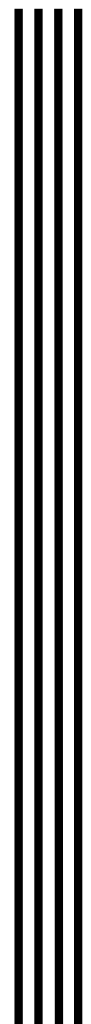


Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический университет



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к лабораторной работе
«Моделирование сопротивления движению судов» по
дисциплине «Статика и динамика» (часть 2
Сопротивление движению судов и движители) для
студентов специальности 7.100201 – "Корабли и
океанотехника" всех форм обучения

г. Севастополь
2005



УДК 629.12.03:073

Методические указания к лабораторной работе «Моделирование сопротивления движению судов» по дисциплине Статика и динамика (часть 2 "Сопротивление движению судов и движители") / Сост. Г.Н. Грищенко, В.Г. Зиньковский-Горбатенко. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2005.- 20 с.

Целью настоящих методических указаний является оказание помощи студентам в выполнении лабораторной работы «Моделирование сопротивления движению судов» по дисциплине Статика и динамика (часть 2 "Сопротивление движению судов и движители").

Настоящие методические указания могут быть использованы студентами, магистрами и аспирантами при выполнении экспериментальных работ, связанных с определением сопротивления судов и плавучих сооружений.

Рецензент: канд.техн.наук., доцент Новиков А.И.

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры Океанотехники и кораблестроения 28 января 2005 г., протокол № 10

Допущено учебно-методическим центром и научно-методическим советом СевНТУ в качестве методических указаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алферьев М.Я. Ходкость и управляемость судов. сопротивление воды движению судов/М.Я.Алферьев.- М.:Транспорт, 1967.-344 с.
2. Павленко Г.Е. Сопротивление воды движению судов /Г.Е.Павленко.-М.:Водтрансиздат,1953.- 508.с.
3. Справочник по теории корабля:В 3-х т.Т.1/Под ред. Я. И. Войткунского.-Л.: Судостроение, 1985.-768с
4. Назаров А.Г. Экспериментальная установка для исследования нестационарных гидродинамических характеристик судов методом разгона моделей в опытовом бассейне/ А.Г Назаров, Д.А. Долинский // Вестник СевГТУ.-Севастополь,2001.- Вып.30. С.31-34.
5. Войткунский Я.И. Справочник по теории корабля/ Я.И. Войткунский, Р.Я.Першиц, И.Ф.Титов.-Л.:Судпромгиз,1960.-688с.
6. Турбал В.К. Проектирование обводов и движителей морских-транспортных судов /В.К.Турбал,В.С.Шпаков,В.М.Штумпф.- Л.:Судостроение,1983.-304с.
7. Van Lammeren, Van Mannen and Lap. Scale Effect Experiments on Victory Ships and Models. Tr.INA, vjl.97, 1955.

Таблица 2 Бусировочное сопротивление и буксировочная мощность судна

$$\nu = \text{--- м}^2 \cdot \text{с}^{-1}; \quad \rho = \text{--- т} \cdot \text{м}^{-3}; \quad \Omega = \text{--- м}^2;$$

$$I + k = \text{---} \quad \delta C = C_{AP} + C_{AA} + dC_F = \text{---}$$

Элементы Расчета	Fr (из табл.1)					
$Re = Fr \frac{\sqrt{gL^3}}{\nu}$						
$\nu = Fr \sqrt{gL}, \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$						
$C_{F0} = \frac{0,075}{(\lg Re - 2)^2}$						
$C_{F0}(I + k)$						
C_W (из таблицы 1)						
$C_T = C_{F0}(I + k) + C_W + \delta C$						
$R = C_T \frac{\rho}{2} \Omega \nu^2$						
$P_E = R \nu$						

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Моделирование сопротивления движению судна в малом опытовом бассейне. Проблемы и задачи	5
1.1 Определение сопротивления модели с учетом потерь на трение в буксировочной системе	8
1.2 Оценка обеспечения турбулентного режима при буксиро- вочных испытаниях и определение формфактора	11
1.3 Пересчет результатов испытаний с модели на натуру ...	13
Библиографический список	19

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Практическое освоение процедуры моделирования сопротивления движению судов в соответствии со схемой ИТТС-78 с учетом особенностей опытового бассейна гравитационного типа

ВВЕДЕНИЕ

Раздел Статики и динамики «Сопротивление движению судов и движители» посвящен важнейшему мореходному качеству судов – ходкости. Движение судна у границы раздела двух сред – воды и воздуха – сопровождается сложным движением обеих сред, трудно поддающимся теоретическим методам исследования. Это обстоятельство предопределяет основную особенность задач исследования ходкости – широкое использование методов физического моделирования в комбинации с методами теоретической гидромеханики судна. В связи с этим лабораторные работы по дисциплине «Сопротивление движению судов и движители» построены как на использовании малого опытового бассейна кафедры Океанотехники и кораблестроения, так и вычислительного центра кафедры.

Лабораторная работа «Моделирование сопротивления движению судов» посвящена решению основной части задачи оценки ходкости судна – определению сопротивления судна в условиях скоростных испытаний на тихой воде по результатам испытаний модели в опытовом бассейне кафедры Океанотехники и кораблестроения СевНТУ. Работа выполняется с использованием моделей судов различных типов, имеющих в парке моделей кафедры.

Испытания моделей судов, разработанных студентами – авторами выпускных работ и дипломных проектов возможно при участии авторов работ в изготовлении моделей и проведении испытаний.

Таблица 1- Формфактор, коэффициент волнового сопротивления

$$v_M = \text{---} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}; \quad \rho_M = \text{---} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}; \quad \Omega_M = \text{---} \text{ м}^2;$$

Элементы Расчета	$v_M, \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$					
$R_M, \text{ Н}$						
$Re_M = \frac{v_M L_M}{\nu_M}$						
$Fr = \frac{v_M}{\sqrt{g L_M}}$						
$C_{TM} = \frac{2R_M}{\rho_M \Omega_M v_M^2}$						
$C_{F0M} = \frac{0,075}{(\lg Re_M - 2)^2}$						
C_{TM} / C_{F0M}						
$C_V / C_{F0} = 1 + k$	-	-	(интервал $C_{TM} / C_{F0M} \approx const$)			-
$C_{F0M}(1+k)$						
$C_W = C_{TM} - C_{F0M}(1+k)$						

Оценивается число $Re_{min} = Fr \sqrt{\frac{gL_M^3}{v_M}}$ при $Fr = 0,1$.

Если $Re_{min} < 6 \cdot 10^5$ следует быть готовым к тому, что для полной турбулизации потока придется либо применять дополнительные меры искусственной турбулизации, либо пойти на снижение точности оценки сопротивления на расчетном режиме за счет дальнейшего увеличения длины модели.

2. Изготовление модели, её статическая тарировка и подготовка к испытаниям.

Включает проверку соответствия модели теоретическому чертежу, проверку шероховатости поверхности модели, взвешивание и центровку по длине в соответствии с заданными значениями по принятой технологии.

Подготовка к испытаниям включает установку элементов запряжки (бушприта, задержника и т.д.).

Выполняются пробные пробеги модели с целью проверки готовности всего устройства к испытаниям.

3. Тарировка привода буксировочного устройства.

Включает оценку механических потерь в приводе и выполняется, как описано в 1.1 в требуемом диапазоне нагрузок на подшипник.

4. Собственно испытания.

Предварительно оцениваются минимальная и максимальная скорости буксировки, в интервале изменения которых будут выполняться пробеги:

$$(v_M)_{min} = Fr_{min} \sqrt{gL_M} \quad \text{и} \quad (v_M)_{max} = Fr_{max} \sqrt{gL_M}.$$

В этом интервале скоростей совершаются пробеги модели с последовательно увеличивающимися скоростями, причем при каждой массе движущего груза m_j делается не менее трех пробегов модели. При каждом пробеге проверяется существование интервала движения модели с установившейся скоростью и определяется значение последней v_{ji} . Среднее из v_{ji} при одном и том же m_j принимается за скорость, соответствующую этой массе груза v_j . Пробег со скоростью, заметно отличающейся от средней, исключается и заменяется контрольным пробегом.

5. Обработка данных

Обработка выполняется в три этапа. На первом этапе значения сопротивления модели вычисляются по формулам (3), (4) или (7).

Затем вычисляются значения формфактора и коэффициентов волнового сопротивления (таблица 1)

Собственно расчет сопротивления судна выполняется в таблице 2

Результаты расчета представляются, как обычно, в графической форме, корректируются при обнаружении ошибок и сглаживаются.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ СУДНА В МАЛОМ ОПЫТОВОМ БАСЕЙНЕ. ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ.

Малый опытовый бассейн кафедры ОК СевНТУ – гравитационного типа. Имеет размеры чаши бассейна 10×3 м при глубине воды до 1,7 м. Малая длина бассейна, к тому же ограниченная колоколом волнопродуктора и волногасителем, создает ряд проблем при выполнении испытаний моделей судов на сопротивление.

Во-первых, малая длина зеркала воды в бассейне L_B определяет предельную длину моделей L_M . Действительно, с учетом разгонного и тормозного участков (по $\approx 1 \cdot L_M$) движения модели, участка установления режима обтекания (не менее L_M) и участка движения с установившейся скоростью $(3...4)L_M$ [1] получается, что предельная длина модели не должна превышать $L_{Mmax} = \frac{L_B}{(6...7)}$, что, при длине зеркала $L_B \approx 8$ м дает

$$L_{Mmax} = 1,33...1,14 \text{ м.}$$

При таких длинах для предельно «коротко-полных» судов с $\frac{L}{B} = 3...4$ ширина модели составляет $0,44...0,29$ м, что для бассейна с шириной 3 м дает $\frac{B}{B_B} = \frac{1}{6,8}... \frac{1}{10}$ (при рекомендуемых [1, 2] соотношениях $\frac{B}{B_B} = \frac{1}{9}... \frac{1}{16}$), так что ширина моделей должна быть ограничена, примерно, величиной $B_M = 0,3$ м. Поскольку у обычных судов $\frac{B}{d} > 2,5$, то значения $\frac{d}{H_B}$ при этом составят $\frac{1}{12,5}$, при рекомендуемых значениях $\frac{d}{H_B} = \frac{1}{16}$, т.е. превышает рекомендуемые значения. Более определенные оценки допустимых размеров моделей могут быть сделаны с использованием диаграммы Комстока и Хенкока [2], позволяющих оценить предельную длину модели в зависимости от числа Фруда и удлинения судна как

$$\frac{L_M}{B_B} = f\left(\frac{d}{L^3}; Fr\right).$$

Оценки по диаграмме, по утверждению её авторов, соответствуют условиям испытаний, при которых сопротивление модели в бассейне отличается от сопротивления на открытой глубокой воде не более, в среднем, чем на 0,5%. Диаграмма из [2] воспроизведена на рисунке 1. Поскольку в ори-

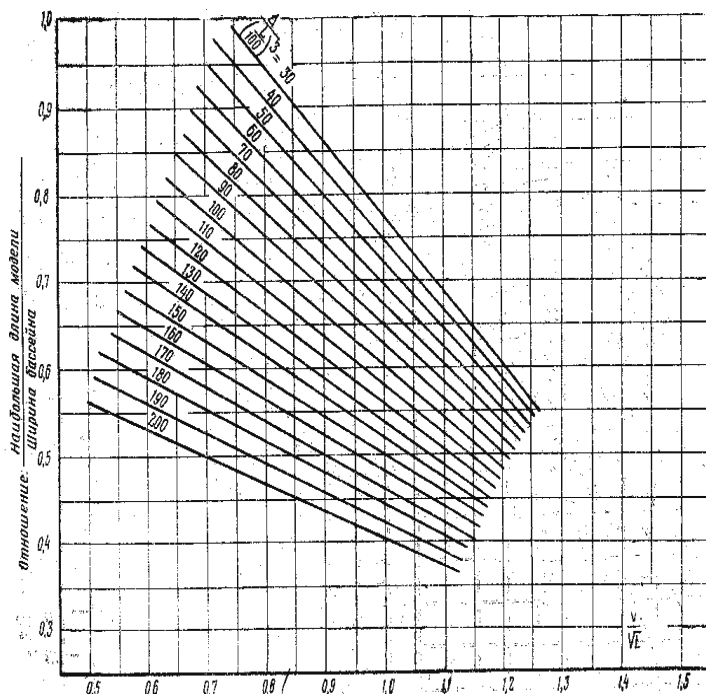


Рисунок 1 –Критическая длина модели

принимается:

- для пресной воды при $t^{\circ}C = 4^{\circ}$ $\nu = 1,57 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$;
при $t^{\circ}C = 15^{\circ}$ $\nu = 1,139 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$;
- для соленой воды при $t^{\circ}C = 5^{\circ}$ $\nu = 1,56 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

В подготовке опыта и расчетах используются следующие элементы, размерения и параметры формы судна:

Водоизмещение судна	Δ , т;
длина судна по ВЛ,	L , м;
длина между перпендикулярами	L_P , м;
ширина	B , м;
осадка	d , м;
абсцисса центра тяжести	x_G , м;
расчетная скорость хода	v , $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$,
а также расчетные характеристики воды -	
плотность воды	ρ , $\text{т} \cdot \text{м}^{-3}$;
кинематическая вязкость	ν , $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.
Предварительно оцениваются:	
корреляционная поправка (для схемы Фруда)	C_A ;
надбавка на выступающие части	C_{AP} .

Процедура моделирования сопротивления движению судна в малом опытовом бассейне кафедры ОК подразделяется на следующие операции:

1. Выбор размера модели.

Вычисляется расчетное число Фруда $Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}$.

Для расчетного числа Fr по значению $\left(\frac{\Delta}{L/100}\right)^3$ (предварительно пер-

решенным по формулам (1) !) определяется по рисунку 1 относительная длина модели L_M/B_B , соответствующая практическому отсутствию влияния ограниченности бассейна на сопротивление на расчетном режиме. Соответствующая длина модели $L_M = \left(L_M/B_B\right) B_B$.

Если ограничиться погрешностью в сопротивлении модели на расчетном режиме не более 2%, длину модели можно увеличить на 50%.

По т.н. "схеме 2" (схеме ИТТС-78) [6] коэффициент полного сопротивления судна определяется как:

$$C_T = (1 + k) \cdot C_{F0}(Re) + C_W(Fr) + C_{AP} + C_{AA} + dC_F \quad (9)$$

При этом $C_{F0}(Re)$ принимается по формуле ИТТС-57.

Коэффициент волнового сопротивления определяется из результатов испытаний модели из (8).

C_{AP} - коэффициент сопротивления выступающих частей при испытаниях крупных моделей определяется по результатам экстраполяции на большие числа Re коэффициента сопротивления модели судна, снабженной выступающими частями, и той же модели, без выступающих частей ("голого корпуса"); значение C_{AP} изменяется в зависимости от числа винтов и рулей и полноты обводов.

При испытаниях малых моделей невозможно обеспечить турбулентное обтекание миниатюрных выступающих частей, поэтому малые модели испытываются без выступающих частей – как «голый корпус», а коэффициент сопротивления выступающих частей вводится в расчет в соответствии с рекомендациями справочных руководств и отраслевых РД. Например, согласно [3] для одновинтового судна принимается $C_{AP} = f(L)$;

При использовании "схемы 2" коэффициент учитывается коэффициент воздушного сопротивления C_{AA} в условиях скоростных испытаний. По ИТТС-78 C_{AA} определяется приближенно как

$$C_{AA} = F_T / (1000 \cdot \Omega), \quad (10)$$

а поправка на шероховатость свежеекрашенной обшивки dC_F - по формуле, рекомендованной ИТТС-75

$$dC_F = \left[105 \left(\frac{R_{MA}}{L} \right)^{1/3} - 0,64 \right] \cdot 10^{-3}, \quad (11)$$

где расчетная шероховатость принимается равной $R_{MA} = 1,50 \cdot 10^{-4}$ м.

C_W определяются по результатам испытаний модели данного судна в опытовом бассейне по формуле

$$C_W(Fr) = C_T(Fr) - C_{F0}(Re(Fr)) \cdot (1 + k), \quad (12)$$

где k - формфактор, определенный, как указано выше.

Ω - смоченная поверхность голого корпуса судна, m^2 ; определяется по теоретическому чертежу судна интегрированием "кривой смоченных полупериметров" шпангоутов $l = f(x)$ по x как

$$\Omega = 2 \int_L l(x) dx.$$

При выполнении расчетов коэффициент кинематической вязкости ν

гине использованы не принятые теперь единицы измерения, для входа в диаграмму следует предварительно определить

$$\left(\frac{V}{\sqrt{L}} \right)_{\text{диагр}} = 3,36 Fr \quad \text{и} \quad \left(\frac{\Delta}{(L/100)^3} \right)_{\text{диагр}} = 0,0279 \frac{\Delta}{(L/100)^3} \quad (1)$$

По оценкам авторов диаграммы, при увеличении длины модели на 50, 100 и 150% сопротивление возрастает, по сравнению с сопротивлением на свободной воде, на 2, 5 и 10% соответственно. Оценку по диаграмме следует рассматривать как предварительную. Окончательный вывод о приемлемости принятого размера модели придется делать, как указано в 1.2.

Во-вторых, достоверность результатов моделирования в значительной мере определяется полнотой турбулизации пограничного слоя модели и его устойчивостью.

Сравнение результатов испытаний моделей стандартного судна (модель судна VICTORY) в опытовых бассейнах мира, предпринятых по инициативе ИТТС [3], показало, что влияние на результаты испытаний частных особенностей опытового бассейна, способов искусственной турбулизации потока и других, трудно контролируемых факторов и обстоятельств, таких, как отрыв пограничного слоя, не может быть учтено априори и должно контролироваться непосредственно во время испытаний модели.

Такой контроль особенно необходим при испытаниях малых моделей.

По-видимому, наилучшим и достаточно просто осуществляемым приемом контроля за степенью турбулизации пограничного слоя, его устойчивостью является анализ поведения отношения коэффициента полного сопротивления C_T к коэффициенту трения C_{F0} при изменении числа Фруда Fr . Действительно, постоянство значения C_T / C_{F0} на доволновых числах Фруда не только указывает на достижение устойчивого турбулентного обтекания модели, но и позволяет оценить нижнюю границу чисел Фруда (и Рейнольдса, поскольку для данной модели они однозначно связаны), границу, ниже которой результаты испытаний модели не могут быть использованы для пересчета на натуру.

Далее этот вопрос будет рассмотрен подробно в 1.2.

В-третьих, точность результатов испытаний модели в малом бассейне, а, следовательно, и точность результатов пересчета на натуру, существенно зависит от особенностей заправки модели.

Так, в малом опытовом бассейне кафедры ОК модель буксировается свободной нитью, а не ветвью бесконечной нити, как обычно принято в буксировочных устройствах гравитационных бассейнов. Это резко упрощает конструкцию и естественно при малой длине бассейна, но заставляет принимать меры по обеспечению устойчивости движения на прямом курсе. Последнее достигается путем выноса точки крепления буксировочной нити за носовой перпендикуляр модели на расстояние порядка $L_M/2$ - на нок специального «бушприта» или буксировкой с помощью запряжки в виде треугольника (половины ромба) с выносом узла треугольника на то же расстояние за нос модели.

Кроме того, в рассматриваемом устройстве нижняя кромка окружности ведущего шкива расположена выше, чем точка крепления нити на модели, поэтому буксирующая нить подходит к ведущему шкиву под некоторым углом к горизонту, что также должно быть учтено в расчетах сопротивления модели.

Далее, должны быть учтены, путем предварительной тарировки, механические потери в приводе. Этому вопросу посвящен раздел 1.1.

Наконец, должна непрерывно регистрироваться скорость движения модели, поскольку необходимо удостовериться, что во время пробега была достигнута установившаяся скорость движения модели. Наилучшим образом определение скорости реализуется путем регистрации моментов времени замыкания неподвижного контакта (геркона), при прохождении мимо него магнита, расположенного на ведущем шкиве буксировочного устройства и вращающегося вместе со шкивом. Ввод этого сигнала в компьютер, вместе с сигналом внутреннего таймера компьютера, позволяет вычислять текущую скорость модели [4].

Измерение только средней скорости на рабочем участке не позволяет убедиться в том, что установившаяся скорость была достигнута. Однако, в качестве альтернативы непрерывному измерению скорости модели, можно использовать измерение моментов времени прохождения моделью трех секущих створов, расстояние между которыми известно.

1.1. Определение сопротивления модели с учетом потерь на трение в буксировочной системе.

При принятой в бассейне кафедры ОК схеме привода (рисунок 2) основная часть механических потерь имеет место в опорном подшипнике ведущего вала. Эти потери зависят от нагрузки на подшипник. Потери на изгиб нити пренебрежимо малы.

В рабочем режиме при установившемся вращении нагрузка на подшипник (рисунок 2а) создается весом движущего груза m , весом вращаю-

В качестве экстраполятора использована зависимость, рекомендованная ИТТС-57

$$C_{F0} = \frac{0,075}{(\lg Re - 2)^2}.$$

Видно, что испытания малой модели (длина 1,695 м) даже при $Re = 6 \cdot 10^5$ ($Fr = 0,0986$) не обеспечивают полностью турбулентного режима обтекания, не смотря на принятые меры искусственной турбулизации потока (проволока диаметром 1 мм на 0,05 шп.). Однако при больших значениях числа Re условие $\frac{C_T}{C_{F0}} = const$ на доволновых числах Fr обеспечивается.

Для суждения о точности оценки формфактора и достоверности гипотезы Хьюза, на рисунке приведены результаты испытаний крупной модели (в масштабе 1:6, длина 22,633 м) того же судна в Голландии [7].

Сравнение результатов испытаний моделей VICTORY в 1:80 и в 1:6 натуре показывает, что гипотеза о постоянстве формфактора для модели и натуре, при использовании в качестве экстраполятора формулы ИТТС-57, выполняется вполне удовлетворительно.

Таким образом, построение, по результатам испытаний, графика $\frac{C_T}{C_{F0}} = F(Fr)$ позволяет убедиться в устойчивости режима турбулентного обтекания и надежно оценить значение формфактора для пересчета результатов испытаний с модели на натуру.

Необходимость выполнения испытаний на низких скоростях, соответствующих доволновым режимам движения судна, т.е. при $Fr < 0,1 \dots 0,14$, является наиболее неприятной особенностью моделирования сопротивления, и учитывается при выборе размера модели с целью обеспечения возможно больших значений Re .

1.3 Пересчет результатов испытаний с модели на натуру.

Сопротивление судна R и буксировочная мощность P_E в условиях скоростных испытаний определяются известными зависимостями:

$$R = C_T \rho \Omega v^2 / 2, \text{ кН};$$

$$P_E = R \cdot v, \text{ кВт},$$

где C_T - коэффициент полного сопротивления натурного судна;

ρ - плотность забортной воды, $\text{т} \cdot \text{м}^{-3}$;

Ω - площадь смоченной поверхности судна, м^2 ;

v - расчетная скорость хода, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$.

вательно, в качестве критерия существования полностью развитого турбулентного режима можно использовать условие

$$\frac{C_T}{C_{F0}} = \text{const}.$$

Очевидно, левая граница постоянного значения отношения $\frac{C_T}{C_{F0}}$ как функции от $Re(Fr)$ соответствует переходному режиму обтеканию модели, а правая – появлению заметного волнового сопротивления. Само значение $\frac{C_T}{C_{F0}}$ определяет собой формфактор $k = \frac{C_V}{C_{F0}} - 1$, так как при

$$\frac{C_T}{C_{F0}} = \text{const} = \frac{C_V}{C_{F0}} = 1 + k.$$

Для примера на рисунке 3 приведены значения $\frac{C_T}{C_{F0}}$ для модели судна VICTORY в масштабе М1:80, испытанной в ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова.

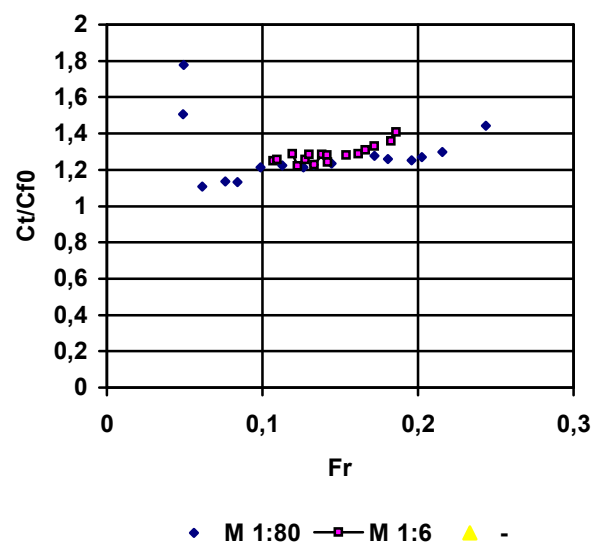


Рисунок 3 Зависимость $\frac{C_T}{C_{F0}} = F(Fr)$.

щейся части привода m_y , вертикальной составляющей силы натяжения буксирующей нити $T \sin \varphi$ и горизонтальной её составляющей $T \cos \varphi$ и, следовательно, равна

$$\sqrt{[g(m + m_y) + T \sin \varphi]^2 + (T \cos \varphi)^2}.$$

Вращающий момент равен

$$mgr_P - Tr_R,$$

где T связано с сопротивлением модели как $T = \frac{R}{\cos \varphi}$.

Таким образом, для определения сопротивления R имеем

$$mgr_P - \frac{Rr_R}{\cos \varphi} = f \sqrt{[g(m + m_y) + R \tan \varphi]^2 + R^2}, \quad (2)$$

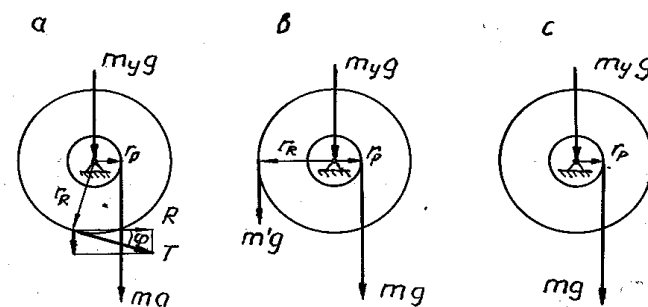


Рисунок 2 Схема буксировочного устройства и его тарировки

где f - коэффициент трения качения (приведенное плечо нагрузки на подшипник, м).

Следовательно, для вычисления R , кроме φ , необходимо располагать еще значением f .

Для определения f можно воспользоваться либо схемой рисунка 2б, либо схемой рисунка 2с.

В схеме 2б используется дополнительный груз m' , вес которого имитирует действие силы T . Опыт состоит в том, что при заданном m , достаточном для вращения шкива, величина m' увеличивается до тех пор, пока вращение шкива не прекратится.

Теперь нагрузка на подшипник равна

$$g(m + m' + m_y),$$

а вращающий момент $mgr_P - m^l gr_R$
следовательно, по схеме 2b можно получить

$$f = \frac{mr_P - m^l r_R}{m + m^l + m_y}.$$

По схеме 2с испытания ведутся с грузом m , вращающим шкив, при уменьшении груза до полной остановки вращения

Значение f находится как

$$f = \frac{mr_P}{m + m_y}.$$

Использование обеих схем 2b и 2с позволит оценить влияние на значение f абсолютной величины нагрузки на подшипник и, если оно существенно – учесть его в расчетах.

После того, как f определено, используя (1) можно получить R как решение уравнения

$$\begin{aligned} R^2 \left[\frac{r_R^2}{\cos^2 \varphi} - f^2 (l + tg^2 \varphi) \right] + \\ + R \left[-2mgr_P r_R \frac{l}{\cos \varphi} - 2f^2 g(m + m_y) l g \varphi \right] + \\ + [(mgr_P)^2 - f^2 g^2 (m + m_y)^2] = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

При малых φ выражение (3) упрощается и принимает вид

$$\begin{aligned} R^2 (r_R^2 - f^2) + R \left[-2mgr_P r_R - 2f^2 g(m + m_y) l \right] + \\ + [(mgr_P)^2 - f^2 g^2 (m + m_y)^2] = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Решения уравнений (3),(4) довольно громоздки, однако их можно упростить, если учесть, что обычно

$$\frac{R}{g(m + m_y)} \ll 1. \quad (5)$$

В этом случае (2) можно переписать в виде

$$mgr_P - \frac{Rr_R}{\cos \varphi} = fg(m + m_y) \sqrt{\left[l + \frac{Rtg\varphi}{g(m + m_y)} \right]^2 + \left(\frac{R}{g(m + m_y)} \right)^2},$$

при малых φ , получить

$$mgr_P - Rr_R = fg(m + m_y) \sqrt{l + \left(\frac{R}{g(m + m_y)} \right)^2},$$

откуда, с учетом (4), находим

$$mgr_P - Rr_R = fg(m + m_y)$$

$$R \approx \frac{mgr_P - fg(m + m_y)}{r_R} \quad (6)$$

и

$$\text{или} \quad R \approx \left[m \frac{r_P}{r_R} - \frac{f}{r_R} (m + m_y) \right] g. \quad (7)$$

1.2 Оценка обеспечения турбулентного режима при буксировочных испытаниях и определение формфактора

В соответствии с современными представлениями [6] коэффициент полного сопротивления модели без вступающих частей C_T может быть представлен как

$$C_T(Re, Fr) = C_V(Re) + C_W(Fr) \quad (8)$$

где C_V - коэффициент вязкостного сопротивления;

C_W - коэффициент волнового сопротивления, который и является искомой величиной при испытаниях модели.

Числа Re и Fr равны:

$$Re = \frac{vL}{\nu}; \quad Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}},$$

и, для данной модели, $Re = Fr \frac{\sqrt{gL^3}}{\nu}$ и $Fr = Re \frac{\nu}{\sqrt{gL^3}}$.

Следовательно

$$C_T = C_V(Re(Fr)) + C_W(Fr).$$

Разделив почленно это выражение на $C_{F0}(Re(Fr))$ - экстраполятор трения, - получим

$$\frac{C_T}{C_{F0}} = \frac{C_V}{C_{F0}} + \frac{C_W}{C_{F0}}.$$

В соответствии с гипотезой Хьюза, при полностью развитом турбулентном режиме обтекания $\frac{C_V}{C_{F0}} = const \neq F(Re, Fr)$

На доволновых режимах движения $\frac{C_W}{C_{F0}}$ пренебрежимо мало. Следо-