

КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ

DOI: 10.32743/UniTech.2021.89.8.12166

ОБОРУДОВАНИЕ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ПРИМЕНЯЕМЫЕ
ПРИ ИСПЫТАНИЯХ МОДЕЛИ СУДНА НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ*Мухина Милена Львовна**канд. техн. наук, доцент,**Нижегородский государственный технический университет**им. Р.Е. Алексева,**РФ, г. Нижний Новгород**E-mail: milena.an@bk.ru*EQUIPMENT AND MEASURING TECHNOLOGY USED IN TESTING A MODEL
OF A VESSEL ON UNDERWATER WINGS*Milena Mukhina**Cand. tech. Sci., Associate Professor, Associate Professor,**Nizhny Novgorod State Technical University**named after R.E. Alekseeva,**Russia, Nizhny Novgorod*

АННОТАЦИЯ

Приводятся краткие сведения по теории подобия и основам моделирования физических процессов применительно к гидродинамическим испытаниям буксируемых моделей судов на подводных крыльях. Описывается методика, лабораторное оборудование и измерительная техника, применяемые при обмере, нивелировке, взвешивании и центровке буксируемой модели судна на подводных крыльях.

ABSTRACT

Provides brief information on the theory of similarity and the basics of modeling physical processes as applied to hydrodynamic testing of towed models of hydrofoils. The technique, laboratory equipment and measuring equipment used for measuring, leveling, weighing and centering a towed model of a hydrofoil vessel are described.

Ключевые слова: судна на подводных крыльях (СПК), гидродинамика СПК, моделирование, теория подобия, обмер, нивелировка, установочный угол атаки подводного крыла, взвешивание модели СПК.

Keywords: hydrodynamics, hydrodynamics of hydrofoils, modeling, similarity theory, measurement, leveling, set angle of attack of the hydrofoil, weighing of the hydrofoil model.

Движение судна на подводных крыльях (СПК), происходящее вблизи границы раздела двух сред, представляет собой довольно сложную картину взаимодействия с жидкостью несущих, стабилизирующих и рулевых поверхностей гидродинамического комплекса (ГДК) судна, а также его вспомогательных элементов (стоек крыльев, кронштейнов, вращающихся гребных валов и других выступающих частей). Свою долю влияния в это взаимодействие вносят работающий движитель и явления брызгообразования и аэрации, практически не поддающиеся анализу. В итоге, задача аналитического исследования движения СПК с учетом взаимной интерференции элементов ГДК становится неразрешимой. Поэтому в проектировании новых СПК следует задействовать экспериментальные методы, в которых объектами исследования будут как отдельные элементы ГДК (крылья, рули и т.п.), так и модели судов в целом.

При проектировании современного СПК необходимо строить и испытывать несколько вариантов буксируемых моделей и не менее одной самоходной модели будущего корабля.

Гидродинамический (ГИД) эксперимент с буксируемыми и самоходными СПК решает следующие задачи:

1. Проектирование схемы гидродинамической компоновки судна, то есть выбор номенклатуры элементов ГДК и геометрических параметров, характеризующих как сами элементы, так и их взаимное расположение. Проектирование схемы ГДК обусловлено рядом требований, но важнейшим из них являются требования обеспечения судну наивысшего ГИД качества и устойчивости движения в расчетном режиме.

2. Определение гидродинамических характеристик (ГДХ) проектируемого судна, то есть зависимостей ГИД сил и моментов, действующих на судно от кинематических параметров движения (скорости, угла дифферента, возвышения ЦТ над границей раздела, угловых скоростей движения судна, углов перекладки органов управления и др.). Эти зависимости являются исходными данными для последующего анализа механики движения натурального судна. На базе этого анализа выполняются расчеты ходкости, устойчивости движения, управляемости, маневренности и др.

3. Исследования мореходности проектируемого судна, то есть изучение влияния морского волнения на полученные в соответствии с п.2, динамические характеристики судна на тихой воде, определение параметров качки и действующих перегрузок.

Отдельное место в этом перечне занимают работы, связанные с подготовкой к испытаниям моделей и лабораторного оборудования, методическим обеспечением эксперимента.

Процесс изучения физического явления, например, движения СПК, при помощи модели называется моделированием. Основное достоинство физического моделирования состоит в том, что оно позволяет непосредственно наблюдать характер взаимодействия гидродинамического комплекса (ГДК) модели с жидкостью [3]. Физическое моделирование в гидродинамических (ГИД) исследованиях базируется на понятиях механического подобия, под которым понимается совокупность условий, обеспечивающих одновременно геометрическое, кинематическое и динамическое подобие.

Геометрическое подобие – подобие формы (размеров или координат). Тела и системы называются геометрически подобными, если отношения их сходных линейных размеров одинаковы, а соответствующие углы равны.

Кинематическое подобие – подобие движения. В сходственных точках двух кинематически подобных систем в сходственные моменты времени векторы скоростей имеют одинаковые направления, а отношения модулей скоростей постоянны. В частности, кинематически подобные системы имеют траектории движения одинаковой формы.

Динамическое подобие – подобие сил. Две системы динамически подобны, если при выполнении геометрического подобия выполняются следующие условия: - в сходственных точках системы в сходственные моменты времени (а для стационарных процессов – в любые моменты времени) действуют одинаковые силы (силы одной природы); - отношения между всеми одноименными силами во всех сходственных точках динамически подобных систем одинаковы; - движения таких систем описывается одинаковыми дифференциальными уравнениями и подчиняются одинаковым начальным и подобным граничным условиям.

Таким образом, теория подобия дает возможность проанализировать механизм движения натурального объекта на основании экспериментальных результатов, полученных при испытаниях моделей [3].

Подобие может быть полным и неполным. Полное динамическое подобие – редко достигаемый предел. Гидродинамические исследования буксирных моделей СПК приходится проводить в условиях частичного подобия.

Для существования ГИД подобия необходимо безусловное выполнение требований геометрического и кинематического подобия. При наличии геометрического подобия все линейные размеры модели и натуре отличаются величиной линейного масштаба, называемого также «масштабным модулем», «коэффициентом масштаба», то есть (все параметры натурального потока здесь и далее отмечаются индексом «н»), а модельного – «м»).

$$l_n/l_m = m_l \text{ или } l_n = m_l \cdot l_m$$

Для сходственных сечений S и объемов W при наличии геометрического подобия

$$S_n/S_m = m_l^2, W_n/W_m = m_l^3$$

или

$$S_n = m_l^2 \cdot S_m, W_n = m_l^3 \cdot W_m.$$

Кинематическое подобие предусматривает аналогичные соотношения, использующие линейный масштаб:

скорости $v_n/v_m = \sqrt{m}$ или $v_n = v_m \sqrt{m}$; времени $t_n/t_m = \sqrt{m}$.

Что касается динамического подобия, то в ГИД эксперименте является необходимым и достаточным выполнение следующих двух условий:

1. О пропорциональности сил инерции и сил вязкостного сопротивления (критерий Рейнольдса):

$$Re = \frac{v_n l_n}{\zeta_n} = \frac{v_m l_m}{\zeta_m} = idem \quad (1),$$

где v – скорость движения объекта; l – характерный линейный размер, например, расстояние между крыльями; ζ – кинематический коэффициент вязкости.

2. О пропорциональности сил давления и сил тяжести (критерий Фруда):

$$Fr = \frac{v_n}{\sqrt{g l_n}} = \frac{v_m}{\sqrt{g l_m}} = idem \quad (2),$$

где g – ускорение свободного падения.

Поскольку в реальной жидкости силы вязкости, инерции, тяжести и др., действуют одновременно, выполнить условие (1) и (2) совместно практически не удается. Так, если опыты проводятся в воде обычной температуры, то при уменьшении размеров модели для сохранения постоянства чисел Фруда скорость буксировки модели нужно уменьшить, а для сохранения чисел Рейнольдса – увеличить. Сохранение же постоянства чисел Фруда посредством уменьшения кинематического коэффициента ζ повышением температуры или применением жидкости с малой вязкостью, например, ртути, вызывает на практике очень большие затруднения.

В гидродинамике СПК чаще всего изучаются характеры потоков, вызванных движением тел вблизи и по поверхности тяжелой жидкости, когда главными силами, определяющими явление, выступают силы инерции и силы тяжести, в основу эксперимента с буксируемыми моделями закладывается закон Фруда. Пренебрежение силами вязкости вносит некоторые ошибки. Ошибки будут тем больше, чем меньше масштаб модели, [3].

При различного рода испытаниях буксиремых и самоходных моделей СПК, проводимых как в опытовых бассейнах, так и на открытых акваториях, употребляются следующие соотношения, базирующиеся на соблюдении критерия (2):

1) масса (массовое водоизмещение) натурного судна и модели

$$D_H/D_M = m^3 l \quad (3);$$

2) силы буксировочного сопротивления при сходственных скоростях

$$R_H/R_M = m^3 l \quad (4);$$

3) сходственные скорости

$$v_H/v_M = \sqrt{ml} \quad (5);$$

4) углы ходового дифферента на сходственных скоростях

$$\varphi_H = \varphi_M \quad (6).$$

В практике ГИД расчетов иногда встречается необходимость пересчитать кривую буксировочного сопротивления модели, полученную при некотором водоизмещении (массе) модели D_{M_1} на новое водоизмещение D_{M_2} . В этом случае используется соотношение

$$R_{M_1}/R_{M_2} = D_{M_1}/D_{M_2} = v_{M_1}^2/v_{M_2}^2,$$

полученное из условия, что изменение массы судна $\Delta D = D_2 - D_1$ невелико и не приводит к существенному изменению продольной посадки судна и его модели.

Выбор масштаба модели (отношения $1:m_l$) определяется расчетной скоростью проектируемого СПК v_H и максимальной скоростью буксировочной тележки опытового бассейна или катера-буксировщика $v_{\text{букс}}$.

$$1:m_l = v_{\text{букс}}^2 : v_H^2.$$

Если проектируется высокоскоростное СПК, то масштаб модели может оказаться сравнительно малым, а с уменьшением масштаба и, следовательно,

уменьшением абсолютных размеров модели возрастает влияние масштабного эффекта, заключающееся в несовпадении истинных величин сопротивления и продольной посадки судна с аналогичными величинами, полученными пересчетом по закону Фруда.

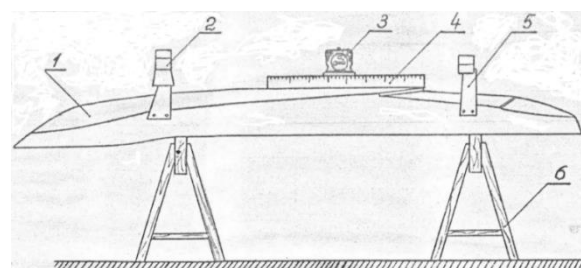
Подготовка технологически законченной модели СПК к проведению буксировочных испытаний включает в себя операции обмера и нивелировки, взвешивания модели и приведения ЦТ к расчетному положению (центровки модели).

Понятие обмера модели не требует каких-либо пояснений, а нивелировка – это определение положения различных точек модели, в первую очередь характерных точек ее ГДК, относительно некоторой базовой плоскости, например, основной плоскости модели.

Базовым документом для обмера и нивелировки является паспорт на крыльевое устройство натурного судна или схема ГИД компоновки модели.

Обмер и нивелировка производится для проверки правильности сборки корпуса и монтажа ГДК модели. При этом уточняются фактические данные как по основным геометрическим размерам, так и по параметрам, которые являются регулируемыми (установочные углы атаки крыльев, углы отклонения рулей и т.п.).

Под установочным углом атаки подводного крыла понимается угол, который составляет хорда жестко закрепленного крыла с некоторой плоскостью, в качестве которой чаще всего фигурирует основная плоскость модели. Установочные углы атаки подводных крыльев относятся к числу важнейших геометрических параметров несущей системы СПК [4]. Они подбираются опытным путем. Полученные в результате многочисленных буксировок модели значения установочных углов должны соблюдаться с точностью до минуты, поскольку даже небольшие (порядка нескольких минут) отклонения могут привести к потере устойчивости движения. Установочные углы атаки подводных крыльев выставляются и проверяются на модели СПК следующим образом, рис. 1.



1 – модель; 2 – носовое крыло; 3 – прибор-угломер; 4 – проверочная линейка; 5 – кормовое крыло; 6 – опора модели

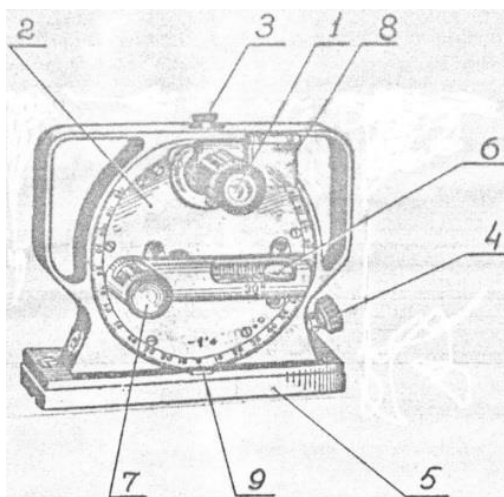
Рисунок 1. Установка модели СПК для замеров установочных углов атаки подводных крыльев

Модель 1, оборудованная носовым 2 и кормовым 5 подводными крыльями устанавливается вверх дном на двух и более опорах 6. На участке килевой линии. Там, где она совпадает с основной линией корпуса, устанавливается проверочная линейка 4.

На верхнюю плоскость проверочной линейки устанавливается прибор – угломер 3, с помощью которого фиксируется угол $\alpha_{оп}$, который составляет основная плоскость модели с плоскостью горизонта. В качестве такого прибора в ГИД лабораториях используется оптический квадрант, рис. 2. Оптический квадрант марки КО-30 – это серийный прибор, служащий для измерения углов наклона и установки плоскостей, а также труб и валов под заданным углом к горизонтальной плоскости.

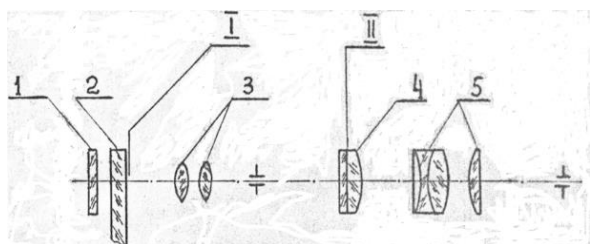
Искомая величина наклона фиксируется лимбом и отсчитывается через микроскоп 1, укрепленный на крышке 2 квадранта. Оптическая схема квадранта представлена на рис. 3. Квадрант позволяет производить измерения с точностью до минуты, но на-глаз могут быть оценены и доли минуты, рис. 4.

Грубая установка угла производится при освобожденном винте 3 по шкале, нанесенной на крышке 2 квадранта, а точная – винтом микрометрической подачи 4 по шкале стеклянного лимба, вмонтированного в квадрант. Квадрант имеет два пузырьковых уровня: основной 6 – продольный и вспомогательный 7 – поперечный, позволяющий проконтролировать перекосы квадранта при его установке.



1 – оптический микроскоп; 2 – крышка со шкалой; 3 – винт зажимной; 4 – винт микрометрической подачи; 5 – основание; 6, 7 – уровни; 8 – зеркало; 9 – указатель

Рисунок 2. Оптический квадрант КО-30



1 – светофильтр; 2 – оптический лимб (подробно см. рис. 4); 3 – линзы объектива; 4 – сетка с конденсатором; 5 – линзы окуляра

Рисунок 3. Оптическая схема квадранта КО-30

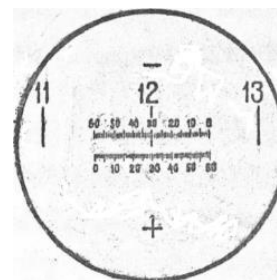
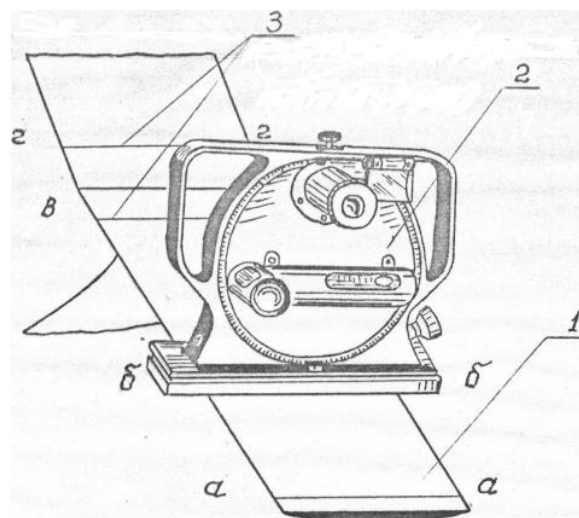


Рисунок 4. Оптический лимб квадранта КО-30

Все отечественные СПК [3] имеют крылья с профилем в виде плоско-выпуклого сегмента, отсюда, дальнейшая работа по определению установочных углов крыльев существенно упрощается и сводится к определению угла $\alpha_{нп}$, который составляет нижняя нагнетательная плоскость крыла с горизонтальной плоскостью [1]. На упомянутой плоскости крыла карандашом размечаются ряд линий, параллельных ДП, обозначающих сечение крыла. В которых производятся замеры установочных углов. Квадрант КО-30 устанавливается вдоль каждой контрольной линии так. Как это показано на рис. 5.



1 – нижняя нагнетающая поверхность крыла; 2 – квадрант КО-30; а-а, б-б и т.д. (контрольные сечения крыла)

Рисунок 5. Установка квадранта КО-30 при определении установочного угла атаки крыла

Далее необходимо освободить зажимной винт 3 и вращать крышку 2 квадранта до тех пор, пока пузырек продольного уровня 6 не займет приблизительно среднее положение. Зажать винт 3 винтом микрометрической подачи 4 привести пузырек уровня 6 в среднее положение с возможно большей точностью. Полученный угол $\alpha_{нп}$ отсчитывается по лимбу через микроскоп, как показано на рис. 4.

Установочный угол крыла в рассматриваемом i -м сечении равен

$$\alpha_{уст_i} = \alpha_{нп_i} - \alpha_{оп} \text{ (град.)}$$

Соотношение (3), положенное в основу ГИД экспериментов с буксируемыми моделями. Предъявляет довольно жесткие требования к массе модели. Приходится применять специальные конструктивные и технологические меры, направленные на облегчение корпуса модели. Следует учитывать также, что масса технологически законченной модели должна быть даже меньше расчетной. Недостающая масса компенсируется набором грузов, расположение которых определяется в ходе подготовительной операции, которая называется центровкой модели.

Вначале модель взвешивается, рис.6 а. На выступающих из корпуса модели концах поперечной оси (металлический пруток диаметром 15...20 мм), проходящей через ЦТ, закрепляются концы двух тросов, с помощью которых модель подвешивается к динамометру, измеряющему силу тяжести модели. В качестве такового может служить как стандартный, серийно выпускающийся прибор, так и специально изготовленное для этой цели устройство. Используется, например, ромбический динамометр, рис. 6 б, представляющий собой тонкостенную металлическую рамку с конфигурацией в виде ромба. Груз, подвешенный к одному из концов рамки, вызывает ее деформацию, при которой стенки динамометра начинают сближаться друг с другом. Перемещение воспринимается индикатором. Прибор предварительно тарируется и практическое взвешивание осуществляется с использованием тарировочной кривой.

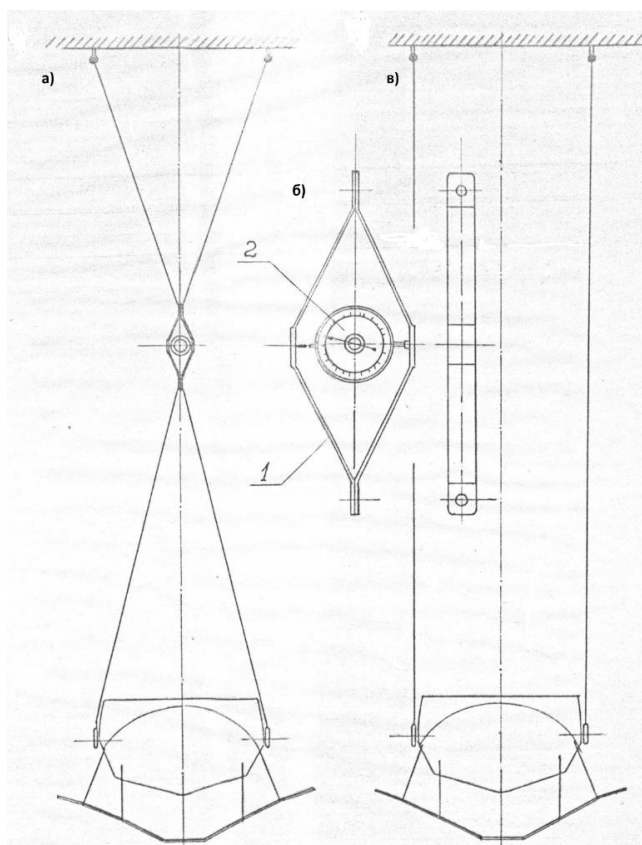
Во время взвешивания модель предварительно центрируется, рис 6 в. Метод определения положения

ЦТ модели базируется на известном из механики положении, что ЦТ твердого тела является той точкой, через которую всегда проходит равнодействующая сил тяжести, независимо от ориентации тела в пространстве. Для окончательной центровки модель подвешивается к другой паре тросов, в нижнее концы которых вплетены подшипниковые втулки, позволяющие неуравновешенной модели свободно поворачиваться в вертикальной плоскости. Перемещая грузы, можно добиться у модели соотношения безразличного равновесия. Модель отцентрована.

Для подготовки модели СПК к буксировочным испытаниям необходимо владеть основными характеристиками натурного судна и расположением контрольных сечений на его гидродинамической схеме и далее:

1. Модель устанавливается вверх днищем на обе опоры и определяется угол $\alpha_{оп}$.
2. На нижних плоскостях каждого крыла модели размечаются карандашом заданные контрольные сечения.
3. Выполняется обмер основных характеристик корпуса модели.
4. Модель взвешивается и центруется.
5. Производится обмер и нивелировка ГДК по контрольным сечениям.

Составляется эскиз «Схема гидродинамической компоновки модели СПК пр. ...», включающий в себя: а) вид на ГДК модели снизу; б) носовое крыло (поперечный разрез); в) кормовое крыло.



а) взвешивание модели; б) ромбический динамометр; в) центровки модели; 1 – упругая рамка; 2 – индикатор перемещений

Рисунок 6. Взвешивание и центровки модели СПК

Список литературы:

1. Андрианов Л.В. // Подготовка модели СПК к проведению буксировочных испытаний. Метод. указания к лабораторной работе. – Горький: ГПИ им. А.А. Жданова, 1987. – 25 с.
2. Егоров И.Т., Соколов В.Т. // Гидродинамика быстроходных судов. – Л.: Судостроение, 1965. – С. 61.
3. Седов Л.И. // Методы подобия и размерности в механике. 10-изд. доп. –М.: Наука. 1987. – 432 с.
4. Иконников В.В., Маскалик А.И. // Особенности проектирования и конструкции судов на подводных крыльях. – Л.: Судостроение, 1987. – С.16; 50; 191-208; 305-349.