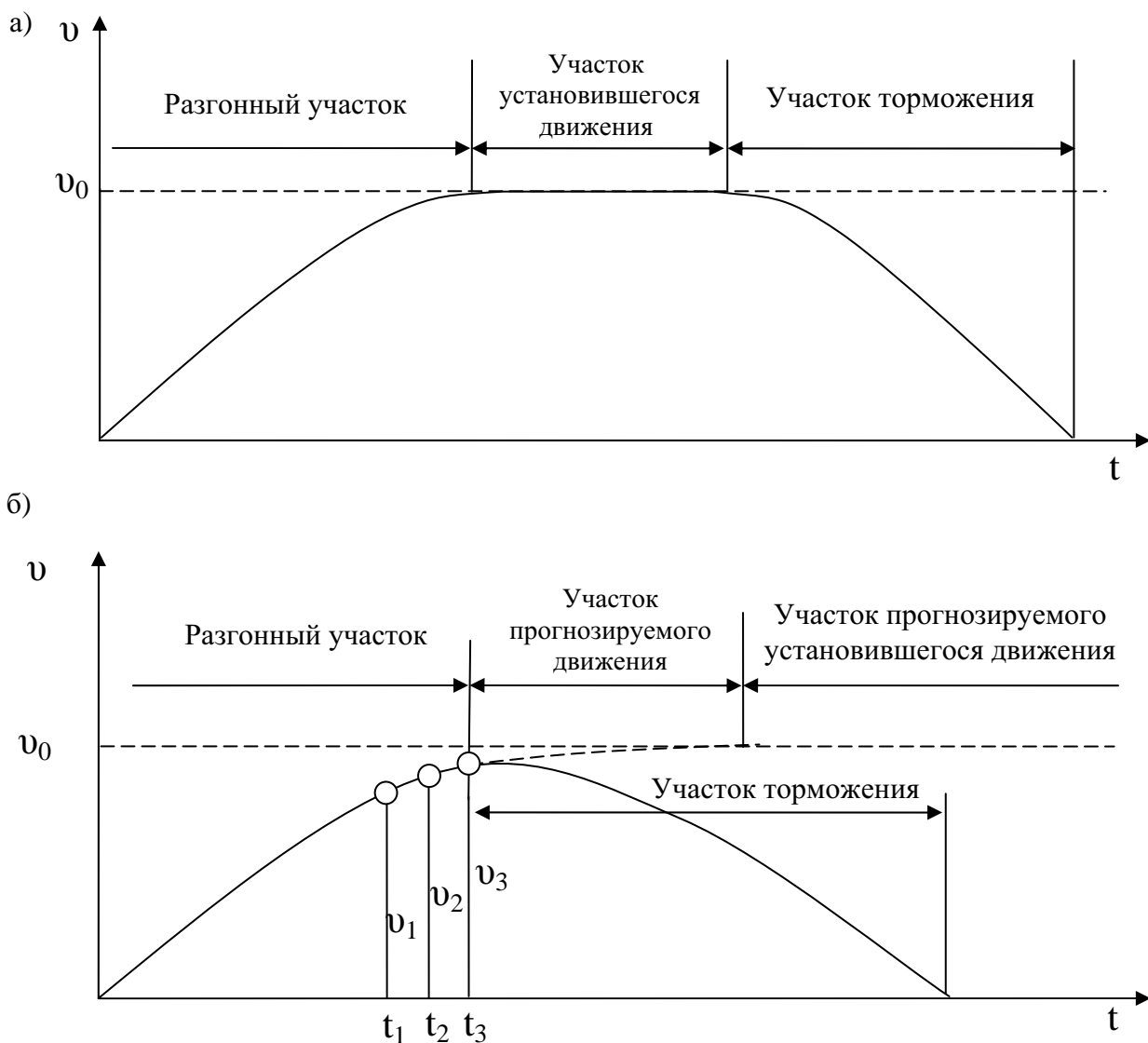


Рис. 3. Изменение скорости модели $v(t)$: а – с участком равномерного движения; б – при отсутствии участка равномерного движения (с прогнозированием скорости равномерного движения v_0)

Искомая скорость равномерного движения может быть получена в явном виде по формуле

$$v_0 = (v_1 v_3 - v_2^2) / (v_1 + v_3 - 2v_2).$$

При этом необходимо взять равные интервалы времени $(t_2 - t_1) = (t_3 - t_2)$. Для повышения точности прогнозируемой скорости v_0 необходимо брать точки (t_1, v_1) , (t_2, v_2) и (t_3, v_3) на последней четверти максимально возможно разгонного участка. Продолжительность разгона ограничена техническими возможностями бассейна (необходимостью достаточно плавного торможения модели)

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

3. Определение инерционных характеристик судна по результатам буксировочных испытаний

Одной из важнейших характеристик судна является присоединенная масса воды ΔD_1 . Она фигурирует в расчетах параметров неустановившегося движения судна – выбег, разгон, остановка при реверсе гребными винтами и т.д. Величину ΔD_1 принято определять в долях от массы судна D в виде коэффициента $k = \Delta D_1 / D$.

Наиболее простым способом определения k является приравнение его аналогичному коэффициенту для эллипсоида вращения, обтекаемого идеальной безграничной жидкостью с отношением размеров одинаковым с судном [4]. Эти значения k 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; 4; 8]. Но и эти результаты не учитывают влияние вязкости и волнообразования.

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

- 1) по числу Фруда $Fr = \frac{v}{\sqrt{g L}}$;
- 2) по числу Рейнольдса $Re = \frac{v \cdot L}{\nu}$;
- 3) по числу Струхала $Sh = \frac{L \cdot T}{v}$,

где v – скорость модели; L – характерная длина; T – время.

Однако одновременное выполнение этих трех критериев является технически невозможным, так как приводит к противоречивости требований к параметрам эксперимента.

В связи с этим используются следующие «приемы». 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 $t = 10$ °C $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6}$ м²/с) должно быть

$$Fr_M > 0,41 \cdot L_M^{-1,5}. \quad (4)$$

При экспериментальном определении k основным уравнением, описывающим движение модели, является уравнение (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 [4]: 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

$$k = \frac{R_M(v) + R_{II}(v)}{D_M \cdot \left| \frac{dv}{dt} \right|} - \frac{\Delta D_2}{D_M} - 1, \quad (5)$$

(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 (4) сводится к требованию $Fr_M > 0,08$. Но при таком режиме движения волнообразования практически не будет. Поэтому более обоснованным будет повысить минимальное число Рейнольдса до значения $Re = 1,5 \cdot 10^6$, что оправданно результатами испытания обтекания профилей [4]. 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 они могут быть вычислены для нескольких значений скорости $v(t)$. Если этих значений будет три – k_1 , k_2 и k_3 , то можно провести дополнительный анализ на наличие выбросов, полностью идентичный анализу, сделанному для скорости модели, и в качестве результата принять среднее значение $k = (k_1 + k_2 + k_3)/3$.

Заключение

1) В работе показаны практические приемы графического и аналитического «сглаживания» зависимости сопротивления движению модели $R(v)$, обусловленные погрешностями измерений. Это позволяет частично исключить эти погрешности при дальнейшей обработке результатов буксировочных испытаний модели в опытовом бассейне.

2) Разработан 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 достаточной длины.

3) Разработан 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – 9-е изд. – М.: Наука. Физматгиз, 1998. – 608 с.
2. Жинкин, В. Б. Теория и устройство корабля / В. Б. Жинкин. – 4-е изд. – СПб.: Судостроение, 2010. – 408 с.
3. Кассандрова, О. Н. Обработка результатов наблюдений / О. Н. Кассандрова, В. В. Лебедев. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1970. – 104 с.
4. Короткин, А. И. Присоединенные массы судостроительных конструкций / А. И. Короткин. – Л.: Мор Вест, 2007. – 448 с.
5. Павленко, Г. Е. Сопротивление воды движению судов / Г. Е. Павленко. – М.: Морской транспорт, 1956. – 508 с.
6. Снопков, В. И. Управление судном: учеб. для вузов / В. И. Снопков. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2004. – 536 с.
7. Справочник капитана дальнего плавания / под ред. Г. Г. Ермолаева. – М.: Транспорт, 1988. – 248 с.
8. Справочник по теории корабля. Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / под ред. Я. И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1989. – 328 с.
9. Тарануха, Н. А. Численное моделирование прочности и гидродинамики океанотехники / Н. А. Тарануха, О. В. Журбин, С. Д. Чижумов, И. Н. Журбина. – Владивосток: Дальнаука, 2009. – 340 с.
10. Третьяк, Л. Н. Обработка результатов наблюдений: учеб. пособие / Л. Н. Третьяк. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 171 с.