

УДК. 639.2.081.117

А.А. Недоступ

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДВИЖЕНИЯ ОРУДИЙ РЫБОЛОВСТВА¹

Приводится вывод правил физического моделирования гидродинамических процессов движения орудий рыболовства. С использованием геометрических преобразований получена связь безразмерных характеристик гидродинамического процесса движения орудий рыболовства. На основании π -теоремы получены основные критерии подобия гидродинамических процессов движения орудий рыболовства. Обоснованы правила динамического подобия рыболовных орудий. Получены масштабы моделирования динамических процессов движения орудий рыболовства.

Ключевые слова: гидродинамические процессы, моделирование, правила подобия, орудия рыболовства.

При экспериментальном исследовании орудий рыболовства в статике необходимо воспользоваться правилами физического моделирования [1– 6].

Необходимо отметить, что все орудия рыболовства работают как в стационарных, так и в нестационарных режимах. Причем правила физического моделирования в статике не являются правилами моделирования динамических процессов, которые являются общими, а не частными правилами моделирования.

При выводе правил физического моделирования динамических процессов рыболовства (переходной режим траления, погружение кошелькового невода, выборка донного невода и др.) рассмотрим два подхода.

Первый подход. Рассмотрим изменение безразмерной силы натяжения χ в вае (урезе) при выборке орудия рыболовства (как пример) (рис. 1). Определим связь между безразмерными силовыми χ , геометрическими характеристиками λ и временем τ протекания динамических процессов для натурного орудия рыболовства и его модели [7, 8]. Процесс изменения безразмерных силовых и геометрических характеристик во времени можно представить как некоторую кривую ABC (рис. 1). Пусть безразмерная сила натяжения в вае (урезе или др.) χ и другие характеристики при выборке (травлении) орудия рыболовства изменяются по закону

$$\left. \begin{aligned} \tau &= r \sin \theta \cos j, \\ \lambda &= r \sin \theta \sin j, \\ \chi &= r \cos \theta, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

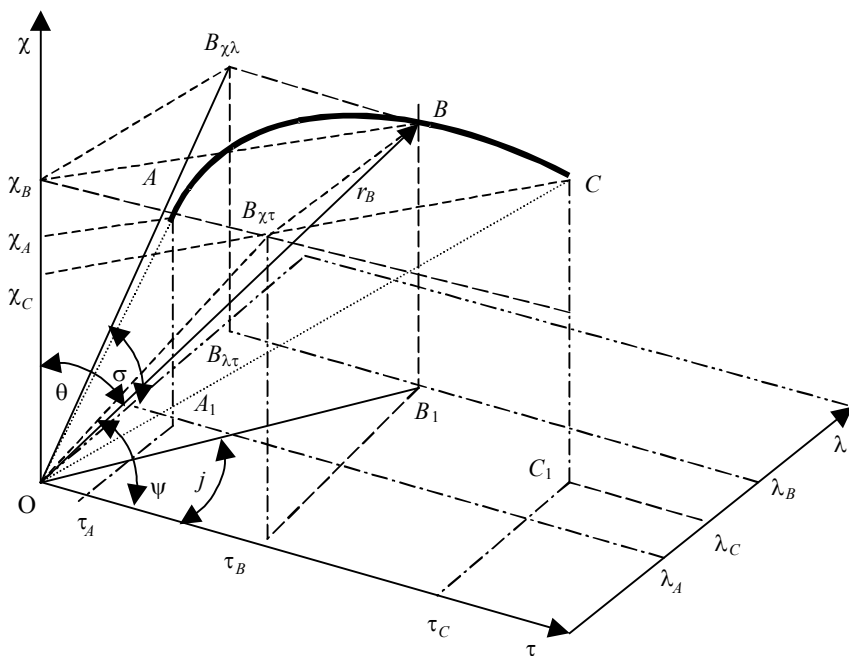
где r – безразмерный радиус; θ – $\angle \chi_B OB$; j – $\angle \tau_B OB$.

Отметим, что

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \psi &= \sin \psi / \cos \psi = \chi / \tau \\ \operatorname{tg} \sigma &= \sin \sigma / \cos \sigma = \chi / \lambda \\ \operatorname{tg} j &= \sin j / \cos j = \lambda / \tau \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где ψ – $\angle B_{\chi\tau} O \tau_B$; σ – $\angle B_{\chi\lambda} O \lambda_B$.

¹ Статья подготовлена в рамках выполнения гранта РФФИ № 11-08-00096-а.

Рис. 1. Зависимость вида $\chi = f(\lambda, \tau)$

Зная, что

$$\left. \begin{aligned} OB_1 &= \chi \operatorname{tg} \theta, \\ OB_1 &= \tau / \cos j, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

отсюда

$$\frac{\chi}{\tau} = \frac{1}{\operatorname{tg} \theta \cos j}. \quad (4)$$

Разделим левую и правую части выражения (4) на τ , тогда

$$\frac{\chi}{\tau^2} = \frac{\cos \theta}{\sin \theta \cos j} \frac{1}{r \sin \theta \cos j}. \quad (5)$$

Умножим левую и правую части выражения (5) на λ :

$$\frac{\chi \lambda}{\tau^2} = \frac{\cos \theta}{\sin \theta \cos j} \frac{r \sin \theta \sin j}{r \sin \theta \cos j} = \frac{\cos \theta \sin j}{\sin \theta \cos^2 j} = \frac{\operatorname{tg} j}{\operatorname{tg} \theta \cos j}. \quad (6)$$

Из (2) имеем

$$\frac{\chi \lambda}{\tau^2} = \operatorname{tg} \psi \operatorname{tg} j, \quad (7)$$

причем из (2) также $\operatorname{tg} \sigma = \operatorname{tg} \psi / \operatorname{tg} j$. Динамическое подобие не нарушается при обеспечении геометрического подобия: $j = \text{idem}$, $\theta = \text{idem}$, $\psi = \text{idem}$ и $\sigma = \text{idem}$, тогда

$$\frac{\chi_f \lambda_f}{\tau_f^2} = \frac{\chi_m \lambda_m}{\tau_m^2}, \quad (8)$$

где « f » – индекс натурального орудия рыболовства; « m » – индекс модели орудия рыболовства.

Безразмерные гидродинамические характеристики движения орудий рыболовства определяются соотношениями

$$\left. \begin{aligned} \chi &= \frac{T}{T_{\max}}, \\ \lambda &= \frac{S}{S_{\max}}, \\ \tau &= \frac{t}{t_{\max}}, \end{aligned} \right\}$$

где T – сила натяжения в текущий момент времени; S – длина ваера в текущий момент времени (любой геометрический параметр орудия рыболовства); t – текущее время; $T_{\max}$ – натяжение (сила) в конце процесса; $S_{\max}$ – длина ваера или др. (любой геометрический параметр орудия рыболовства в первоначальный момент времени) в конце процесса; $t_{\max}$ – суммарное время длительности процесса.

Значения характеристик с индексом (max) приняты как характеристики в конце процесса. Таким образом, в конце гидродинамического процесса движения орудия рыболовства: $\chi = 1$, $\lambda = 1$ и $\tau = 1$.

Тогда представим выражение (8) в виде

$$\frac{T_f S_f}{t_f^2} \frac{t_{\max f}^2}{T_{\max f} S_{\max f}} = \frac{T_m S_m}{t_m^2} \frac{t_{\max m}^2}{T_{\max m} S_{\max m}}. \quad (9)$$

Запишем выражение (9) в виде

$$\frac{t_{\max f}^2}{T_{\max f} S_{\max f}} = \frac{C_R C_l}{C_t^2} \frac{t_{\max m}^2}{T_{\max m} S_{\max m}}, \quad (10)$$

где C_t – масштаб времени.

Отметим, что если соблюдается $j = \text{idem}$, $\theta = \text{idem}$, $\psi = \text{idem}$ и $\sigma = \text{idem}$, или

$$\frac{t_{\max f}^2}{T_{\max f} S_{\max f}} = \frac{t_{\max m}^2}{T_{\max m} S_{\max m}},$$

тогда на основании (10) связь масштабов подобия можно записать в виде

$$\frac{C_R C_l}{C_t^2} = 1. \quad (11)$$

Второй подход. Определение критериев подобия на основании π -теоремы [9]. Метод «нулевых размерностей» (π -теорема) известен. Рассматриваются различные процессы (гидродинамические, грунтодинамические, трибологические и др.). Исследование критериев подобия рассматривались А.Л. Фридманом [4]. На основании π -теоремы получают критерии подобия гидродинамических процессов движения орудий рыболовства [1–6].

Приведем основные два критерия подобия Ne и Sh [4]:

$$\frac{C_R C_a}{C_k C_p C_d C_l^2 C_U^2} = 1, \quad (12)$$

где C_k – масштаб коэффициентов сопротивления (при моделировании орудия ры-

боловства как сложной системы: «ваера – оснастка – орудие рыболовства» принимается C_k – как коэффициент результирующей силы всей системы) [4]; C_p – масштаб плотности среды,

$$\frac{C_U C_t}{C_l} = 1. \quad (13)$$

Выразим из (13) масштаб скорости $C_U = C_l / C_t$ и подставим его в формулу (12), тогда

$$\frac{C_R C_a C_t^2}{C_k C_p C_d C_l^4} = 1. \quad (14)$$

При условии $F_o = \text{idem}$ – относительная площадь сети [4, 7, 8] ($C_d = C_a$, $C_k = 1$ – масштаб гидродинамических или грунтодинамических (трибологических) коэффициентов орудия рыболовства) и $p = \text{idem}$ ($C_p = 1$) запишем выражение (14) как

$$\frac{C_R C_t^2}{C_l^4} = 1. \quad (15)$$

Приведем критерий подобия динамического подобия в виде

$$\frac{C_m C_U}{C_t C_R} = 1, \quad (16)$$

где C_m – масштаб массы орудий рыболовства.

Приравняем (11) и (15)

$$\frac{C_R C_l}{C_t^2} = \frac{C_R C_t^2}{C_l^4} \leftrightarrow C_l^5 = C_t^4, \quad (17)$$

или
$$C_t = C_l^{\frac{5}{4}}. \quad (18)$$

С учетом (13), запишем выражение для определения масштаба скорости

$$C_U = C_l^{-\frac{1}{4}}. \quad (19)$$

Из (11) с учетом (13) определим силовой масштаб

$$C_R = C_l^{\frac{3}{2}}. \quad (20)$$

Из (11) с учетом (13) масштаб ускорения $C_\omega = C_l / C_t^2$, или

$$C_\omega = C_l^{-\frac{3}{2}}. \quad (21)$$

На рис. 2 изображена трехмерная зависимость $C_R = f(C_l, C_t)$. Необходимо отметить, что ошибки моделирования увеличиваются пропорционально уменьшению и увеличению масштаба C_l относительно $C_l = 1$.

С учетом (18) – (20) из (16) выразим масштаб массы

$$C_m = \frac{C_R C_t}{C_U} = C_l^3. \quad (22)$$

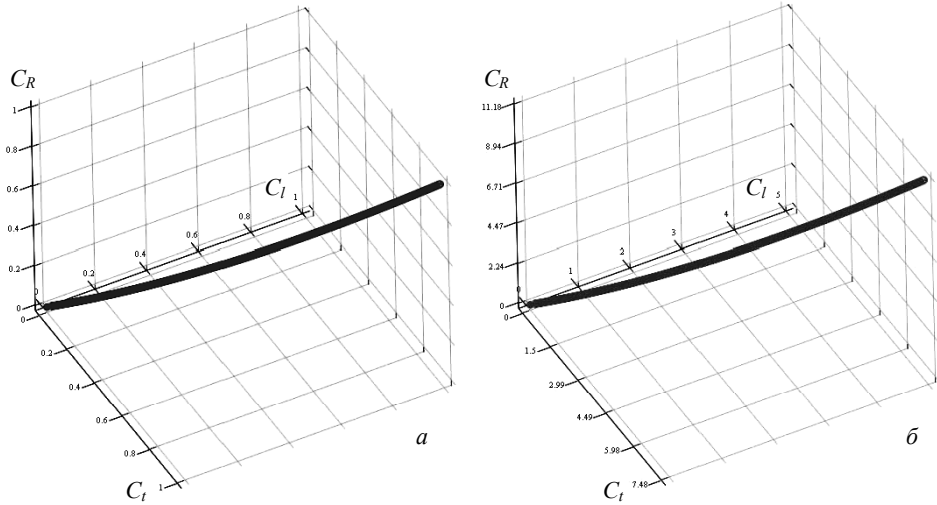


Рис. 2. График трехмерной зависимости $C_R = f(C_l, C_t)$: а – $0 \leq C_l \leq 1$; б – $0 \leq C_l \leq 5$

Запишем закон Архимеда для орудий рыболовства в виде

$$mg = q + \gamma_w V, \quad (23)$$

где m – масса орудия рыболовства; q – вес в воде орудия рыболовства; γ_w – объемный вес среды (воды); V – объем орудия рыболовства.

Определим масштаб сил (22)

$$C_R = \frac{m_m g}{m_f g} = \frac{m_m}{m_f} = \frac{q_m + \gamma_{wm} V_m}{q_f + \gamma_{wf} V_f} = C_l^3. \quad (24)$$

При этом из (20)

$$C_R = C_m = C_l^{3/2}, \quad (25)$$

что не сопоставимо с (24), однако масштаб гидростатических сил

$$C_R = \frac{m_m g - \gamma_{wm} V_m}{m_f g - \gamma_{wf} V_f} = C_l^{3/2},$$

где g – ускорение силы тяжести. Тогда выражение (24) следует записывать не как масштаб сил C_R , а масштаб массы C_m :

$$C_m = \frac{C_R q_f + \gamma_{wm} C_l^3 V_f}{q_f + \gamma_{wf} V_f} = C_l^3 \left(\frac{C_l^{-3/2} q_f + \gamma_{wm} V_f}{q_f + \gamma_{wf} V_f} \right), \quad (26)$$

Запишем выражение масштаба объемного веса орудия рыболовства C_γ [4] в виде

$$C_\gamma = \frac{\gamma_m}{\gamma_f} = \frac{C_l^{-3/2} q_f + \gamma_{wm} V_f}{q_f + \gamma_{wf} V_f}, \quad (27)$$

где γ_f – объемный вес материала, из которого изготовлено натурное орудие рыболовства; γ_m – объемный вес материала, из которого изготовлена модель орудия рыболовства.

Отметим, что $C_\gamma \neq 1$. Выражение (27) необходимо для выбора материала модели орудия рыболовства. Разделим его правую часть на q_f и представим в виде

$$C_\gamma = \frac{C_l^{-3/2} + \frac{\gamma_w V_f}{q_f}}{1 + \frac{\gamma_w V_f}{q_f}} = \frac{C_l^{-3/2} + A_f}{1 + A_f}, \tag{28}$$

где $A_f = \gamma_w V_f / q_f$ – отношение сил.

На рис. 3 приведен график зависимости $C_\gamma = f(C_l, A_f)$.

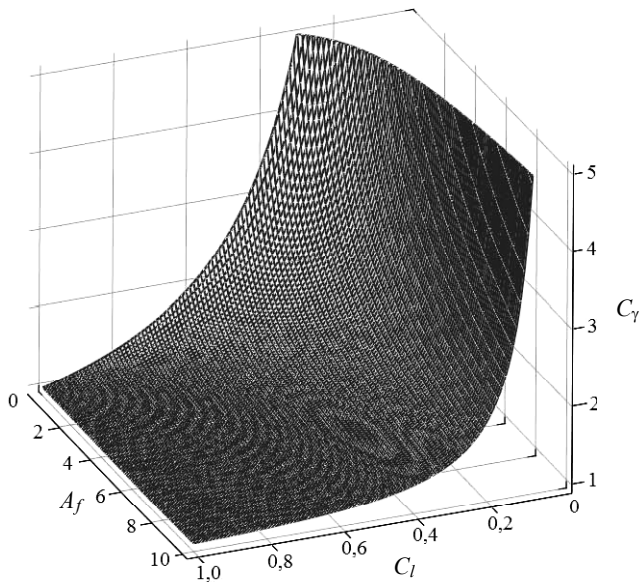


Рис. 3. График зависимости $C_\gamma = f(C_l, A_f)$

Для проверки на адекватность приведенных правил гидродинамического подобия движения орудий рыболовства были проведены опыты с шарами, имитирующими погружение загрузки нижней подборы кошелькового невода (табл. 1 и 3), моделями донных неводов [8] и моделью кошелькового невода. Проведено сравнение полученных результатов на основании математического и физического моделирования погружения шара в жидкость (воду) с учетом и без учета бокового течения. Характеристики шара-натуры представлены в табл. 1. Погружение шаров без бокового течения и с учетом бокового течения проводилось в гидроканале ЗАО «МариНПО» (г. Калининград).

Таблица 1

Характеристики шара-натуры

Диаметр шара D_f , мм	Вес в воде шара q_f , Н	Масса шара m , кг	Объемный вес шара γ_f , Н/м ³	Отношение сил A_f	Материал
80	0,058	0,274	10030	45,34	Пластик с загрузкой

Масштабы моделирования шара-модели с учетом (18) – (21) и (26), (28) представлены в табл. 2.

Характеристики шара-модели представлены в табл. 3.

Экспериментальные данные погружения шаров представлены в табл. 4 и 5.

Таблица 2

Масштабы моделирования

C_l	C_U	C_R	C_t	C_ω	C_γ	C_m
0,5	1,189	0,354	0,42	2,828	1,039	0,13

Таблица 3

Характеристики шара-модели

Диаметр шара D_f , мм	Вес в воде шара q_f , Н	Масса шара m , кг	Объемный вес шара γ_f , Н/м ³	Материал
40	0,021	0,036	10420	Пластик с загрузкой

Таблица 4

Экспериментальные данные (без учета течения)

Шар	Y , м	$C_l Y_f$, м	t , с	$C_l t_f$, с
Натура	2,12	–	8,5	–
Модель	1,06	1,06	3,5	3,6

Примечание. $Y_f = 2,12$ м – глубина гидроканала ЗАО «МариНПО».

Таблица 5

Экспериментальные данные (с учетом течения)

Шар	U , м/с	Y , м	X , м	$C_l Y_f$, м	$C_l X_f$, м	t , с	$C_l t_f$, с
Натура	0,14	2,12	1,18	–	–	10,0	–
Модель	0,16	1,06	0,6	1,06	0,59	4,1	4,2

Примечание. U – скорость течения воды в гидроканале ЗАО «МариНПО»; X – перемещение по оси OX шара.

На основании экспериментальных данных (см. табл. 4 и 5) при физическом моделировании погружения шара можно утверждать, что ошибка моделирования составляет по геометрическим параметрам 0 % и по времени – не более 3 %. Ошибку по моделированию гидродинамической силы определим на основании математического моделирования процесса погружения шара. Исходя из уравнения динамики погружения шара,

$$m \frac{d\vec{U}}{dt} = \vec{q} + \vec{F}_A + \vec{R} + \vec{F}_m, \quad (29)$$

где F_A – сила Архимеда; R – гидродинамическая сила; F_m – сила, обусловленная присоединенной массой.

При математическом моделировании погружения шара использовалась формула Озеена по определению коэффициента сопротивления [10]

$$c_x = \frac{24}{Re} (1 + 0,179\sqrt{Re} + 0,013 Re) \quad \text{при} \quad Re \leq 1478, \quad (30)$$

$$\text{Re} = DU / \nu , \tag{31}$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости воды.

Проведены численные вычисления зависимости глубины погружения (перемещения) шара от времени (рис. 4 и 7) и скорости погружения шара от времени (рис. 5 и 8) [11].

Отметим, что динамический коэффициент вязкости жидкости (воды) μ связан как

$$\frac{C_R}{C_l^2} = C_\mu \frac{C_U}{C_l} , \tag{32}$$

где C_μ – масштаб динамического коэффициента вязкости жидкости.

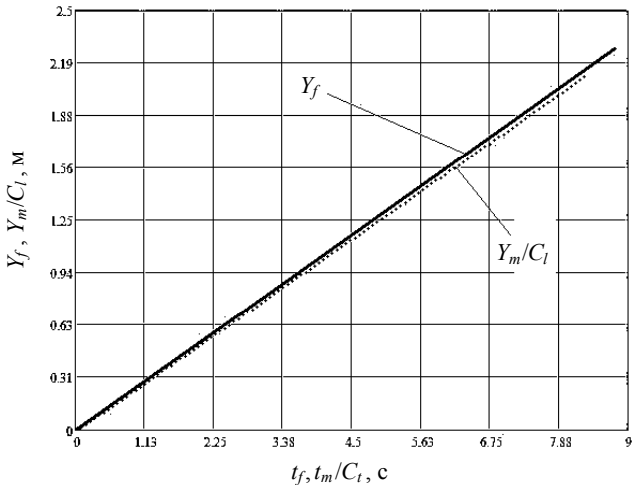


Рис. 4. Графики зависимостей $Y_f=f(t_f)$ и $Y_m/C_l=f(t_m/C_t)$ (без бокового течения)

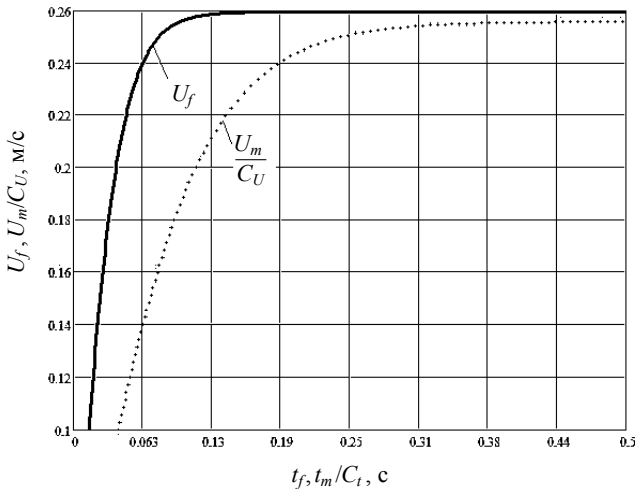


Рис. 5. Графики зависимостей $U_f=f(t_f)$ и $U_m/C_U=f(t_m/C_t)$ (без бокового течения)

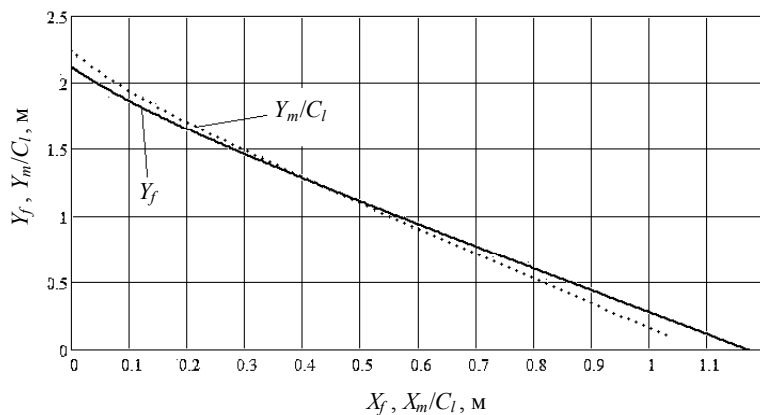


Рис. 6. Графики зависимостей $Y_f=f(X_f)$ и $Y_m/C_l=f(X_m/C_l)$ (с боковым течением)

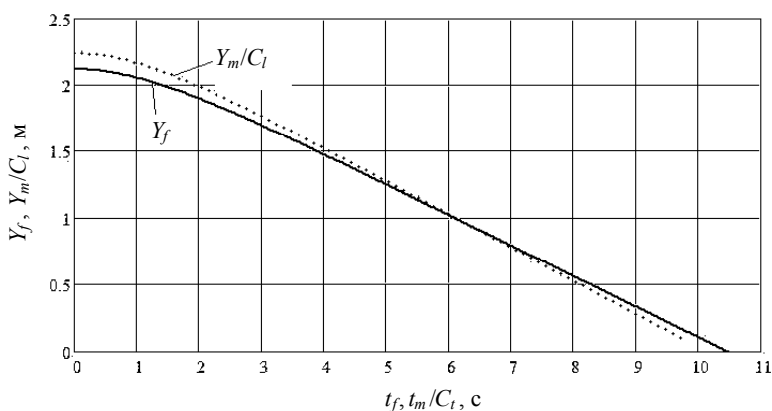


Рис. 7. Графики зависимостей $Y_f=f(t_f)$ и $Y_m/C_l=f(t_m/C_l)$ (с боковым течением)

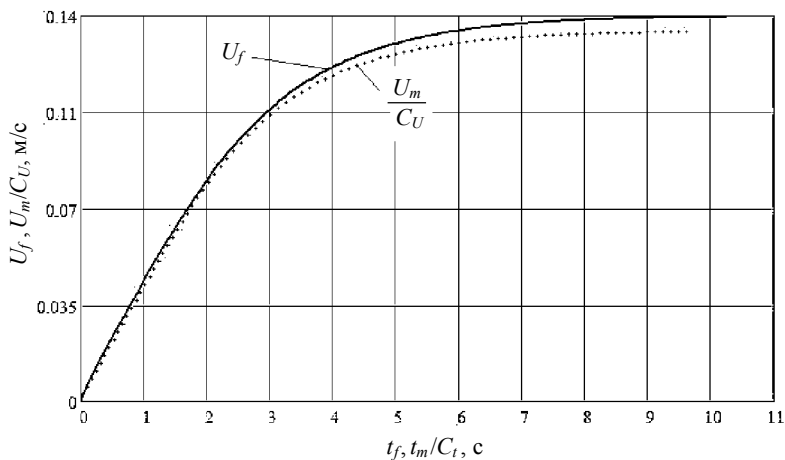


Рис. 8. Графики зависимостей $U_f=f(t_f)$ и $U_m/C_U=f(t_m/C_l)$ (с боковым течением)

Так как

$$C_{\mu} = C_v C_{\rho}, \quad (33)$$

где C_v – масштаб кинематического коэффициента вязкости жидкости, если $C_{\rho} \approx 1$ (для воды), тогда для моделирования в воде

$$C_{\mu} \approx C_v. \quad (34)$$

С учетом (18) – (21), (34) выразим из (32) масштаб C_v

$$C_{\mu} \approx C_v = C_l^{\frac{3}{4}}. \quad (35)$$

Масштабные эффекты определяются по формулам

$$M_t = \frac{t_f C_t}{t_m}, \quad (36)$$

$$M_v = \frac{U_f C_U}{U_m}, \quad (37)$$

$$M_R = \frac{R_f C_R}{R_m}, \quad (38)$$

где M_t – масштабный эффект времени протекания процесса; M_U – масштабный эффект по скорости; M_R – масштабный эффект по силе.

Отметим, что M_l – масштабный эффект по линейным характеристикам (глубине погружения шара) – возможно определить через отношение

$$M_l = M_t M_U. \quad (39)$$

Величины максимального масштабного эффекта при погружении шара приведены в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

Величины максимального масштабного эффекта при погружении шара

M_t	M_U	M_R	M_l
1,0	1,0 (участок на рис. 5 не учитывается)	0,98	1,0

Величина максимального значения масштабного эффекта M_R (38) составила не более 2 % при $C_l = 0,5$.

Для физическом моделировании выборки донного невода был выбран натурный донный невод 25,8/23,3 [12]. Дель для постройки аналога выбиралась с учетом условия равной сплошности. По характеристикам аналога натурального донного невода с учетом масштаба моделирования ($C_l = 0,5$), а также (18) – (21) и (26), (28) была изготовлена модель аналога натурального донного невода (с характеристиками см. табл. 7) [12].

Масштабы моделирования процесса выборки донного невода с учетом (18) – (21) и (26), (28) представлены в табл. 8.

Таблица 7

Характеристики донных неводов

Наименование характеристики	Аналог донного невода (натура)	Модель аналога донного невода (модель)
Площадь ниток, м ²	0,04	0,01
Сплошность	0,09	0,09
Средневзвешенный диаметр, мм	1	1
Вес в воде 1-го метра уреза, Н/м	0,11	0,078
Средневзвешенный шаг ячеи, мм	26	26
Длина уреза, м	30	15
Плавучесть верхней подборы невода, Н	2,7	0,955
Загрузка невода, Н	4	1,414
Скорость выборки, м/с	1	1,18

Таблица 8

Масштабы моделирования процесса выборки донного невода

C_l	C_U	C_R	C_t	C_ω	C_γ	C_m
0,5	1,189	0,354	0,42	2,828	1,039	0,13

При проведении экспериментов в опытовом бассейне КГТУ с аналогом донного невода и его моделью были получены графики зависимости $P = f(t)$, где P – показания тензодатчика, фиксирующего натяжение в урезе (рис. 9).

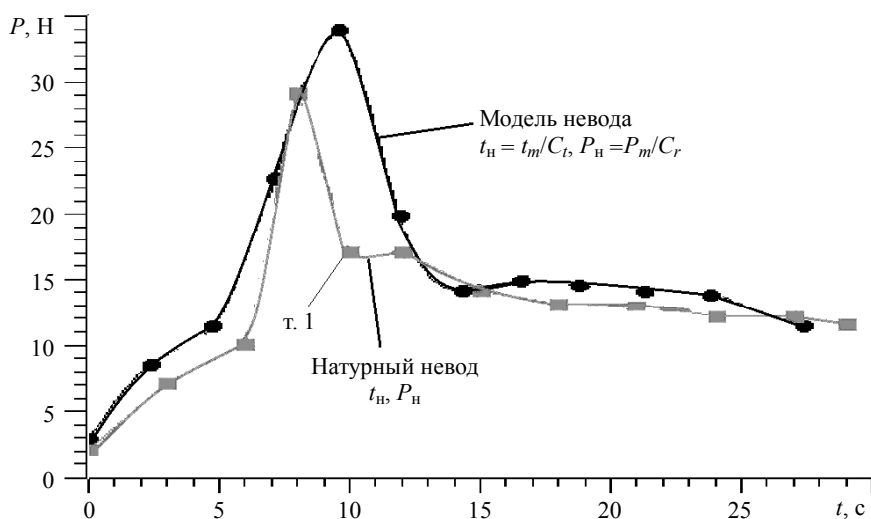


Рис. 9. Графики зависимостей $P = f(t)$ аналога донного невода (натуры) и его модели

На рис. 10 приведен трехмерный график зависимости безразмерной силы натяжения χ в урезе при выборке донного невода (рис. 1) в зависимости от безразмерных геометрических характеристик λ и безразмерного времени τ протекания динамических процессов для натурального донного невода и его модели [8, 12].

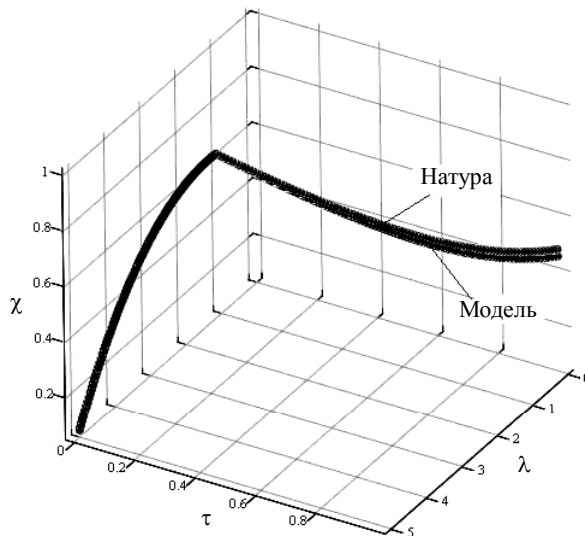


Рис. 10. График зависимости $\chi = f(\lambda, \tau)$ для донного невода

С учетом того, что масштабные эффекты моделирования возможно определить и через безразмерные комбинации, тогда

$$M_t = \frac{\tau_m}{\tau_f}; \tag{40}$$

$$M_l = \frac{\lambda_m}{\lambda_f}; \tag{41}$$

$$M_R = \frac{\chi_m}{\chi_f}. \tag{42}$$

Величины максимального масштабного эффекта при выборке донного невода приведены в табл. 9.

Таблица 9

Величины максимального масштабного эффекта при выборке донного невода

M_t	M_l	M_R	M_I
0,99	0,99	0,85 (т. 1 на рис. 9 не учитывается)	0,98

В результате проведенных экспериментов по моделированию физических процессов при выборке донного невода ошибка составила 15 % за исключением т. 1 (см. рис. 9).

Заключение

Правила физического моделирования (18) – (21) и (26), (28) обеспечивают моделирование гидродинамических процессов орудий рыболовства.

Величина максимального значения масштабного эффекта M_R при погружении шара составила 2 % при $C_l = 0,5$. В результате проведенных экспериментов по моделированию физических процессов при выборке донного невода ошибка составила не более 15 % при $C_l = 0,5$.

Полученные результаты свидетельствуют об увеличении ошибок физического моделирования гидродинамических процессов орудий рыболовства в условиях: $0 \leq C_l \leq 1$ и $1 \leq C_l \leq \infty$.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Tauti M.* A relation between experiments on model and on full scale of fishing net // *Nippon Suisan Gakkaishi* 1934; 3: p. 171–177.
2. *Dickson W.* The use of model nets as a method of developing trawling gear // *Modern Fishing Gear of the World*. London: Fishing News Ltd., 1959.
3. *Christensen B.A.* Hydrodynamic modelling of nets and trawls // *IEEE OCEAN'75*. 1975. P. 484–490.
4. *Фридман А.Л.* Теория и проектирование орудий промышленного рыболовства. М., 1981. 327 с.
5. *O'Neill F.G.* Small-scale modelling rules of trawl nets // *Fish. Res.* 1993. V. 18. P. 173–185.
6. *Hu F., Matuda K., Tokai T.* Similarity laws and modeling rules for fishing nets. Dynamic numerical simulation // *Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems*. DEMaT 1999. 2000. P. 137–149.
7. *Недоступ А.А.* Обоснование правил физического моделирования динамических процессов орудий рыболовства // Сб. тез. докл. VII Международной научной конференции «Инновации в науке и образовании – 2009». Калининград: КГТУ, 2009. С. 160–164.
8. *Nedostup A.A., Belyh A.V.* Method of calculation of force characteristics The Danish seine // 9th International workshop – Contributions on the Theory of Fishing Gears and Related Marine Systems DEMAT 2009. V. 6. 2010. Japan. Nara. Kinki. P. 283–293.
9. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. М.: ГИТТЛ, 1957. 375 с.
10. *Ламб Г.* Гидромеханика. М.: Гостехиздат, 1947. 928 с.
11. *Наумов В.А.* Механика движения неоднородных сред. Калининград: Изд-во ФГОУ ВПО «КГТУ», 2005. 125 с.
12. *Недоступ А.А., Бельх А.В.* Моделирование физических процессов при выборке донного невода якорным способом // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РСФСР Баранова Федора Ильича. Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2011. С. 293–298.

Статья поступила 07.10.2011 г.

Nedostup A.A. PHYSICAL MODELING OF HYDRODYNAMIC PROCESSES OF FISHING GEAR MOTION. Rules for physical modeling of hydrodynamic processes in the motion of fishing gears are deduced. Based on geometrical transformations, the connection between dimensionless characteristics of the hydrodynamic process of fishing gear motion is obtained. Using the π -theorem, the main similarity criteria for hydrodynamic processes of fishing gear motion are found. Rules of dynamic similarity of fishing gears are justified. Modeling scales for dynamic processes of fishing gear motion are obtained.

Keywords: hydrodynamic processes, modeling, similarity rules, fishing gears

NEDOSTUP Aleksandr Alekseevich (Kaliningrad State Technical University)
E-mail: nedostup@klgtu.ru