

УДК 639.2.081.001

Л.А. Габрюк¹, В.И. Габрюк²

¹Морской государственный университет имени адм. Г.И. Невельского,
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а

²Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ЯРУСНОЙ СИСТЕМЫ

Приведены результаты исследования погружения объектов ярусной системы в покоящейся жидкости, выполненные на базе разработанных авторами новых математических моделей и компьютерных программ. Определено время погружения основных элементов горизонтального яруса: якоря, каната и системы «якорь-канат».

Ключевые слова: канат, якорь, погружение, ярус, система с переменной массой.

L.A. Gabruk, V.I. Gabruk

RESEARCH OF IMMERSING OF OBJECTS LONGLINE SYSTEM

Results of research of immersing of objects longline system in the based liquid, executed on the basis of the new mathematical models developed by authors and computer programs are resulted. Time of immersing of basic elements of a horizontal circle is certain: anchors, a rope and system «anchor-rope».

Key words: rope, anchor, immersing, longline, systems with variable mass.

Введение

Задача определения времени погружения орудия рыболовства на заданную глубину при его выметке имеет большое практическое значение. На актуальность данной работы для ярусов указывал ведущий специалист ярусного лова ВНИРО Н.В. Кокорин (1994).

Решением этой задачи для разных орудий рыболовства занимались:

- 1) кошельковый невод (Губенко, 1934; Баранов, 1940; Андреев, 1970; Ионас, 1964; Кручинин, 2006, 2007 и другие исследователи);
- 2) ярус (Кокорин, 1994; Артюхин и др, 2008; Сеславинский, Аверков, 2010).

Материалы и методы

Используя динамику тела переменной массы (Бутенин и др., 1971), выполнено моделирование погружения якоря на заданную глубину с закрепленным к нему канатом.

Проверена адекватность полученных моделей на экспериментальном материале погружения элементов яруса (Артюхин и др, 2008; Сеславинский и др., 2010).

Основными объектами исследования в данной работе являются элементы яруса: якорь, канат и система «якорь-канат».

В работе используются следующие положения:

1. Гидродинамические коэффициенты канатов и цилиндров зависят от материала тела и числа Рейнольдса Re (Габрюк В.И., 2011).
2. Re (Габрюк В.И., 2011).
3. При $Re > 10^3$ гидродинамические коэффициенты канатов не зависят от числа Рейнольдса, т.е. имеет место автомодельность по Re (Ионас В.А., 1964; Габрюк В.И., 2011).
4. В силу того, что при погружении якоря число $Re > 10^3$ достигается в течение первых нескольких секунд, весь процесс погружения рассматривается как автомодельный по Re .

Эксперименты (Артюхин и др., 2008; Сеславинский и др., 2010) показали:

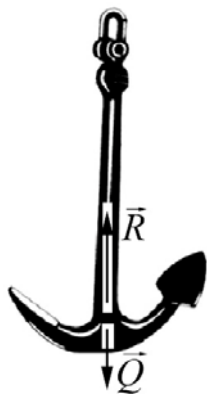
1. Время погружения яруса (как и отдельных его элементов) зависит от их веса в воде и гидродинамических коэффициентов.
2. Средняя скорость погружения якоря составляет 1,4 м/с.
3. Время погружения яруса на глубину до 300 м составляет 10-15 мин.

Результаты и их обсуждение

Решение задачи осуществляется в три этапа. На первом этапе исследуется погружение отдельного якоря; на втором – погружение каната, а на третьем – погружение системы «якорь- канат».

На рис. 1 показаны силы, действующие на якорь при его погружении.

Так как якорь движется поступательно, то он рассматривается как материальная точка. Уравнение движения якоря имеет вид



$$M_a \frac{dV}{dt} = Q_a - R_a \Rightarrow \frac{dV}{dt} = k_w^a g - \frac{0,5C_r^a \rho V^2 S_a}{M_a}, \quad (1)$$

где M_a – масса якоря; V – скорость якоря; $Q_a = k_w^a M_a g$ – вес якоря в воде; k_w^a – коэффициент веса якоря в воде; $R_a = 0,5C_r^k \rho V^2 S_a$ – гидродинамическая сила; C_r^k – коэффициент гидродинамической силы якоря; ρ – плотность морской воды; S_a – характерная площадь якоря.

Рис. 1. Силы, действующие на якорь при его погружении
Fig. 1. Forces, acting on anchor under his submersion

Для уравнения (1) решается задача Коши. Начальные условия имеют вид $t_0 = 0$ (момент начала движения); $V(t_0) = V_0$ (начальная скорость); $z(t_0) = z_0$ (начальная глубина); T - время окончания погружения якоря.

Уравнение (1) запишем в форме

$$\frac{dV}{dt} = b(a^2 - V^2), \quad (2)$$

где $a^2 = \frac{k_w^a \cdot g}{b}$; $b = \frac{0,5C_r^a \cdot \rho \cdot S_a}{M}$; $a > 0$, $b > 0$.

Решая уравнения (2), находим скорость погружения якоря:

$$V(t) = \frac{a[(a + V_0)e^{2abt} - (a - V_0)]}{(a - V_0) + (a + V_0)e^{2abt}} = \frac{a[a \cdot sh(abt) + V_0 \cdot ch(abt)]}{a \cdot ch(abt) + V_0 \cdot sh(abt)}. \quad (3)$$

Формула (3) справедлива при $0 \leq V(t) \leq a$, $t \leq T$.

При начальной скорости якоря, равной нулю, формула (3) принимает вид

$$V(t) = a \cdot th(abt). \quad (4)$$

На рис. 2 приведены графики зависимости скорости погружения якоря от времени при следующих исходных данных: $C_r^a = 0.2$; $k_w^a = 0,67$ (бетон); $M_a = 45$ кг.

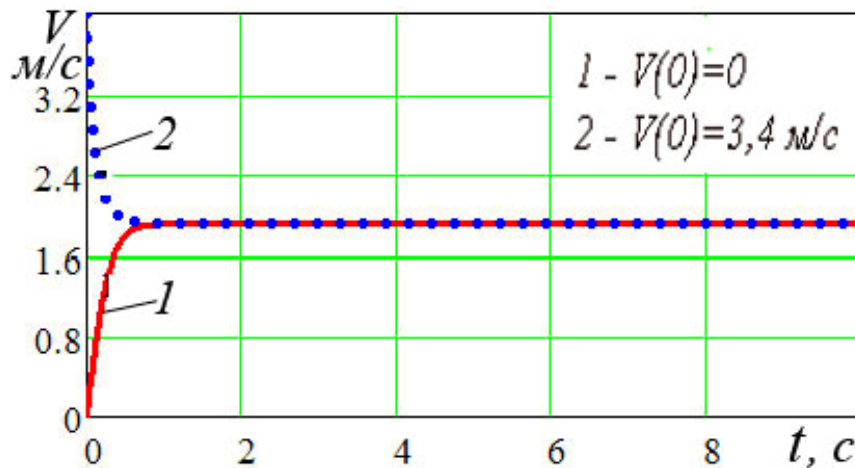


Рис. 2. Графики зависимости скорости погружения якоря от времени
 Fig. 2. Schedules of dependence of speed of immersing of an anchor from time

Как видно из рис. 2, начальная скорость якоря быстро гасится в воде и через несколько секунд достигает своего постоянного значения:

$$V_{\max} = a = \sqrt{k_w^a \cdot g \cdot \frac{M_a}{0,5 \cdot C_r^a \rho \cdot S_a}}. \quad (5)$$

Таким образом, скорость погружения якоря можно находить по формуле (4) при любых значениях начальной скорости.

Подставив $V = dz/dt$ в (4) и решая его, получим формулу для определения глубины погружения якоря z :

$$z(t) = \frac{1}{b} \ln \frac{a \cdot \operatorname{ch}(abt) + V_0 \cdot \operatorname{sh}(abt)}{a}. \quad (6)$$

При $V_0 = 0$ имеем:

$$Z(t) = \frac{1}{b} \ln \operatorname{ch}(abt). \quad (7)$$

Формула (7) удобна для практических расчетов глубины погружения якоря.

Рассмотрим погружения каната под действием собственного веса, когда якорь отсутствует. Масса каната, находящегося в воде, меняется и является функцией глубины погружения z . Запишем теорему о движении центра масс каната, погружающегося в воду, как тела переменной массы:

$$\frac{d(M_k \vec{V}_C)}{dt} = \frac{dM_k}{dt} \vec{V}_C + M_k \frac{d\vec{V}_C}{dt} = Q_k - R_k, \quad (8)$$

где $M_k = m \cdot z$ – масса каната; m – линейная плотность каната; $\vec{V}_C = dz_C/dt$ – скорость центра масс, погружённого в воду каната; $Q_k = k_w^k \cdot m \cdot z \cdot g$ – вес каната в воде; k_w^k – ко-

эффицент веса каната в воде; $R_k = 0,5C_r^k \rho \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 S_k$ – гидродинамическая сила каната;

C_r^k – коэффициент гидродинамической силы каната; S_k – характерная площадь каната.

Так как координата центра масс погружённого в воду каната равна $z_C = z/2$, то уравнение движения каната (8) примет вид

$$\frac{d^2z}{dt^2} = 2k_w^k \cdot g - \frac{C_r^k \cdot \rho \cdot D^k}{m} \cdot \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 - \frac{1}{z} \left(\frac{dz}{dt}\right)^2. \tag{9}$$

Используя соотношения

$$\frac{dz}{dt} = \dot{z}; \quad \frac{d^2z}{dt^2} = \ddot{z}; \quad (\dot{z})^2 = y; \quad \ddot{z} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dy}{dz} = \frac{1}{2} y', \tag{10}$$

запишем (9) в форме

$$y' = 4 \cdot k_w^k \cdot g - \frac{C_r^k \cdot \rho \cdot D_k}{2m} \cdot y - \frac{2}{(z)} y. \tag{11}$$

Решая уравнение (11) методом Бернулли, получим зависимость скорости погружения каната от глубины:

$$V(z) = \sqrt{\frac{4 \cdot k_w^k \cdot g}{z^2} \cdot \left[\left(\frac{z^2}{a_1} - \frac{2 \cdot z}{a_1^2} + \frac{2}{a_1^3} \right) \right]}, \tag{12}$$

где $a_1 = \frac{C_r^k \cdot \rho \cdot D^k}{m}$.

На рис. 3 приведены графики зависимости скорости погружения канатов из полиэстера ($k_w^k = 0,26$; $m = 0,075$; $d = 0,01$) и стали ($k_w^k = 0,87$; $m = 0,48$; $d = 0,01$) от глубины.

Из графика видно, что скорость каната из синтетического материала растёт быстро и через несколько секунд устанавливается постоянной.

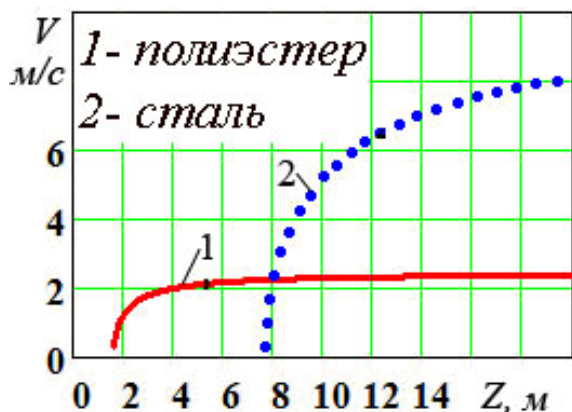


Рис. 3. Графики зависимости скорости погружения каната из различных материалов от глубины
 Fig. 3. The schedule of dependence of speed falling of ropes from various materials from depth of immersing

Учитывая, что $V = \frac{dz}{dt}$, после решения уравнения (12) получим выражение для определения времени погружения каната на заданную глубину:

$$t(z) = \frac{1}{\sqrt{4 \cdot k_w^k \cdot g}} \left[\sqrt{(a_2 \cdot z - 2)^2 - 2} + 2 \ln((a_2 \cdot z - 2) + \sqrt{(a_2 \cdot z - 2)^2 - 2}) \right], \quad (13)$$

где $a_2 = C_r^k \cdot \rho \cdot D^k / m$.

На рис. 4 приведен график зависимости времени погружения каната из полиэстера от глубины, рис. 4, а – в начале погружения, рис. 4, б – в течение всего периода.

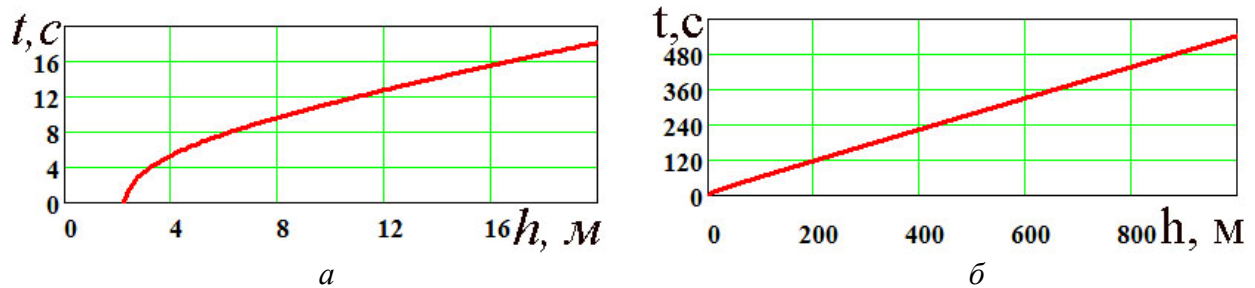


Рис. 4. График зависимости времени погружения каната от глубины
 Fig. 4. The schedule of dependence of time of immersing rope from depth

Ниже исследуется погружение системы «якорь – канат». Это система переменной массы. Согласно теореме о движении центра масс, имеем

$$\frac{d}{dt}(M_C \vec{V}_C) = \sum \vec{F}_k,$$

где $M_C = M_a + mz$ – масса системы; M_a – масса якоря; mz – масса каната.

Скорость центра масс системы «якорь – канат» определяется из формул

$$\vec{V}_c = \frac{dz_c}{dt}; \quad z_c = \frac{Mz + m \cdot z \cdot 0.5 \cdot z}{M + mz}.$$

Уравнение движение центра масс системы «якорь-канат»:

$$\frac{d}{dt}[(M + mz) \frac{d}{dt} \left(\frac{Mz + m \cdot z \cdot 0.5 \cdot z}{M + mz} \right)] = \vec{Q}_a + \vec{Q}_k - \vec{R}_a - \vec{R}_k, \quad (14)$$

где $Q_a = k_w^a \cdot M_a \cdot g$ – вес якоря в воде; $Q_k = k_w^k \cdot m \cdot g \cdot z$ – вес каната в воде; R_a, R_k – гидродинамические силы якоря и каната, определяемые по формулам

$$R_a = 0.5 \cdot C_r^a \cdot \rho \cdot S_a \cdot V^2 \cdot S_a = 0.5 \cdot C_r^a \cdot \rho \cdot \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 \cdot S_a;$$

$$R_k = 0,5 \cdot C_r^k \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S_k = 0,5 \cdot C_r^k \cdot \rho \cdot \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 \cdot S_k.$$

Запишем уравнение (14) в нормальной форме (форме Коши):

$$\frac{dV}{dt} = \frac{M_a + mz}{(M_a + mz)^2 - mz(M_a + 0.5mz)} \times \left\{ - \left[\frac{m^2 z (M_a + 0.5mz)}{(M_a + mz)^2} + 0.5 \cdot Ro \cdot C_r^a \cdot l \cdot D \cdot \pi + 0.5 \cdot Ro \cdot C_r^k \cdot l \cdot d \cdot z \right] (V)^2 + \right. \\ \left. + k_w^a \cdot M_a \cdot g + k_w^k \cdot m \cdot z \cdot g \right\} \tag{15}$$

Уравнение (15) решалось численно методом Рунге-Кутты. На рис. 5 приведены зависимости, полученные его численным решением, рис. 5, а – начало погружения, рис. 5, б – весь период погружения.

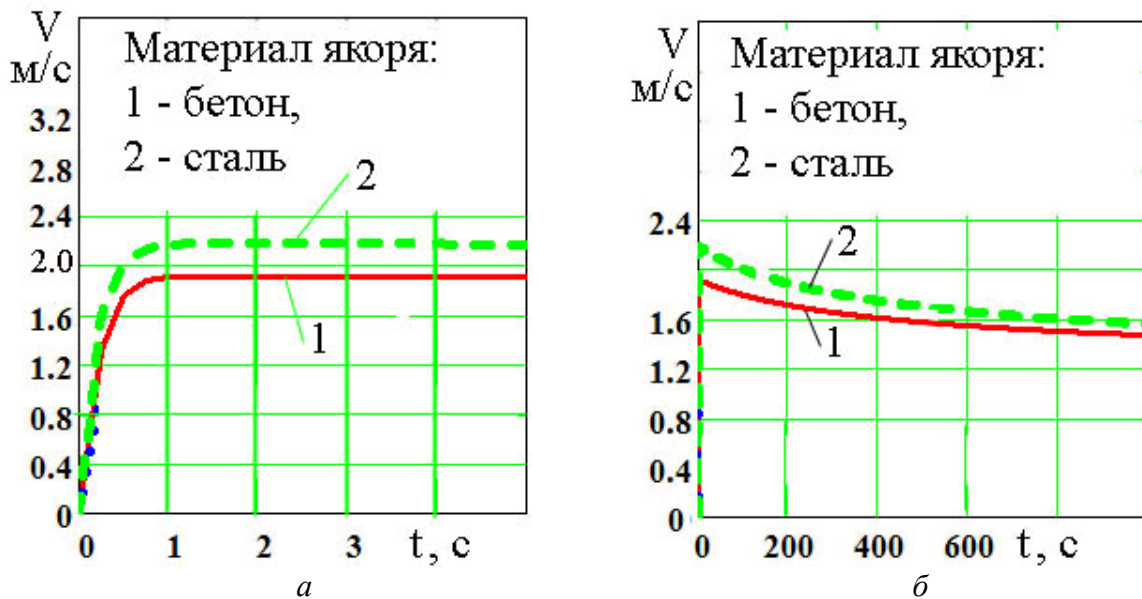


Рис. 5. Зависимости скорости (V , м/с) погружения канатов от времени
 Fig. 5. Dependences of speed (V , m/s) immersings of ropes from time

Для вычислительного эксперимента брали канат из полиэстера (диаметр $d = 0,01$ м, линейная плотность $m = 0,07$ кг/м, коэффициент веса в воде $k_w^k = 0,26$, гидродинамический коэффициент $C_r^k = 0,023$) и якорь (диаметр штока $D_a = 0,1$ м, масса $M_a = 45$ кг).

Рис. 6 демонстрирует зависимость времени погружения якоря с канатом от глубины: 1 – якорь (бетон); 2 – якорь (сталь).

Рис. 7 демонстрирует сравнительные характеристики зависимости скорости погружения сложной конструкции (якоря с канатом) (линия 1) и просто якоря (линия 2), определенного аналитическим способом со следующими характеристиками: $K_a^W = 0,67$; $Ca = 0,2$.

Рис. 6. Траектории зависимости времени погружения объекта (якоря с канатом) от глубины
 Fig. 6. Trajectories of dependence of time of immersing of object (an anchor with a rope) from depth

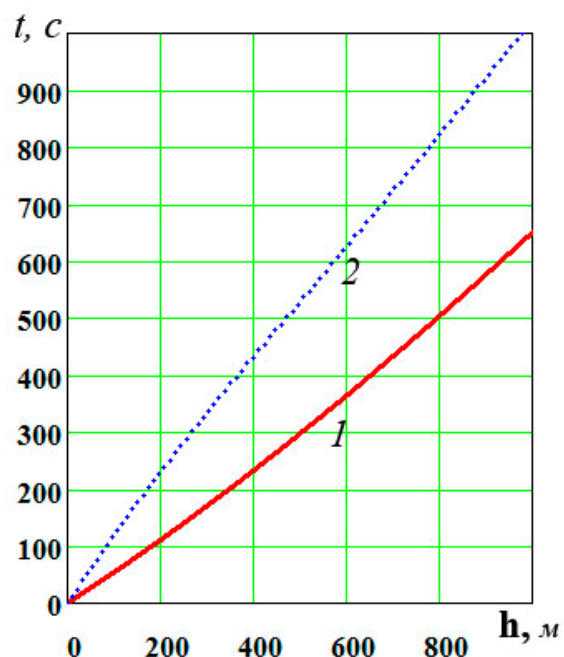
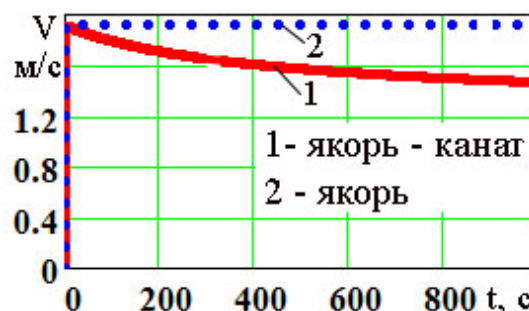


Рис. 7. Скорости погружения:
 1 – якоря с канатом; 2 – якоря
 Fig. 7. Speed of immersing:
 1 – anchor with rope; 2 – anchor



Представляет интерес сравнение приведенных исследований с данными, получаемыми по формуле Ф.И. Баранова (1948) для дели и по формуле В.А. Ионаса (1964). Формула Ф.И. Баранова имеет вид

$$t = 2,85h \sqrt{\frac{h}{q}}, \quad (16)$$

где q – нагрузка нижней подборы невода (вес грузил в воде), Н/м; h – глубина погружения, м.

При погружении уреза невода В.А. Ионас (1964) учитывал силу сопротивления, которая уравнивается силами веса невода в воде и силами инерции. В.А. Ионас предлагает время погружения уреза определять по формуле

$$t = Ah \sqrt{\frac{\rho \cdot d}{q}}, \quad (17)$$

где A – коэффициент пропорциональности; h – глубина погружения; ρ – плотность воды; d – диаметр уреза; q – вес уреза в воде.

На рис. 8 приведены графики зависимостей времени от глубины погружения, полученной по формуле Ф.И. Баранова, и объекта (якоря с канатом), рис. 8, а – начало погружения, рис. 8, б – полный период погружения. Первая траектория получена по формуле Ф.И. Баранова. Вторая траектория (точки) получена численным решением дифференциального уравнения (15) (канат – полиэстер, якорь бетон; $C_a = 0,2$). Третья траектория получена численным решением дифференциального уравнения (15) (канат – полиэстер, якорь сталь; коэффициент гидродинамического сопротивления $C_a = 0,5$). Четвертая траектория получена по формуле В.А. Ионаса (канат – полиэстер, якорь – бетон). Пятая траектория получена по формуле В.А. Ионаса (канат – полиэстер, якорь – сталь).

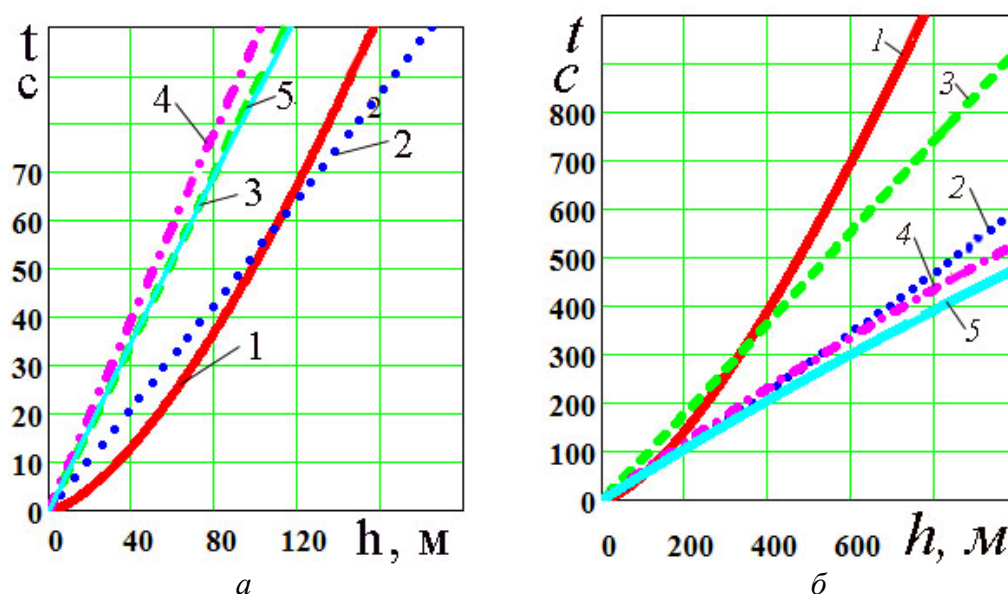


Рис. 8. Графики зависимостей времени погружения элементов рыболовных орудий от глубины, полученные различными исследователями

Fig. 8. Schedules of dependences of time from depth the immersings received by various researchers

Приведенный анализ свидетельствует:

- а) формула Ф.И. Баранова не учитывала силы гидродинамического сопротивления;
- б) результаты работы близки к исследованию В.А. Ионаса;
- в) исследования коррелируют с экспериментальными данными [3]. В эксперименте [3] средняя скорость погружения якоря равна 1,4 м/с – на рис. 7 средняя скорость погружения равна 1,5 м/с.

Предлагаемая в работе методика определения времени погружения объекта (якоря с канатом) дает более точные результаты по сравнению с методиками Ф.И. Баранова и В.А. Ионаса.

Выводы

Новизна предложенной работы в том, что в ней развиты теоретические исследования Ф.И. Баранова и В.А. Ионаса, позволяющие эффективнее решать практические задачи промышленного рыболовства: оценки времени погружения элементов ярусной, ловушечной и других рыболовных систем.

Практическое значение полученных результатов заключается в следующем:

1. Предложенные математические модели позволят более точно оценивать временные интервалы погружения элементов яруса.

2. Избежать затрат на установку отпугивающих птиц устройств за счет подбора материалов элементов яруса, позволяющих увеличивать скорость погружения системы.

3. Разработанные математические модели можно использовать при исследовании динамики погружения других орудий рыболовства, например, ловушечных порядков.

Список литературы

1. Андреев Н.Н. Проектирование кошельковых неводов. – М.: Пищ. пром-сть, 1970. – 278 с.

2. Артюхин Ю.Б., Винников А.В., Терентьев Д.А. Испытания хребтины, утяжеленной свинцовым сердечником, на ярусном промысле в прикамчатских водах // Изв. ТИНРО. – 2008. – Т. 154. – С. 276-294.

3. Баранов Ф.И. Теория и расчет орудий рыболовства. – М.: Пищепромиздат, 1948. – 436 с.

4. Габрюк В.И. Механика орудий рыболовства в математических моделях, алгоритмах, компьютерных программах. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2011. – 519 с.

5. Ионас В.А. Теоретический анализ движения донного невода // Тр. Калининградского технического института рыбной промышленности и хозяйства. – Калининград, 1964. – Вып. 17. – С. 94-105.

6. Кокорин Н.В. Лов рыбы ярусами. – М.: ВНИРО, 1994. – 421 с.

7. Кручинин О.Н. Тактика замета кошелькового невода и способы управления поведением рыб в зоне облова. – Владивосток: ТИНРО-Центр, 2006. – 127 с.

8. Кручинин О.Н. Обоснование технологий кошелькового лова, перспективных объектов промысла северо-западной части Тихого океана: дис. ... д-ра техн. наук. – Владивосток: ТИНРО-Центр, 2006. – 250 с.

9. Сеславинский В.И., Аверков В.Н. Обоснование орудий лова для промысла лососей, альтернативных жаберным сетям // Изв. ТИНРО. – 2010. – Т. 160. – С. 282-297.

Сведения об авторах: Габрюк Людмила Александровна, кандидат технических наук, доцент, e-mail: zdorova2003@rambler.ru; Габрюк Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, e-mail: gabrukvi@rambler.ru.