

УДК 639.2.081.117

## КРИТЕРИИ И МАСШТАБЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РЫБОЛОВСТВА

А.А. Недоступ

ФГБОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет»,  
Россия, 236022, г. Калининград, Советский проспект, 1  
E-mail: nedostup@klgtu.ru

Приводятся масштабы физического моделирования динамических процессов рыболовства.

*физическое моделирование, масштабы моделирования, критерии подобия, динамическое подобие*

### ВВЕДЕНИЕ

Решать задачи, возникающие в сложных инженерных системах, которыми являются орудия рыболовства, чисто аналитическим путем часто бывает необычайно трудно, и даже невозможно, из-за большого количества зависимостей и сложностей нелинейных характеристик некоторых из них. Иногда мы вообще не имеем математического описания задачи, так как исследуемое явление, протекающее с орудием рыболовства, настолько непростое, что для него пока еще нет удовлетворительной схемы и уравнений протекания процессов. Аналитическое решение или решение дифференциальных уравнений гидродинамики охватывает ограниченный круг задач. В частности, не всегда можно получить удовлетворительный результат и с помощью численных методов. Наконец, аналитическое решение все равно нуждается в проверке экспериментом с натурным орудием рыболовства или его моделью. Последнее проще, дешевле, удобнее при исследованиях влияния вариаций различных параметров элементов системы, схемы их соединения и других факторов, влияющих на протекание процессов гидродинамических, грунтодинамических и трибологических.

В процессе проектирования орудий рыболовства нередко возникает необходимость не только математического, но и физического моделирования. В таком случае необходимо, чтобы процессы, протекающие с моделями орудий рыболовства, соответствовали натурным. Это означает, что различные характеристики движения потоков жидкости (для пассивных орудий рыболовства) или орудий рыболовства (для активных орудий рыболовства), которые имеют место в модели и в реальной системе, должны описываться одинаковыми закономерностями, хотя их численные значения могут существенно различаться. В натурной модели они меньше (как правило) или больше (встречается реже), чем в действительности. Необходимо иметь критерии, которые позволяли ли бы «масштабировать» реальную систему. Эти критерии устанавливаются в теории подобия.

Гидродинамическое подобие - это подобие потоков несжимаемой жидкости, включающее в себя подобие геометрическое, кинематическое и динамическое [1]. В потоках жидкостей обычно действуют разные силы - давления, вязкого трения, тяжести, инерционные силы. Соблюдение пропорциональности всех сил, действующих в потоке, означает полное гидродинамическое подобие. На практике оно достигается редко, поэтому обычно приходится ограничиваться частичным (неполным) гидродинамическим подобием, при котором имеется пропорциональность лишь основных сил.

Орудия рыболовства имеют формы, значительно более сложные, чем те, которые доступны для теоретического изучения, и изменяемые в процессе эксплуатации: ваера, траловые доски, гидродинамические щитки, кухтыли, бобинцы, гидродинамические катушки, поплавки и др. В основном орудия рыболовства представляют собой сложные инженерные сооружения, состоящие из набора элементов и сети. Причем сетная конструкция орудий рыболовства имеет несимметричные формы. Все эти обстоятельства настолько усложняют силовое взаимодействие орудия рыболовства с водой, что ограничиться средствами теоретического анализа при проектировании и расчете не представляется возможным. Поэтому основное значение здесь приобретает эксперимент. Однако для того чтобы он успешно решал поставленную задачу, его постановка и обработка опытных данных должны базироваться на знании общих законов сопротивления среды, выяснение которых является делом теории.

Натурные объекты, с которыми имеет дело гидромеханика орудий рыболовства, - тралы, невода, яруса, сети, промысловые механизмы и др. - слишком сложны, велики по размерам и дорогостоящи для того, чтобы их можно было всякий раз испытывать только в натуральных условиях. Кроме того, необходимость в испытании различных вариантов каждого из перечисленных выше натуральных объектов рыболовства возникает тогда, когда самого объекта еще не существует, а именно в стадии его проектирования и расчета. Эти обстоятельства и привели к широкому использованию в гидромеханике моделей натуральных орудий рыболовства и испытанию их в лабораторных условиях [2], часто весьма далеких от натуральных. Эксперименты проводятся на специально создаваемых установках, моделирующих определенным образом исследуемые устройства и протекающие в них физические процессы. При физическом моделировании исследуемая модель обычно выполняется в меньшем масштабе, чем оригинал (натура), и воспроизводит изучаемое явление с сохранением его физической природы.

Большое практическое значение приобрела теория физического моделирования, т.е. раздел гидродинамики, разрабатывающий способы определения гидродинамических коэффициентов для натуральных орудий рыболовства путем испытания моделей. Модель всегда должна быть геометрически подобна натурному орудию рыболовства, но так как она обычно имеет иные размеры, чем натурные орудия рыболовства, и может испытываться при иных скоростях и в другой среде, скажем в воздухе [3-6], то силовое взаимодействие со средой также будет иным, нежели у натурального объекта. Поэтому возникает стремление охарактеризовать силовое взаимодействие объекта и среды безразмерными комбинациями или величинами, которые не зависели бы от абсолютных размеров объекта, скорости его движения или скорости потока

жидкости, плотности среды, вязкости жидкости и других размерных величин. Такие безразмерные величины в гидродинамике называются гидродинамическими коэффициентами. Для проектирования и расчета натуральных орудий рыболовства весьма важно, чтобы гидродинамические коэффициенты, найденные опытным путем, были такими же, как у натуральных орудий рыболовства; только при этом условии можно применять гидродинамические коэффициенты, полученные на модели, к расчету натурального орудия рыболовства и, следовательно, только таким условием определяется ценность и точность эксперимента. Однако для того чтобы гидродинамические коэффициенты были одинаковы, недостаточно одного только геометрического подобия модели и природы. Необходимо соблюдение ряда дополнительных условий, которые являются условиями подобия явлений, возникающих при движении (обтекании) натуральных орудий рыболовства. Выяснение этих условий, которыми необходимо руководствоваться для правильной постановки эксперимента, составляет предмет специального раздела гидродинамики «Теория размерности и подобия».

Физическое моделирование - ответственная научная задача, имеющая общее принципиальное и познавательное значение, но его нужно рассматривать только как исходную базу для главной задачи. Последняя состоит в фактическом определении законов природы, в отыскании общих свойств и характеристик различных классов явлений, в разработке экспериментальных и теоретических методов исследования и разрешения различных проблем, наконец, в получении систематических материалов, приемов, правил и рекомендаций для решения конкретных практических задач [1]. Физическое моделирование возможно лишь при условии физического подобия модели и природы. Это означает, что в сходственные моменты времени и в сходственных точках пространства значения переменных величин, характеризующих поведение модели, пропорциональны значениям соответствующих величин природы. Коэффициент пропорциональности для каждой пары величин носит название масштабного коэффициента.

В настоящей статье приводятся масштабы физического моделирования динамических процессов рыболовства [7].

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Общий вид критерия подобия динамических процессов, протекающих с орудиями рыболовства, представлен в виде [7]

$$\frac{C_R C_l}{C_t^2 C_m C_w^2} = 1, \quad (1)$$

где  $C_R$  - силовой масштаб;  $C_l$  - масштаб геометрических характеристик;  $C_t$  - масштаб времени;  $C_m$  - масштаб массы;  $C_w$  - масштаб ускорения.

С учетом преобразований [7] определены основные масштабы моделирования:

- масштаб времен при условии  $F_o = \text{idem}$  ( $C_d = C_a$ ) и  $\rho = \text{idem}$

$$C_t = C_l^{\frac{5}{4}}, \quad (2)$$

- масштаб скорости

$$C_v = C_l^{\frac{1}{4}}, \quad (3)$$

- масштаб сил

$$C_R = C_l^{\frac{3}{2}}, \quad (4)$$

- масштаб ускорения

$$C_\omega = C_l^{-\frac{3}{2}}. \quad (5)$$

Рассмотрим критерий изгибной жесткости в индикаторном виде [2]

$$\frac{C_{EI}}{C_\rho C_l^4 C_v^2} = 1, \quad (6)$$

где  $C_{EI}$  - масштаб изгибной жесткости.

Примем  $C_\rho \approx 1$  или  $C_\rho = C_l^0$  (для воды), тогда с учетом масштаба  $C_v$  (3) определим масштаб изгибной жесткости:

$$C_{EI} = C_l^{\frac{14}{4}} = C_l^{\frac{7}{2}}. \quad (7)$$

Аналогично рассмотрим критерий упругости в индикаторном виде

$$\frac{C_R}{C_E C_l^2} = 1, \quad (8)$$

где  $C_E$  - масштаб упругости материала (среды).

С учетом масштаба скорости  $C_v$  (3) и силового масштаба  $C_R$  (4) определим масштаб упругости материала (среды)

$$C_E = C_l^{-\frac{1}{2}} = \frac{1}{\sqrt{C_l}}. \quad (9)$$

На основании (7) видно, что с уменьшением масштаба геометрических характеристик (линейного масштаба)  $C_l$  снижается масштаб изгибной жесткости  $C_{EI}$ , таким образом, необходимо для модели подбирать материалы с меньшей изгибной жесткостью  $EI$ . Формула (9) показывает, что с уменьшением масштаба  $C_l$  увеличивается масштаб упругости материала (среды)  $C_E$ .

С учетом (7) и (9) масштаб геометрического момента инерции  $C_I$  равен

$$C_I = \frac{C_{EI}}{C_E} = C_l^4. \quad (10)$$

С учетом критерия Эйлера

$$\frac{C_p}{C_\rho C_v^2} = 1, \quad (11)$$

определим масштаб давления для среды ( $C_\rho \approx 1$ ):

$$C_p = C_v^2 = C_l^{-\frac{1}{2}} = \frac{1}{\sqrt{C_l}}, \quad (12)$$

также можно получить масштаб давления  $C_p$  из формулы давления

$$p = \frac{R}{A}, \quad (13)$$

где  $R$  - сила;  $A$  - площадь.

Представим в индикаторном виде выражение (13):

$$C_p = \frac{C_R}{C_A} = \frac{1}{\sqrt{C_l}}, \quad (14)$$

где  $C_A$  - масштаб площади,

а затем критерий трения [8,9]:

$$\frac{C_v C_b C_p}{C_l C_p} = 1. \quad (15)$$

Подставим в (15) масштабы  $C_v$  (3),  $C_b$ ,  $C_p$  (14) и  $C_p \approx 1$ , получим

$$\frac{C_l^{-\frac{1}{4}} C_l^{\frac{3}{4}}}{C_l C_l^{-\frac{1}{2}}} = C_l^0 = 1$$

при условии  $C_b = C_l^{\frac{3}{4}}$  [7], что справедливо.

При физическом моделировании вращательных движений имеем критерий подобия

$$C_{\omega\delta} C_l \sqrt{\frac{C_p}{C_E}} = 1, \quad (16)$$

где  $C_{\omega\delta}$  - масштаб частоты вращения,  
и масштаб частоты вращения

$$C_{\omega\delta} = \frac{1}{C_l} \sqrt{\frac{C_E}{C_p}} \quad (17)$$

при условии (3.57) или  $C_E = C_l^{-1/2}$ , имеем

$$C_{\omega\delta} = C_l^{\frac{5}{4}}, \quad (18)$$

а так как частота вращения  $\omega_{\delta} = 1/t$ , то

$$C_{\omega\delta} = \frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_l^{\frac{5}{4}}} = C_l^{-\frac{5}{4}}, \quad (19)$$

что справедливо.

Представим закон Гука в виде [10]

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (20)$$

где  $\sigma$  - напряжение;  $\varepsilon$  - относительное удлинение.

Так как при физическом моделировании  $\varepsilon = idem$ , то масштаб касательных напряжений

$$C_{\sigma} = C_A = C_l^{-\frac{1}{2}}. \quad (21)$$

При этом масштаб  $C_{\sigma}$  можно определить и из выражения

$$C_{\sigma} = \frac{C_R}{C_A} = C_l^{\frac{3}{2}} C_l^{-2} = C_l^{-\frac{1}{2}}. \quad (22)$$

Представим потенциальную энергию в виде [11] (Михалев, 2010)

$$U = \frac{R^2 l}{2EA}, \quad (23)$$

или в индикаторном виде

$$C_U = \frac{C_R^2 C_l}{C_E C_A} = \frac{C_l^{\frac{6}{2}} C_l}{C_l^{-\frac{1}{2}} C_l^2} = C_l^{\frac{5}{2}}, \quad (24)$$

или масштаб потенциальной  $C_U$  и кинетической энергий  $C_{Tn}$  представим в виде

$$C_U = C_{Tn} = C_m C_v^2 = C_l^3 C_l^{-\frac{1}{2}} = C_l^{\frac{5}{2}}. \quad (25)$$

Запишем критерий подобия Вебера

$$We = \frac{\rho v^2 l}{\sigma_n}, \quad (26)$$

где  $\sigma_n = F/l$  - поверхностное натяжение.

Или в индикаторном виде критерий Вебера (26)

$$\frac{C_\rho C_v^2 C_l}{C_{\sigma n}} = 1, \quad (27)$$

где  $C_{\sigma n}$  - масштаб поверхностного натяжения.

Выразим выражение (27) через масштаб  $C_l$  ( $C_\rho=1$  - масштаб плотности воды):

$$\frac{C_l^{-\frac{1}{2}} C_l}{C_l^{\frac{1}{2}}} = C_l^0 = 1,$$

что справедливо.

В табл. 1 приведен перечень основных сил в механике жидкости, их отношение к силе инерции (или обратные величины) и соответствующие критерии (числа) подобия.

В табл. 2 указаны основные масштабы физических характеристик гидродинамических, грунтодинамических и трибологических процессов, протекающих с орудиями рыболовства при динамическом подобии.

На основании масштабов подобия динамических моделируются гидродинамические, грунтодинамические и трибологические процессы, протекающие с орудиями рыболовства.

*Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 11-08-00096-а.*

Таблица 1. Перечень основных сил в механике жидкости, их отношение к силе инерции (или обратные величины) и соответствующие критерии (числа) подобия

Table 1. A list of the major forces in fluid mechanics and their relation to the force of inertia (or reciprocals) and the corresponding criteria (number) of the similarity

Основные силы	Сила тяжести $F_g$	Сила давления $F_p$	Сила вязкости $F_\mu$	Сила поверхностного натяжения $F_{\sigma n}$	Сила упругости $F_E$
Сила инерции $F_i$	Критерий Фруда $\frac{F_i}{F_g} = \frac{v^2}{gl}$	Критерий Эйлера $\frac{F_p}{F_i} = \frac{p}{\rho v^2}$	Критерий Рейнольдса $\frac{F_i}{F_\mu} = \frac{vl}{\nu}$	Критерий Вебера $\frac{F_i}{F_\sigma} = \frac{\rho v^2 l}{\sigma_n}$	Критерий Коши $\frac{F_i}{F_E} = \frac{\rho v^2}{E}$
Сила вязкости $F_\mu$	Критерий Мошени $\frac{F_g}{F_\mu} = \frac{l^2 g}{\nu v}$	Критерий Стокса $\frac{F_p}{F_\mu} = \frac{pl}{\mu v}$	-	$\frac{F_\sigma}{F_\mu} = \frac{\sigma_n}{\mu v}$	$\frac{F_E}{F_\mu} = \frac{El}{\mu v}$
Сила давления $F_p$	$\frac{F_g}{F_p} = \frac{\rho l g}{p}$	-	Критерий Стокса $\frac{F_p}{F_\mu} = \frac{pl}{\mu v}$	$\frac{F_\sigma}{F_p} = \frac{\sigma_n}{\mu v}$	$\frac{F_E}{F_p} = \frac{E}{p}$
Сила поверхностного натяжения $F_{\sigma n}$	$\frac{F_g}{F_{\sigma n}} = \frac{\rho l^2 g}{\sigma_n}$	$\frac{F_\sigma}{F_p} = \frac{\sigma_n}{pl}$	$\frac{F_\sigma}{F_\mu} = \frac{\sigma_n}{\mu v}$	-	$\frac{F_E}{F_\sigma} = \frac{El}{\sigma_n}$
Сила упругости $F_E$	$\frac{F_g}{F_E} = \frac{\rho l g}{E}$	$\frac{F_E}{F_p} = \frac{E}{p}$	$\frac{F_E}{F_\mu} = \frac{El}{\mu v}$	$\frac{F_E}{F_\sigma} = \frac{El}{\sigma_n}$	-
Сила тяжести $F_g$	-	$\frac{F_g}{F_p} = \frac{\rho l g}{p}$	Критерий Мошени $\frac{F_g}{F_\mu} = \frac{l^2 g}{\nu v}$	$\frac{F_g}{F_\sigma} = \frac{\rho l^2 g}{\sigma_n}$	$\frac{F_g}{F_E} = \frac{\rho l g}{E}$

Таблица 2. Основные масштабы физических характеристик гидродинамических, грунтодинамических и трибологических процессов, протекающих с орудиями рыболовства при динамическом подобии

Table 2. The main scope of the physical characteristics of hydrodynamic, bottomdynamic and tribological processes with fishing gears during dynamic similarity

Масштабы физических характеристик		Преобразование через масштаб $C_l$
физические характеристики	обозначение	
Геометрический параметр (длина, высота, ширина и др.)	$C_l$	$C_l$
Геометрический параметр (площадь)	$C_A$	$C_l^2$
Геометрический параметр (объем)	$C_V$	$C_l^3$
Геометрический параметр (геометрический момент инерции)	$C_I$	$C_l^4$
Масса	$C_m$	$C_l^3$
Время	$C_t$	$C_l^{5/4}$
Скорость	$C_v$	$C_l^{-1/4}$
Сила	$C_R$	$C_l^{3/2}$
Ускорение	$C_w$	$C_l^{-3/2}$
Объемный вес	$C_\gamma$	$C_l^{-3/2}$
Момент (вращательный)	$C_{Mb}$	$C_l^{5/2}$
Плотность	$C_\rho$	1
Динамическая вязкость воды	$C_\mu$	$C_l^{3/4}$
Кинематическая вязкость воды	$C_\nu$	$C_l^{3/4}$
Изгибная жесткость	$C_{EI}$	$C_l^{7/2}$
Упругость материала	$C_E$	$C_l^{-1/2}$
Давление	$C_p$	$C_l^{-1/2}$
Частота оборотов	$C_{\omega б}$	$C_l^{-5/4}$
Частота колебаний	$C_f$	$C_l^{-5/4}$
Касательное напряжение	$C_\sigma$	$C_l^{-1/2}$
Потенциальная энергия	$C_U$	$C_l^{5/2}$
Кинематическая энергия	$C_{Tn}$	$C_l^{5/2}$
Поверхностное натяжение	$C_{\sigma n}$	$C_l^{1/2}$
Сдвиг грунта	$C_{\tau гр}$	$C_l^{-1/2}$
Связность грунта	$C_{C\omega}$	$C_l^{-1/2}$
Нормальная нагрузка	$C_{\sigma гр}$	$C_l^{-1/2}$
Мощность	$C_N$	$C_l^{5/4}$
Твердость	$C_{HB}$	$C_l^{-1/2}$
Угол	$C_\alpha = C_{\phi вн}$	1
Сплошность	$C_{Fo}$	1
Коэффициент сопротивления (распорной силы, боковой силы)	$C_k$	1
Коэффициент трения	$C_{\mu d}$	1
Относительное удлинение	$C_\varepsilon$	1



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Седов, Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. - М.: Наука, 1977. - 440 с.
2. Фридман, А.Л. Теория и проектирование орудий промышленного рыболовства / А.Л. Фридман. - М: Легкая и пищевая промышленность, 1981. - 327 с.
3. Баранов, Ф.И. Теория и расчет орудий рыболовства / Ф.И. Баранов. - М.: Пищепромиздат, 1948. - 436 с.
4. Баранов, Ф.И. Моделирование рыболовных орудий / Ф.И. Баранов // Сб. тр. Мосрыбвуза. - 1957. - Вып. VIII. - С. 127-132.
5. Фридман, А.Л. Теория и проектирование орудий промышленного рыболовства / А.Л. Фридман. - М: Легкая и пищевая промышленность, 1981. - 327 с.
6. Розенштейн, М.М. Механика орудий рыболовства / М.М. Розенштейн, А.А. Недоступ. – М.: - Моркнига, 2011. - 528 с.
7. Недоступ, А.А. Физическое моделирование гидродинамических процессов движения орудий рыболовства / А.А. Недоступ // Вестник Томского государственного университета. Сер. Математика и механика. - Томск. - №. 3(19). - 2012. - С. 55-67.
8. Хебда, М. Справочник по триботехнике: в 3 т. / М. Хебда, А.В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение. - 1989.- Т. 1. Теоретические основы. - 400 с.
9. Мамон, Л.И. Анализ процесса износа контактных торцевых уплотнений с применением теории подобия / Л.И. Мамон, О.А. Третьяков // Доклады пятой межвузовской конференции по физическому и математическому моделированию. Секция: Моделирование применительно к задачам механики, строительства и машиностроения. - М., 1968. - С. 166-169.
10. Варданян, Г.С. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности: учебник / Г.С. Варданян. - М.: Изд-во АСВ, 1995. - 568 с.
11. Михалев, М.А. Физическое моделирование гидравлических явлений: учеб. пособие / М.А. Михалев. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. - 2010. - 443 с.

## CRITERIA AND SCALES OF DYNAMIC SIMILARITY OF PHYSICAL PROCESSES IN FISHERIES

A.A. Nedostup

The article describes the scales of the physical modeling on fishing.

*physical modeling, scale modeling, similarity criteria, dynamical similarity*