

УДК 639.2.081.001. 57.681.3

## МЕХАНИКА ПОГРУЖЕНИЯ БУЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЯРУСА

Габрюк Л.А.

*Морской государственный университет имени Г.И. Невельского, Владивосток,  
e-mail: zdorova2003@rambler.ru*

Сформулирована постановка задачи «Погружение буй вертикального крючкового яруса». Поставленная задача решена с использованием теорем динамики систем переменной массы. Разработана программа на базе программной среды MathCad-14 для расчета времени и скорости погружения буй. При моделировании использован якорь и хребтина, представляющая канат с равномерно распределенными поводцами, крючками и наживкой. Задача решается с учетом присоединенной массы глубоководного буй. Решение системы исходных дифференциальных уравнений получено с помощью численных методов. Установлено влияние сил инерции на формирование картины движения. Так как погружение буй в основном происходит в области автомодельности, то можно не учитывать зависимость гидродинамических коэффициентов от числа Рейнольдса. Полученные аналитические данные коррелируют с экспериментальными исследованиями.

**Ключевые слова:** глубоководный буй, хребтина, погружение яруса, присоединенная масса буй

## THE INVESTIGATION MECHANICAL A DIPPING OF THE BUOY VERTICAL LONGLINES

Gabryuk L.A.

*Sea state university of the name G.I. Neveliskiy, Vladivostok, e-mail: zdorova2003@rambler.ru*

Worded statement of the problem «of the dipping of the buoy vertical hook longlines». The deliver problem is solved with use the system speaker theorems of the variable mass. The De-signed program on the base of the programs ambience MathCad-14 for calculation of time and ve-locities of the submersion буй. At modeling is used the Mainline, presenting tightrope with evenly portioned hooks, hook and bait. The Task dares with provision for joined masses deep-water buoy. The Decision of the source differential equations is received by means of the numeri-cal methods. Will Installed infuse-ние of power to inertias on shaping the picture of the motion. Got analytical data коррелируют with experimental studies.

**Keywords:** deep-water buoy, mainline, submersion of the tier, joined mass buoy

В последние годы вопросам механики буйковых систем различных типов специалисты морских специальностей уделяют большое внимание. Проектирование подводных буйковых станций предполагает обеспечение их надежности, хороших морских качеств и удобного обслуживания.

Механику буйковых систем и их элементов исследовали как зарубежные исследователи (Г.О. Берто [1], Т. Ямамото и др. [7] (1974), Казарелла и др. [6]), так и наши ученые: (Л.И. Седов [5], В.И. Габрюк [2], Л.А. Габрюк [3]). В этих работах получены модели буйковых систем. Но механика погружения буйковой системы остаётся еще до конца не изученной. Эта задача представляет особый интерес для специалистов, изучающих глубоководные системы, так как на практике важно знать время погружения элементов системы на заданную глубину.

Вертикальные крючковые яруса являются типовыми представителями буйковых систем. Вертикальные крючковые яруса широко используются в рыболовстве многих стран для лова таких объектов, как кальмары, треска, терпуг и др.

**Цель работы** – исследование механики погружения буй вертикального яруса в покоящейся жидкости.

### Материалы и методы исследования

Исследование погружения глубоководного буй вертикального крючкового яруса представляет собой систему «якорь – хребтина – глубоководный буй», когда якорь и хребтина (канат) уже погружены.

Основные допущения, используемые при составлении дифференциальных уравнений: в модели рассматривается покоящаяся жидкость; погружение элементов вертикального яруса осуществляется по-ступательно; гидродинамические коэффициенты элементов яруса зависят от числа Рейнольдса; при расчете гидродинамических сил поплавки, кухтыли, буй рассматриваются как шары; грузы (якоря), канаты – как цилиндры; при  $10^2 \leq Re < 2 \cdot 10^5$  гидродинамические коэффициенты цилиндров не зависят от числа Рейнольдса, т.е. имеет место автомодельность по Re; при  $10^3 \leq Re < 5 \cdot 10^5$  коэффициенты гидродинамического сопротивления шаров не зависят от числа Рейнольдса, т.е. наблюдается автомодельность по Re; хребтина представляет канат с равномерно распределенными поводцами, крючками, наживкой.

Погружение глубоководного буй вертикального яруса происходит с начальной скоростью, равной скорости погружения якоря.

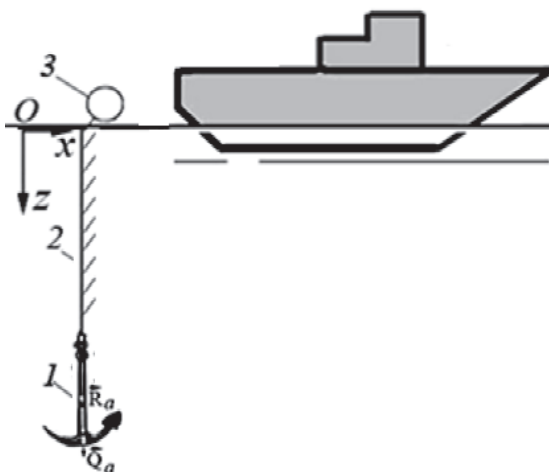


Рис. 1. Система «якорь – хребтина – глубоководный буй»:  
1 – якорь; 2 – хребтина;  
3 – глубоководный буй; 4 – буйлинь

При исследовании погружения яруса будем учитывать присоединенную массу буйа. Присоединенная масса, будучи добавленной к массе буйа, учитывает действие на него жидкости [4]. Особенностью присоединенной массы является то, что она зависит не только от геометрии тела, но и от направления движения. Присоединенную массу  $\mu$  погруженной части буйа (сферы) определим из формулы [5]:

$$\mu = \rho r_b^3 \int_0^\theta \cos^2 \delta \sin \delta d\delta = \frac{\pi}{3} \rho r_b^3 (1 - \cos^3 \theta). \quad (1)$$

Через  $\theta$  обозначен переменный угол между осью  $z$  и радиусом буйа  $r_b$ , проведенным в точку касания буйа с поверхностью воды. Глубина погружения буйа находится из выражения

$$h = r_b (1 - \cos \theta) \quad (0 < \theta < \pi). \quad (2)$$

Используя теорему об изменении количества движения механической системы «якорь – хребтина – глубоководный буй», с учетом присоединенной массы буйа составим векторное уравнение движения:

$$\frac{d[(M + \mu)\vec{V}]}{dt} = \sum \vec{F}_k^e.$$

Здесь  $M = M_a + M_{xr} + M_b$ ;  $\mu$  – присоединенная масса буйа;  $\sum \vec{F}_k^e$  – сумма внешних сил системы «якорь – хребтина – глубоководный буй».

Проецируем векторное уравнение на вертикальную ось  $z$ , получим:

$$(M + \mu) \left( \frac{dV}{dt} \right) + \left( \frac{d\mu}{dt} \right) V = Q_a + Q_{xr} + G_b - R_a - R_{xr} - t_p l_{xr}. \quad (3)$$

где  $Q_a, Q_{xr}$  – проекции веса в воде якоря и хребтины;  $R_a, R_{xr}$  – проекции гидродинамических сил сопротивления якоря и хребтины;  $z$  – текущая координата погружения буйа, равная глубине погружения буйа;  $G_b$  – проекция веса буйа на ось  $Z$ ;  $V$  – скорость погружения системы «якорь – хребтина – глубоководный буй»;  $t_p$  – проекция от натяжения поводца и наживки с крючком, приходящихся на единицу длины хребтины;  $l_{xr}$  – длина хребтины.

Формулы для вычислений (3) следующие:

$$Q_a = k_w^a M_a g;$$

$$Q_{xr} = k_w^k m_{xr} l_{xr} g;$$

$$G_b = M_b \cdot g;$$

$$R_{xr} = 0,5 \cdot C_{xr} \rho V^2 S_{xr}; \quad R_a = 0,5 \cdot C_a \rho V^2 S_a, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность воды;  $S_a$  – характерная площадь якоря;  $C_a, C_{xr}$  – коэффициенты гидродинамических сил якоря и хребтины;  $d_k$  – диаметр каната хребтины;  $m_{xr}$  – линейная плотность хребтины с вооружением;  $k_w^a, k_w^k$  – коэффициенты веса в воде якоря и хребтины.

Линейная плотность хребтины с вооружением вычисляется по формуле

$$m_{xr} = \frac{M_{xr}}{l_{xr}},$$

где  $M_{xr}$  – суммарная масса хребтины с вооружением, здесь  $n_{kp}^S$  – количество крючков в секции;  $m_k l_{xp}, m_p l_p, m_{kr+H}$  – массы: хребтины, крючкового поводца, наживки с крючком ( $l_p$  – длина крючкового поводца;  $m_k$  – линейная плотность хребтины;  $m_p$  – линейная плотность поводца).

Длина хребтины определяется по формуле

$$l_{xr} = 2l_{GK} + (n_{kp}^S - 1)l_{pp},$$

где  $l_{pp}$  – расстояние между двумя соседними поводцами. Длина голых концов хребтины равна  $l_{GK} = l_{pp}$ .

Выполняя дифференцирование уравнения (1), имеем:

$$\frac{d\mu}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\pi \rho}{3} r_b^3 (1 - \cos^3 \theta) \right) = \frac{\pi}{4} \rho d_b^2 \cos^2 \theta \frac{dh}{dt}, \quad (5)$$

где  $d_b$  – диаметр буйа;  $h$  – глубина погружения буйа.

Ввиду того, что в начальный момент погружения буй касается воды, глубина погружения буйа совпадает с его перемещением  $z$ , т.е.  $h = z$ . С учетом выражения (5) уравнение (3) примет вид

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{M_a + m l_{xr} + M_b + \mu} \times \left[ \left( k_w^a M_a + k_w^k m_k l_{xr} + M_b + n_{kp}^S (k_w^p m_p l_p + k_w^{kr+H} m_{kr+H}) \right) g - \left[ -0,5 \rho V^2 \left( C_a S_a + C_k d_k l_{xr} + n_{kp}^S (C_p S_p + C_{kr+H} S_{kr+H}) \right) + \frac{\pi}{2} d_b^2 \cos^2 \theta \right] \right]. \quad (6)$$

Уравнение (6) является дифференциальным уравнением погружения вертикального яруса при  $t \in (t_0, t_1)$ . Для решения уравнения (6) необходимо знать угол  $\theta$ . Скорость изменения угла  $\theta$  определяется как

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta}{dh} \frac{dh}{dt}$$

Из уравнения (2) получим  $\frac{d\theta}{dh} = \frac{1}{r_b \sin \theta}$ . Далее учи-

тывая, что  $h = z$  и  $\frac{dz}{dt} = V$ , имеем

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{r_b \sin \theta} \frac{dz}{dt}$$

или

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{V}{r_b \sin \theta} = \frac{2V}{d_b \sin \theta}, \quad 0 < \theta < \pi. \quad (7)$$

Уравнение (7) имеет особые точки при  $\theta = 0$  и  $\theta = \pi$ , так как при этих значениях  $\theta$  знаменатель дроби в (7) обращается в ноль.

### Результаты исследования и их обсуждение

В работе выполнено исследование характеристик погружения буйа вертикального яруса с использованием компьютерного эксперимента. Целью этого эксперимента было выявление влияния типа хребтины и влияния чисел Рейнольдса на время погружения буйа.

Компьютерный эксперимент заключался в расчете с помощью специально разработанной программы «Определение времени погружения буйа вертикального яруса» на языке программной среды MathCad-14. Решение задачи Коши для системы нелинейных дифференциальных уравнений (6), (7) осуществлялось численным методом Рунге – Кутты.

Начальные условия задачи Коши для системы погружения вертикального яруса приведены в табл. 1.

В компьютерном эксперименте использовали стандартную хребтину (линейная плотность 0,076 кг/м) из полиэстера диаметром 10 мм с рыбацким снаряжением. Длина одной секции хребтины равна  $l_{xr} = 100$  м. Линейная плотность хребтины с рыбацким снаряжением 0,099 кг/м.

Характеристика элементов вертикального яруса, используемых в компьютерном эксперименте, приведена в табл. 2.

На рис. 2 показана зависимость скорости погружения буйа из дюралюминия от времени с учетом и без учета зависимости  $C_{zv}$  от числа Рейнольдса (1 – без учета зависимости  $C_{zv}$  от числа Рейнольдса, 2 – с учетом этой зависимости) для буйев:

- а) диаметром 0,2 м;
- б) диаметром 0,3 м.

На графике время погружения буйа начинается после погружения хребтины с якорем. С увеличением диаметра буйа зависимость  $C_{zv}$  от числа Рейнольдса уменьшается.

Погружение буйа является частным случаем падения симметричного относительно оси  $Oz$  тела массы  $M_b$  в жидкость. На рис. 2 скорость буйа вначале быстро падает вследствие его удара о воду, один из факторов чего является то, что в момент касания с водой ( $t_0 = t_1$ ) буй имеет начальную скорость  $V = \dot{z}(t_0)$ .

Присоединенная масса влияет на картину погружения буйа в жидкость, присоединенная масса является переменной величиной и зависит от истории движения буйа (формула (1)).

Таблица 1

Параметры задачи Коши системы погружения буйа вертикального яруса

Время $t$		Скорость $V$		Угол $\theta$	
начальное	конечное	начальное	конечное	начальное	конечное
$t_0 = 0$	$t_k = t_1$	$v_0 = 0$	$v_k = v_1$	$\theta_0 = 0$	$\theta_k = \pi$

Примечание.  $t_1; v_1; \theta_k$  – время и скорость погружения, угол  $\theta$ .

Таблица 2

Характеристика элементов вертикального яруса

Элементы яруса	Коэффициент веса в воде	Гидродинамический коэффициент	Материал	Диаметр, м	Длина, м	Плотность, кг/м	Масса, кг
Якорь	0,870	0,800	Сталь	0,100	0,080		5,0
Глубоководный буй	-5,247	0,450	Дюралюминий	0,200		0,687	
Хребтина	0,260	0,023	Полиэстер	0,010	100,0	0,076	

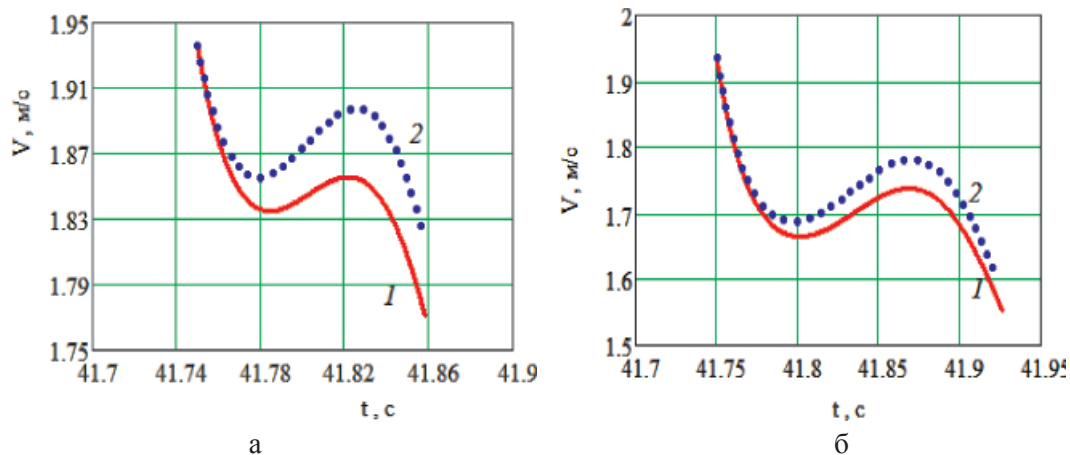


Рис. 2. Графики зависимости  $V(t)$  скорости погружения буйа:

а – диаметром 0,2 м; б – диаметром 0,3 м;

1 – без учета зависимости  $C_{zv}$  от числа Рейнольдса; 2 – с учетом этой зависимости

### Выводы

В представленной работе приведена математическая модель погружения буйа вертикального яруса. Алгоритм решения модели сведен к решению задач Коши для системы нелинейных дифференциальных уравнений.

Так как погружение буйа в основном происходит в области автомодельности, то можно не учитывать зависимость гидродинамических коэффициентов от числа Рейнольдса.

Присоединенная масса глубоководного буйа оказывает влияние на движение яруса, так как она имеет тот же порядок величины, что и собственная его масса. В работе на основе формулы Седова [5] получено выражение (1) для определения присоединенной массы погружающегося буйа.

Результаты данной работы могут использоваться в расчетах параметров как при постановке вертикальных ярусов, так и погружении буйковых систем, когда буй имеет начальную скорость, если линейную плотность хребтины, заменить на линейную плотность каната якорного линия.

### Список литературы

1. Берто Г.О. Океанические буйа: пер. с англ. – Л.: Судовое, 1979. – 215 с.
2. Габрюк В.И., Основы моделирования рыболовных систем. – Владивосток: Изд-во Дальрыбвтуза. 2008. – 560 с.
3. Габрюк Л.А. Динамика погружений основных объектов гибкой системы морского транспорта // Транспортное дело России. – 2013. – № 5(108). – С. 185–190.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука. 1978. – 320 с.

5. Седов Л.И. Механика сплошной среды. – Т 2. – М.: Наука. 1973. – 584 с.

6. Casarella M.J. A survey of Investigations on the Configuration and Motion of Cable Systems Under Hydrodynamic Loading / M.J. Casarella, M. Parsons // Marine Technology Society Journal. – 1970. – Vol.4, № 4.

7. Yamamoto T. Longitudinal Vibration in Taut Line Moorings // T. Yamamoto, C.E. Smith, J. Nath // Marine Technology Society Journal. – 1974. – Vol.8, № 5.

### References

1. Berto G.O. Okeanicheskie bui: per. s angl. L.: Sudovozhenie, 1979. 215 p.
2. Gabryuk V.I., Osnovy modelirovaniya rybolovnyh sistem. Vladivostok: Izd-vo Dalrybvтуza. 2008. 560 p.
3. Gabryuk L.A. Dinamika pogruzenij osnovnyh obektov gibkoj sistemy morskogo transporta // Transportnoe delo Rossii. 2013. no. 5(108). pp. 185–190.
4. Lojczanskiy L.G. Mehanika zhidkosti i gaza. M.: Nauka. 1978. 320 p.
5. Sedov L.I. Mehanika sploshnoj sredy. T 2. M.: Nauka. 1973. 584 p.
6. Casarella M.J. A survey of Investigations on the Configuration and Motion of Cable Systems Under Hydrodynamic Loading / M.J. Casarella, M. Parsons // Marine Technology Society Journal. 1970. Vol.4, no. 4.
7. Yamamoto T. Longitudinal Vibration in Taut Line Moorings // T. Yamamoto, C.E. Smith, J. Nath // Marine Technology Society Journal. 1974. Vol. 8, no. 5.

### Рецензенты:

Габрюк В.И., д.т.н., профессор кафедры «Промышленное рыболовство», Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, г. Владивосток;

Друзь И.Б., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая механика и сопротивление материалов», Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток.