

УДК 629.564.3: 629.58

DOI: 10.37890/jwt.vi82.579

## **Расчёты колебаний отдельных модулей буксируемой системы вблизи их равновесных положений**

**А.Л. Гусев**

*ORCID: 0009-0007-0922-6830*

**Е.А. Першин**

*ORCID: 0009-0009-7866-293X*

*Казанский национальный исследовательский технический университет имени*

*А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия*

**Аннотация.** Нормальные условия эксплуатации буксируемых систем определяются воздействием факторов, переменных по времени работы комплекса. Обеспечение лишь физико-механических свойств модулей буксируемой системы в общем случае не гарантирует успешного функционирования комплекса. В данной работе рассматриваются вопросы разработки буксируемых систем и связанные с их эксплуатацией колебания во время буксировки. На основе известных положений теоретической механики, теории колебаний и гидромеханики построены уравнения, описывающие колебания буксируемых систем. На примере показано, что решение предложенных уравнений позволяет выделить модуль, испытывающий наибольшее воздействие от качки судна-буксировщика и/или горизонтальной скорости движения в динамике. Полученные решения могут стать основой для внесения конструктивных изменений в буксируемую систему. Также предлагается способ определения скорости судовой лебёдки при погружении буксируемой системы. На примере показан рациональный выбор скорости и времени погружения буксируемой системы. Результаты проведенных исследований могут быть полезны разработчикам буксируемых систем.

**Ключевые слова:** гидродинамическое сопротивление, буксируемый подводный аппарат, отводитель, трос, буксировка, динамика движения

## **Calculations of vibrations of individual modules of a towed system near their equilibrium positions**

**Alexander L. Gusev**

*ORCID: 0009-0007-0922-6830*

**Evgeniy A. Pershin**

*ORCID: 0009-0009-7866-293X*

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI, Kazan,*

*Russia*

**Abstract.** Normal operating conditions of towed systems are determined by the impact of factors that vary over the operating time of the complex. Providing only the physical and mechanical properties of the towed system modules does not generally guarantee successful operation of the complex. This paper considers the development of towed systems and the oscillations associated with their operation during towing. Based on known provisions of theoretical mechanics, oscillation theory and hydromechanics, equations are constructed that describe the oscillations of towed systems. The example shows that the solution of the proposed equations allows one to select the module that experiences the greatest impact from the pitching of the towing vessel and/or horizontal speed of movement in dynamics. The obtained solutions can become the basis for making design changes to the towed system. A method for determining the speed of the ship's winch when immersing the towed system is

also proposed. The example shows a rational choice of the speed and time of immersion of the towed system. The results of the conducted research can be useful for developers of towed systems.

**Keywords:** hydrodynamic resistance, towed underwater vehicle, diverter, rope, towing, motion dynamics

### **Введение**

Для исследования Мирового океана применяются разнообразные необитаемые подводные системы. Обычно они представляют собой многозвенные комплексы, состоящих из заглубителя, одного или нескольких носителей исследовательской аппаратуры, например, акустических модулей и/или модулей носителей фото- и видеоаппаратуры.

Заглубитель кроме создания необходимой массы для доставки остальных элементов системы, имеющих нейтральную плавучесть, до рабочих глубин, также является носителем электронных компонентов, создающих помехи для исследовательской аппаратуры. Акустический модуль, обычно буксируемый за заглубителем и является носителем акустической аппаратуры. Фотомодуль в основном повторяет траекторию заглубителя, однако движется с ним параллельным курсом, на глубине не более 10 метров от дна.

Если для акустических модулей требования по удержанию в рабочем горизонте составляют десятки метров, что вполне достигается буксировкой вслед за заглубителем, то траектория движения фотомодуля должна достаточно точно повторять рельеф морского дна (ввиду плохой видимости на глубине). Поэтому конструктивно акустический модуль и фотомодуль отличаются. Акустический модуль — это массивный аппарат с возможностью незначительной корректировки траектории движения обычно за счёт рулевых поверхностей, а фотомодуль — лёгкий манёвренный аппарат с двигателями, позволяющими ему перемещаться во всех направлениях.

Колебания плохообтекаемых тел в потоке жидкости со скоростью соизмеримой или превышающей скорость потока приводят к возникновению дополнительной периодической силы сопротивления. Данную силу можно условно представить в виде двух составляющих: направленную вдоль потока и перпендикулярную к нему [1, 2, 6].

Амплитуда колебаний ходового конца троса заглубитель-судно в направлении касательной к буксирной линии предполагается известной. Дополнительные силы сопротивления, действующие на заглубитель, модули 1 и 2 определяются исходя из того, что колебания тросов в направлении нормальном к буксирным линиям являются «малыми». При этом для рассматриваемых режимов буксировки и конфигурации буксируемой системы длина буксирных линий намного превосходит расстояние, на которое распространяются по длине троса нормальные колебания, то есть колебания точек каждого троса вблизи модуля можно рассматривать изолированно [3, 8, 9].

Конфигурация буксируемой системы в равновесном положении представлена на рис. 1.

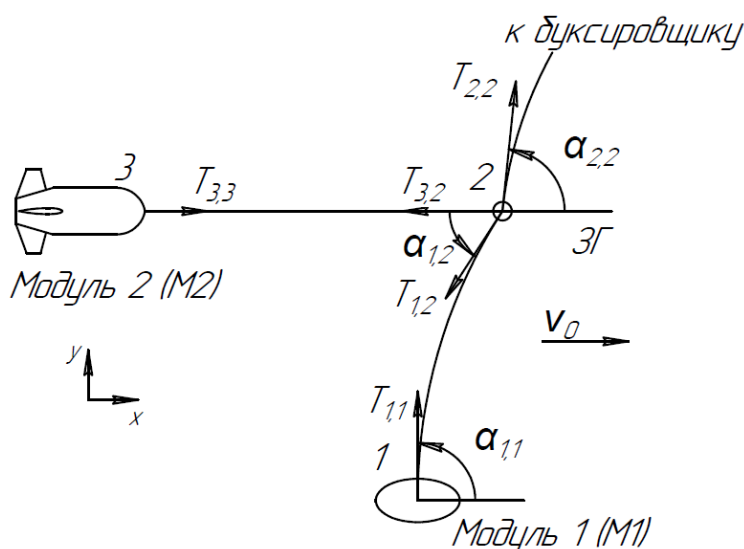


Рис. 1. Конфигурация буксируемой системы в положении равновесия

### Уравнения колебаний элементов буксируемой системы вблизи равновесного положения

Уравнения движения Модуля 1 (M1) в малых отклонениях от равновесного положения имеет вид:

$$\begin{cases} -m_{M1}\ddot{x}_1 + \delta T_1 \cos \alpha_{1,1} - T_{1,1} \sin \alpha_{1,1} \cdot \delta \alpha_{1,1} + X_{M1x} = 0 \\ -m_{M1}\ddot{y}_1 + \delta T_1 \sin \alpha_{1,1} + T_{1,1} \cos \alpha_{1,1} \cdot \delta \alpha_{1,1} + X_{M1y} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Уравнения движения Модуля 2 (M2):

$$\begin{cases} -m_{M2}\ddot{x}_3 + \delta T_{3,3} - \rho v_0 (C_x S)_{M2} \cdot \dot{x}_3 = 0 \\ y_3 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Уравнения движения заглубителя:

$$\begin{cases} -m_{ЗГ}\ddot{x}_2 + \delta T_{2,2} \cos \alpha_{2,2} - T_{2,2} \sin \alpha_{2,2} \cdot \delta \alpha_{2,2} + \\ + T_{1,2} \sin \alpha_{1,2} \cdot \delta \alpha_{1,2} - \delta T_1 \cos \alpha_{1,2} - \delta T_3 + X_{ЗГx} = 0 \\ -m_{ЗГ}\ddot{y}_2 + \delta T_{2,2} \sin \alpha_{2,2} + T_{2,2} \cos \alpha_{2,2} \cdot \delta \alpha_{2,2} - \\ - \delta T_1 \sin \alpha_{1,2} - T_{1,2} \cos \alpha_{1,2} \cdot \delta \alpha_{1,2} + X_{ЗГy} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

В уравнениях (1) — (3):

$m_{M1}$ ,  $m_{M2}$ ,  $m_{ЗГ}$  — массы Модуля 1, Модуля 2 и заглубителя соответственно;

$T_{ij}$  — натяжение в соответствующей точке буксирной линии в равновесном положении;

$X_{M1x}$ ,  $X_{M1y}$ ,  $X_{ЗГx}$ ,  $X_{ЗГy}$  — проекции сил сопротивления на соответствующие оси для Модуля 1 и заглубителя;

$\alpha_{ij}$  — угол наклона буксирной линии в равновесном положении;

$\delta T_{ij}$  — изменение натяжения в соответствующей точке;

$\delta \alpha_{ij}$  — изменение угла наклона.

Величины  $T_{ij}$  — выбираются из условия прочности существующих кабель-тросов.

Кроме того, должны выполняться условия совместности перемещений:

$$x_1 \cos \alpha_{1,1} + y_1 \sin \alpha_{1,1} = x_2 \cos \alpha_{1,2} + y_2 \sin \alpha_{1,2}; \quad (4)$$

$$x_3 = x_2; \quad (5)$$

$$x_2 \cos \alpha_{2,1} + y_2 \sin \alpha_{2,1} = Y_0 e^{i\omega_0 t} \quad (6)$$

Ввиду того, что длины рассматриваемых тросов намного превосходят расстояния колебаний по тросу, то углы наклона на концах троса могут быть найдены как:

$$\delta \alpha_{1,1} = v_{1,1} \lambda_{2,1}; \quad (7)$$

$$\delta \alpha_{1,2} = v_{1,2} \lambda_{1,1}; \quad (8)$$

$$\delta \alpha_{2,1} = v_{2,1} \lambda_{2,2}. \quad (9)$$

Здесь  $\lambda_{ij}$  – коэффициент присоединённой массы [4];  
 $v_{ij}$  – перемещения точек в проекциях на нормаль:

$$v_{1,1} = -x_1 \sin \alpha_{1,1} + y_1 \cos \alpha_{1,1}; \quad (10)$$

$$v_{1,2} = -x_1 \sin \alpha_{1,1} + y_1 \cos \alpha_{1,2}; \quad (11)$$

$$v_{2,1} = -x_2 \sin \alpha_{2,1} + y_2 \cos \alpha_{2,1}. \quad (12)$$

Таким образом, колебания рассматриваемой системы вблизи положения равновесия описываются системой из восьми линейных алгебраических уравнений с 8 неизвестными, которая может быть упрощена: из уравнения (2) с учётом (5) может быть найдена величина  $\delta T_3$  и поставлена в уравнения (3), которые примут вид:

$$\begin{cases} -(m_{3\Gamma} + m_{M2})\ddot{x}_2 + c_x \rho v_0 S_{M2} \dot{x}_2 + \delta T \cos \alpha_{2,1} - T_{2,1} \sin \alpha_{2,1} \delta \alpha_{2,1} + \\ + T_{1,2} \sin \alpha_{1,2} \delta \alpha_{2,1} - \delta T_1 \cos \alpha_{1,2} + X_{3\Gamma X} = 0 \\ m_{3\Gamma} \ddot{y}_2 + \delta T_2 \sin \alpha_{2,1} + T_{2,1} \cos \alpha_{2,1} \delta \alpha_{2,1} - \delta T_1 \sin \alpha_{2,1} - \\ - T_{1,2} \cos \alpha_{1,2} \delta \alpha_{1,2} + X_{3\Gamma Y} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

Ввиду того, что возмущающее воздействие периодическое и может быть представлено в виде разложения в ряд Фурье, то вышеуказанная система уравнений может быть решена в отдельности для каждой гармоники и решением системы будет сумма этих частных решений. Для примера ограничимся решением системы для первых двух гармоник. При этом массы модулей системы принимаются равными  $M_{3\Gamma} = 1500$  кг,  $M_{M1} = 150$  кг,  $M_{M2} = 500$  кг. Углы наклона буксирных линий известны из расчёта взаимного положения элементов буксируемой системы [5, 10]. Амплитуда касательных перемещений заглубителя предполагается равной 2 м.

Рассмотрим расчёт составляющей от частоты  $\omega_0$  (нечётных гармоник). Ввиду отсутствия горизонтальной составляющей сил сопротивления заглубителя и Модуля I с частотой  $\omega_0$  система уравнений будет иметь вид:

$$\begin{cases} m_{M1} \omega_0^2 x_1 + \delta T_1 \cos \alpha_{1,1} - T_{1,1} \sin \alpha_{1,1} \lambda_{2,1} \cdot (-x_1 \sin \alpha_{1,1} + y_1 \cos \alpha_{1,1}) = 0 \\ m_{M1} \omega_0^2 y_1 + \delta T_1 \sin \alpha_{1,1} + T_{1,1} \cos \alpha_{1,1} \lambda_{2,1} \cdot (-x_1 \sin \alpha_{1,1} + y_1 \cos \alpha_{1,1}) - i C_{13\Gamma} X_{03\Gamma} \\ (m_{3\Gamma} + m_{M2}) \omega_0^2 x_2 - i \omega_0 C_x \rho v_0 S_{M2} x_2 - \delta T_1 \cos \alpha_{1,2} + \delta T_2 \cos \alpha_{2,1} - \\ - T_{2,1} \sin \alpha_{2,1} \cdot (-x_2 \sin \alpha_{2,1} + y_2 \cos \alpha_{2,1}) \lambda_{2,2} + \\ + T_{1,2} \sin \alpha_{1,2} \cdot (-x_2 \sin \alpha_{1,2} + y_2 \cos \alpha_{1,2}) \lambda_{1,2} = 0 \\ m_{3\Gamma} \omega_0^2 y_2 + \sin \alpha_{2,1} \delta T_2 + T_{2,1} \cos \alpha_{2,1} \cdot (-x_2 \sin \alpha_{2,1} + y_2 \cos \alpha_{2,1}) \lambda_{2,2} - \sin \alpha_{1,2} \delta \\ - T_{1,2} \cos \alpha_{1,2} (-x_2 \sin \alpha_{1,2} + y_2 \cos \alpha_{1,2}) \lambda_{1,2} - i C_{13\Gamma} X_{03\Gamma} = 0 \\ x_1 \cos \alpha_{1,1} + y_1 \sin \alpha_{1,1} - x_2 \cos \alpha_{1,2} - y_2 \sin \alpha_{1,2} = 0 \\ x_2 \cos \alpha_{2,1} + y_2 \sin \alpha_{2,1} = Y_0 \end{cases} \quad (14)$$

В уравнениях (14) коэффициенты  $\lambda_{ij}$  берутся для частоты  $\omega_1 = 1 \text{ с}^{-1}$ .

Результаты расчёта в зависимости от заданной скорости буксировки приведены в таблице 1.

Теперь рассмотрим расчёт составляющей от частоты  $2\omega_0$  (чётных гармоник). Уравнение в этом случае будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{aligned} &4m_{M1}\omega_0^2x_1 + \delta T_1 \cos\alpha_{1,1} - T_{1,1}\sin\alpha_{1,1}\lambda_{2,1} \cdot (-x_1\sin\alpha_{1,1} + y_1\cos\alpha_{1,1}) - iB_{1M1}X_1 \\ &4m_{M1}\omega_0^2y_1 + \delta T_1\sin\alpha_{1,1} + T_{1,1}\cos\alpha_{1,1}\lambda_{2,1} \cdot (-x_1\sin\alpha_{1,1} + y_1\cos\alpha_{1,1}) = 0 \\ &4(m_{3Г} + m_{M2})\omega_0^2 - i2\omega_0 C_x \rho v_0 S_{M2}x_2 + \delta T_2 \cos\alpha_{2,1} - \\ &\quad - T_{2,1}\sin\alpha_{2,1} \cdot (-x_2\sin\alpha_{2,1} + y_2\cos\alpha_{2,1})\lambda_{2,2} + \\ &\quad + T_{1,2}\sin\alpha_{1,2} \cdot (-x_2\sin\alpha_{1,2} + y_2\cos\alpha_{1,2})\lambda_{1,2} - iB_{23Г}X_{03Г} = 0 \\ &4m_{3Г}\omega_0^2y_2 + \sin\alpha_{2,1}\delta T_2 + T_{2,1}\cos\alpha_{2,1} \cdot (-x_2\sin\alpha_{2,1} + y_2\cos\alpha_{2,1})\lambda_{2,2} - \sin\alpha_{2,1} \\ &\quad - T_{1,2}\cos\alpha_{1,2}(-x_2\sin\alpha_{1,2} + y_2\cos\alpha_{1,2})\lambda_{1,2} = 0 \\ &x_1\cos\alpha_{1,1} + y_1\sin\alpha_{1,1} - x_2\cos\alpha_{1,2} - y_2\sin\alpha_{1,2} = 0 \\ &x_2\cos\alpha_{2,1} + y_2\sin\alpha_{2,1} = 0 \end{aligned} \right. \quad (15)$$

В уравнениях (15) коэффициенты  $\lambda_{i,j}$  берутся для частоты  $\omega = 2 \text{ с}^{-1}$ . Результаты расчёта также приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Значения переменных для нечётной и чётной гармоник**

Параметр	Частота	Скорость		
		0,5 м/с	1,0 м/с	1,5 м/с
$x_1$  , м	$\omega$ (нечёт. гармоника)	0,16	0,74	0,73
	$2\omega$ (чёт. гармоника)	0,19	0,16	0,06
$y_1$  , м	$\omega$ (нечёт. гармоника)	2,05	1,11	0,81
	$2\omega$ (чёт. гармоника)	0,00	0,00	0,00
$\delta T_1$  , Н	$\omega$ (нечёт. гармоника)	712	525	281
	$2\omega$ (чёт. гармоника)	5	18	12
$x_2$  , м	$\omega$ (нечёт. гармоника)	0,04	0,13	0,34
	$2\omega$ (чёт. гармоника)	0,02	0,03	0,04
$y_2$  , м	$\omega$ (нечёт. гармоника)	2,06	1,67	1,73
	$2\omega$ (чёт. гармоника)	0,00	0,00	0,00
$\delta T_2$  , Н	$\omega$ (нечёт. гармоника)	4209	3596	3327
	$2\omega$ (чёт. гармоника)	11	39	41

По результатам расчёта видно, что наибольшее воздействие качки судна-буксировщика при всех скоростях буксировки будет испытывать Модуль 1 и принятая модель расчёта «малых» перемещений может быть применена к нему условно, особенно при расчёте по первой гармонике. Горизонтальная раскочка связки заглубитель — Модуль 1 с частотой  $2\omega_0$  будет несущественна вследствие значительной массы связки и демпфирования этих колебаний за счёт гидродинамического сопротивления Модуля 2. Однако с ростом скорости буксировки амплитуда горизонтальных перемещений Модуля 2 возрастает вследствие роста сопротивления заглубителя и уменьшения «излома» буксирной линии и достигает 0,13 м при скорости 1 м/с и 0,34 м при скорости 1,5 м/с, то есть очевидно, что необходимо уменьшение габаритов заглубителя и придания ему удобообтекаемой формы.

**Определение допустимой скорости судовой лебёдки при погружении буксируемой системы**

В режиме погружения-всплытия рассматриваемая система имеет двухзвенную конфигурацию за счёт того, что Модуль 1 подтягивается специальной лебёдкой к заглубителю, а Модуль 2, имеющий нейтральную плавучесть, буксируется за заглубителем на тросе нейтральной плавучести. Это обстоятельство затрудняет погружение системы при отсутствии хода судна-буксировщика, так как становится вероятным перепутывание тросов.

Очевидно, что скорость судовой лебёдки должна быть ограничена, в зависимости от скорости судна, таким образом, чтобы исключить возможность перепутывания тросов, то есть буксирные линии заглубитель — Модуль 2 и заглубитель — судно должны расходиться под достаточно большим углом. Величина минимального угла  $\alpha^*$  называется критическим, физически он соответствует тросу со свободным концом, трос в этом случае будет прямолинейным.

Во время погружения система будет иметь вид, представленный на рис. 2.

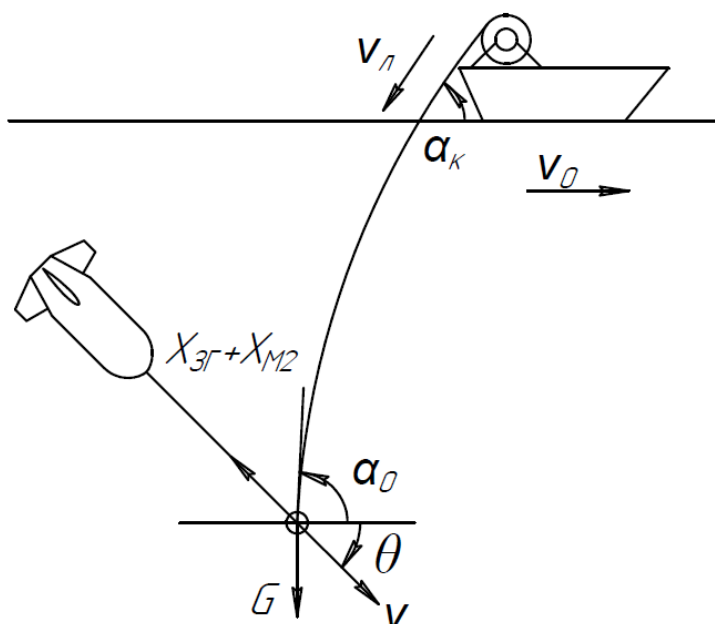


Рис. 2. Конфигурация буксируемой системы в процессе погружения

Предполагаемая скорость судна  $v_0$  и судовой лебёдки  $v_l$  считаются постоянными в процессе погружения буксируемой системы, а скорость точек троса, вызванную изменением кривизны буксирной линии при увеличении её длины, малой, по сравнению с их абсолютной скоростью. Для расчёта формы буксирной линии и величины натяжения в ней для каждого момента времени и соответствующей ему длине троса можно воспользоваться уравнением равновесия тяжёлой нити в потоке жидкости, которое в данном случае будет иметь вид [7]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT}{dS} = G \sin \alpha \\ T \frac{d\alpha}{dS} = G \cos \alpha - \frac{1}{2} C_n \rho d [v_0 \sin \alpha - v_n \sin(\alpha - \alpha_k)]^2 \\ \frac{dx}{dS} = \sin \alpha \\ \frac{dy}{dS} = \cos \alpha \end{array} \right. \quad (16)$$

Здесь  $\alpha_k$  — мгновенное значение угла наклона троса на коренном конце.

Пологая в уравнениях (16)  $v_n = 0$  получаем обычные уравнения равновесия тяжёлой нити в потоке жидкости.

Нетрудно убедиться, что решение  $\alpha = \alpha^*$  уравнений равновесия тяжёлой нити в потоке жидкости является также решением уравнений (16), то есть можно утверждать, что с возрастанием длины буксирной линии во времени она примет некоторую квазистатическую форму — процесс изменения её кривизны будет замедляться. Для того, чтобы получить количественную оценку этой длины необходимо в уравнениях (16) положить  $\alpha_k = \alpha^*$  и проинтегрировать их при начальных условиях на ходовом конце:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_0 = [(G_{\text{ЗАГЛ}} - X_{\Sigma} \sin \theta)^2 + (X_{\Sigma} \cos \theta)^2]^{1/2} \\ \alpha_0 = \omega ctg \frac{G - X_{\Sigma} \sin \theta}{X_{\Sigma} \cos \theta} \\ x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \end{array} \right. \quad (17)$$

Здесь  $G_{\text{ЗАГЛ}}$  — вес заглубителя в воде;

$$X_{\Sigma} = \frac{1}{2} \rho v^2 [(C_x S)_{\text{ЗАГЛ}} + (C_x S)_{\text{М2}}]; \quad (18)$$

$$v^2 = (v_n \sin \alpha^*)^2 + (v_0 - v_n \cos \alpha^*)^2; \quad (19)$$

$$tg \theta = \frac{v_n \sin \alpha^*}{v_0 - v_n \cos \alpha^*}. \quad (20)$$

В таблице 2 представлены значения  $\alpha^*$  при скоростях буксировки 0,5 м/с, 1,0 м/с, 1,5 м/с для троса диаметром 19 мм, имеющего погонный вес в воде 8,983 Н/м.

Таблица 2

**Значения критического угла в зависимости от скорости буксировки**

$v_0$ , м/с	0,5	1,0	1,5
$\alpha^*$	1,276	0,822	0,573

Пологая  $\theta = 45^\circ$ , что обеспечивает угол расхождения тросов не меньше этой величины, так как  $\alpha_0 < 90^\circ$  можем определить из соотношений (17) - (20) необходимую скорость лебёдки

$$v_n = \frac{v_0}{\sin \alpha^* + \cos \alpha^*}, \quad (21)$$

абсолютную скорость троса, натяжение и угол наклона троса на ходовом конце.

Результаты расчёта представлены в таблице 3.

Таблица 3

Параметры основного кабель-троса в зависимости от скорости буксировки

$v_0$ , м/с	0,5	1,0	1,5
$v_{л}$ , м/с	0,4	0,7	1,0
$v$ , м/с	0,54	0,73	0,85
$T_0$ , Н	8330	8192	8085
$\alpha_0$	1,550	1,530	1,518
$\alpha^*$	1,276	0,822	0,573

Величины скоростей лебёдки, представленные в таблице 2 следует рассматривать как допустимые, обеспечивающие угол расхождения тросов не меньше  $45^\circ$  после того, как выпущена некоторая часть троса и угол наклона троса на коренном конце стал близким к критическому.

Результаты интегрирования уравнений (16) при начальных условиях  $T_0$  и  $\alpha_0$ , представленных в таблице 3, приведены ниже (рис. 3 — 7).

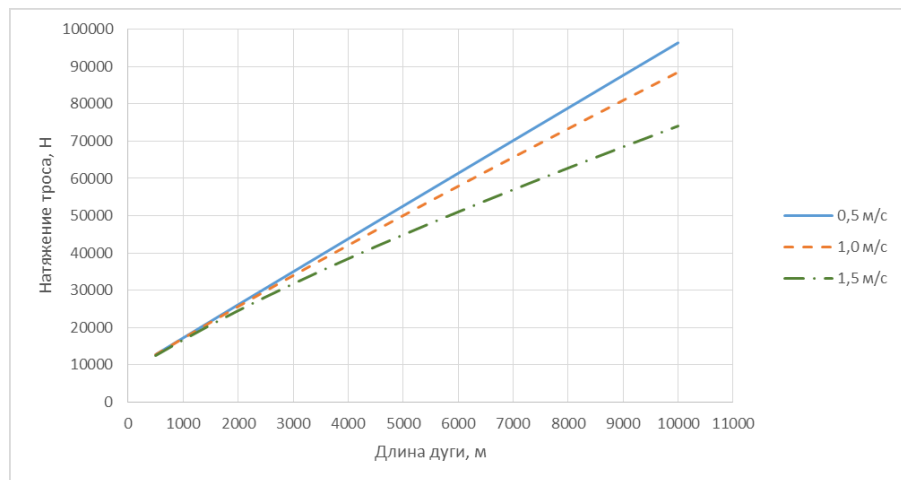


Рис. 3. Натяжение троса в зависимости от его длины

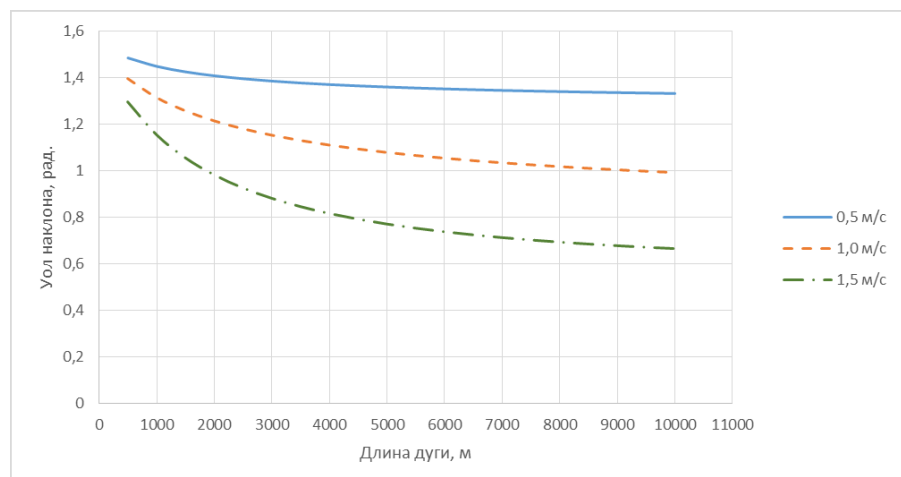


Рис. 4. Угол наклона ходового конца троса в зависимости от длины троса



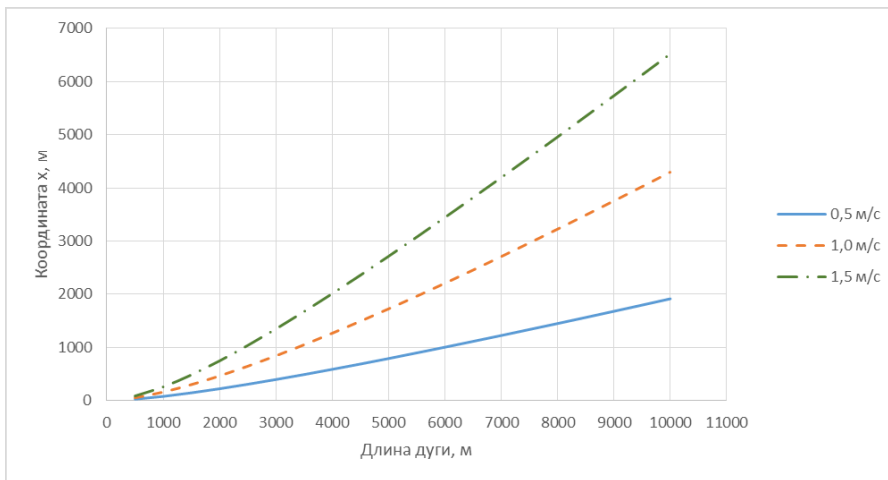


Рис. 5. Положение ходового конца троса по оси x в зависимости от длины троса

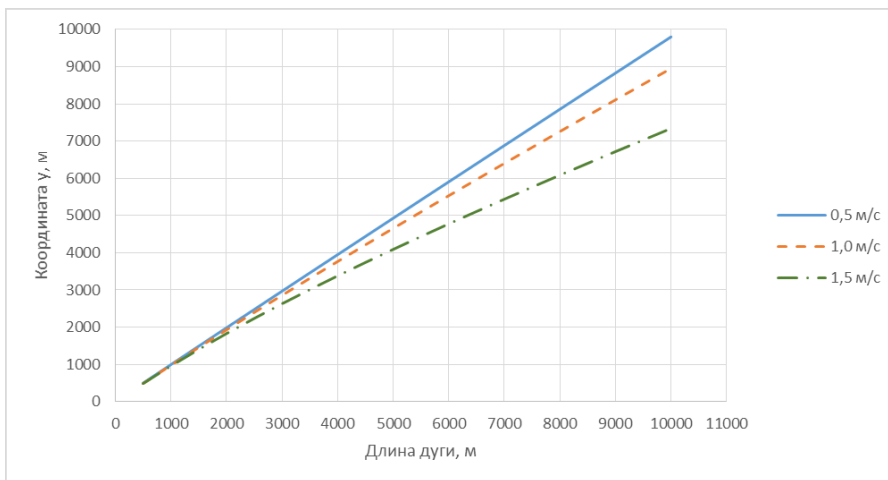


рис. 6. Положение ходового конца троса по оси y в зависимости от длины троса

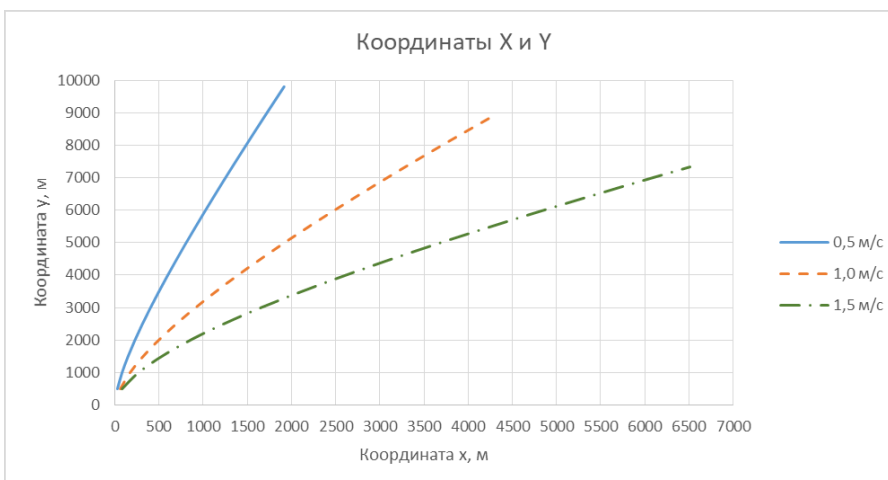


рис. 7. Положение ходового конца троса в зависимости от длины троса

Представленные на рис. 3 — 7 результаты подтверждают предположение, что угол наклона буксирной линии с возрастанием её длины приближается к критическому углу — минимально возможному для данной скорости буксировки (если рассматривать достаточно длинные тросы). Разность между углом наклона троса и его критическим значением составляет  $5...10^\circ$  для длин тросов соответствующим рабочей глубине 6000 м. Допустимые скорости лебёдки, представленные в табл. 3, обеспечивают необходимый угол расхождения не менее  $45^\circ$  во время всего погружения системы до рабочей глубины.

Вместе с тем может представлять интерес и вопрос уменьшения времени погружения системы. Очевидно, что в начале погружения угол на коренном конце троса будет значительно отличаться от критического и будет близок по величине к углу наклона на ходовом конце, то есть:

$$\alpha_k = \alpha_0 - \Delta\alpha,$$

при этом можно предположить, что угол  $\alpha_0$  достаточно близок к прямому:  $\sin\alpha_0 \approx 1$ ,  $\cos\alpha_0 \approx 0$ , полагая при этом  $\operatorname{tg}\theta \approx 1$  можем задать скорость лебёдки:

$$v_n = v_0.$$

Полагая  $\Delta\alpha = 0,1 \left(\frac{\pi}{2}\right)$  можем методом последовательных приближений вычислить  $T_0$ ,  $\alpha_0$ ,  $\theta$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta^{(n)} = \operatorname{arctg} \frac{\sin(\alpha_0^{(n)} - \Delta\alpha)}{1 - \cos(\alpha_0^{(n)} - \Delta\alpha)} \\ v^{(n)} = v_0 \sqrt{2 - \cos(\alpha_0^{(n)} - \Delta\alpha)} \\ \alpha_0^{(n+1)} = \operatorname{arctg} \frac{G - \frac{1}{2}[(C_X S)_{3Г} + (C_X S)_{МАК}] \rho (v^{(n)})^2 \sin\theta^{(n)}}{\frac{1}{2}[(C_X S)_{3Г} + (C_X S)_{МАК}] \rho (v^{(n)})^2 \sin\theta^{(n)}} \end{array} \right. \quad (22)$$

Далее, проинтегрировав уравнения (16), положив в них  $\alpha_k = \alpha_0 - \Delta\alpha$ , можно найти длину троса ( $S^*$ ) при которой  $\alpha = \alpha_k$ .

Результаты этих вычислений представлены в таблице 4. Там же представлено время схода с лебёдки троса этой длины ( $t$ ).

Таблица 4

**Значения длины троса и времени схода его с лебёдки для разных скоростей буксировки**

$v_0$ , м/с	0,5	1,0	1,5
$T_0$ , Н	8243	7563	6669
$A_0$	1,545	1,471	1,365(78°)
$\theta$	0,877(50°)	0,914(52°)	0,967(55°)
$S^*$ , м	1600	200	100
$t$ , сек	3200	200	67

Таким образом, можно сделать вывод, что увеличение скорости лебёдки в начале погружения целесообразно при малых скоростях движения судна — в этом случае корректировка скорости лебёдки потребует через достаточно большой промежуток времени. В целом же управление скоростью лебёдки даст незначительное уменьшение времени погружения системы:  $\sim$  на 10% при скорости судна 0,5 м/с,

~ 15% - при скорости 1 м/с и ~ 25% при 1,5 м/с, но при этом особенно при скоростях буксировки 1...1,5 м/с будет сопряжено с техническими трудностями и определённым риском запутывания тросов.

### **Заключение**

Предложенные уравнения для описания колебаний при изменении скорости буксировки пригодны для практического применения. Конструктивные изменения, которые необходимо внести в буксируемую систему, могут быть выработаны как на основании справочных материалов, так и по результатам отдельных исследований.

На основе предложенного способа возможен рациональный выбор параметров скорости и времени спуска. Время спуска возможно сократить до 25% за счет более высокой скорости спуска. Таким образом, возможно разработать технологический процесс погружения-всплытия с настраиваемыми параметрами.

### **Список литературы**

1. Chapman D.A. The Adjustment of fin size to minimize the ship induced pitching motion of a towed fish. - Ocean engineering, v/ 11, N1, 1984. - p. 23
2. Douglas Dr., Humphreys E., Delbert Dr., Summey C. Advances in towed vehicle design techniques. - Naval Engineering Journal, August 1982. - p. 30
3. Костин В.В., Зарецкий А.В. К вопросу проектирования буксируемого комплекса (Тр. конф. Молодых учёных № 2995 — 82) Деп.
4. Короткин А.И. Присоединённые массы судна: Справочник. - Л: Судостроение, 1986, 312 с., ил.
5. Тищенко М.С. Разработка математической модели буксировки подводных объектов, на основе однозвенных и двухзвенных стержневых моделей буксирных линий / М.С. Тищенко, Н.В. Ивановский // Научные проблемы водного транспорта. 2023. № 77. С. 264-272.
6. Гусев А.Л. Исследование гидродинамических характеристик элементов системы отведения многомерной сейсмической косы // А.Л. Гусев, Е.А. Першин // Научные проблемы водного транспорта. 2023. № 75. С. 27-35.
7. Левшонков Н.В. О методике проекторочного расчета площади крыла / Н.В. Левшонков, А.Л. Гусев, А.А. Крылосова // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 1-1 (47). С. 50-54.
8. Костенко В.В. О точности определения координат подводного модуля на основе измеренных параметров движения буксируемой системы / В.В. Костенко, Ю.В. Ваулин, Ф.С. Дубровин, О.Ю. Львов // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 1 (31). С. 21-29.
9. Серебряный А.Н. Воздействие внутренних волн больших амплитуд на буксируемый гидродинамический заглубитель / А.Н. Серебряный // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9. № 2. С. 39-45.
10. Зарецкий А.В. Подходы к исследованию многосвязных механических систем для создания океанологических исследовательских аппаратурных комплексов / А.В. Зарецкий, В.А. Лискин // Научное обозрение. Технические науки. 2018. № 5. С. 14-18.

### **References**

1. Chapman D.A. The Adjustment of fin size to minimize the ship induced pitching motion of a towed fish. - Ocean engineering, v/ 11, N1, 1984. - p. 23
2. Douglas Dr., Humphreys E., Delbert Dr., Summey C. Advances in towed vehicle design techniques. - Naval Engineering Journal, August 1982. - p. 30
3. Kostin V.V., Zaretskii A.V. K voprosu proektirovaniya buksiruemogo kompleksa (Tr. konf. Molodykh uchennykh № 2995 — 82) Dep.
4. Korotkin A.I. Prisoedinennye massy sudna: Spravochnik. - L: Sudostroenie, 1986, 312 p.

5. Tishchenko M.S. Razrabotka matematicheskoi modeli buksirovki podvodnykh ob'ektov, na osnove odnozvennykh i dvukhzvennykh sterzhnevnykh modelei buksirnykh linii / M.S. Tishchenko, N.V. Ivanovskii // Nauchnye problemy vodnogo transporta. 2023. № 77. pp. 264-272.
6. Gusev A.L. Issledovanie gidrodinamicheskikh kharakteristik ehlementov sistemy otvedeniya mnogorazmernoï seismicheskoi kosy // A.L. Gusev, E.A. Pershin // Nauchnye problemy vodnogo transporta. 2023. № 75. pp. 27-35.
7. Levshonkov N.V. O metodike proektirovochnogo rascheta ploshchadi kryla / N.V. Levshonkov, A.L. Gusev, A.A. Krylosova // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. № 1-1 (47). pp. 50-54.
8. Kostenko V.V. O tochnosti opredeleniya koordinat podvodnogo modulya na osnove izmerennykh parametrov dvizheniya buksiruemoi sistemy / V.V. Kostenko, YU.V. Vaulin, F.S. Dubrovin, O.YU. L'vov // Podvodnye issledovaniya i robototekhnika. 2020. № 1 (31). pp. 21-29.
9. Serebryanyi A.N. Vozdeistvie vnutrennikh voln bol'shikh amplitud na buksiruemyi gidrodinamicheskii zaglubitel' / A.N. Serebryanyi // Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika. 2016. T. 9. № 2. pp. 39-45.
10. Zaretskii A.V. Podkhody k issledovaniyu mnogosvyaznykh mekhanicheskikh sistem dlya sozdaniya okeanologicheskikh issledovatel'skikh apparaturnykh kompleksov / A.V. Zaretskii, V.A. Liskin // Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki. 2018. № 5. pp. 14-18.

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Гусев Александр Леонидович**, старший преподаватель, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, 420111, г. Казань, ул. К.Маркса, 10, e-mail: algusev@kai.ru

**Alexander Leonidovich Gusev**, Senior Lecturer, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI, 420111, Kazan, K. Marksa st., 10, e-mail: algusev@kai.ru

**Першин Евгений Александрович**, к.т.н., доцент, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, 420111, г. Казань, ул. К.Маркса, 10, e-mail: eapershin@kai.ru

**Evgeny A. Pershin**, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev–KAI, 420111, Kazan, K. Marksa st., 10, e-mail: eapershin@kai.ru

Статья поступила в редакцию 22.01.2025; опубликована онлайн 20.03.2025.  
Received 22.01.2025; published online 20.03.2025.