

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ БЕЗОПАСНОЙ БУКСИРОВКИ ПОДВОДНОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ ПЕРЕСЕЧЕННОГО РЕЛЬЕФА

В.В. Костенко, И.Г. Мокеева

Среди технических средств исследования Мирового океана особое место занимают подводные буксируемые комплексы в составе судна-буксировщика, кабеля-троса связи и буксируемого подводного аппарата. Эти комплексы широко используются в океанографии, военно-морском флоте, промышленном рыболовстве и геологоразведке. Обеспечение эксплуатационной надежности использования этих комплексов требует исследования допустимых параметров донной поверхности по курсу движения буксируемого подводного аппарата в районе проведения работ (угол наклона, высота препятствия). В ходе проведенных исследований было проведено моделирование установившегося движения подводного буксируемого комплекса «судно – кабель связи – буксируемый аппарат» в продольно-вертикальной плоскости с использованием разработанной в ИПМТ ДВО РАН прикладной программы, основанной на численном интегрировании уравнения гибкой нерастяжимой нити в установившемся потоке. В работе приведены результаты расчета влияния скорости буксировки и длины кабеля связи на натяжение на концах кабеля и глубину погружения аппарата с нулевой остаточной плавучестью. С учетом выявленной доминирующей зависимости формы кабеля связи от скорости буксировки проведен расчет допустимых для отслеживания значений уклона донной поверхности и безопасного для обхода препятствия по ходу движения. В этих расчетах вертикальное перемещение буксируемого аппарата осуществлялось путем регулирования длины кабеля связи с заданной скоростью.

Ключевые слова: подводный буксируемый комплекс, кабель связи, уравнение гибкой нерастяжимой нити, буксируемый подводный аппарат, регулирование длины кабеля, отслеживание наклона рельефа, обход препятствий.

Введение

В комплексе подводных технических средств исследования и освоения Мирового океана большое место занимают подводные буксируемые комплексы (ПБК), работающие в широком диапазоне глубин. С их помощью можно проводить следующие подводно-технические работы: гидроакустическое профилирование морского дна и гидроакустическую съемку его поверхности, маршрутные фото- и видеосъемку донной поверхности, вертикальное профилирование толщи воды с измерением океанографических параметров, измерение аномалий геомагнитного поля, проведение поиска затонувших объектов, а также разведку подводных месторождений полезных ископаемых [1–6]. Обследование донной поверхности требует для качественной маршрутной фото-, видеосъемки обеспечения высоты движения буксируемо-

го подводного аппарата (БПА) от единиц метров до десятков метров при гидроакустическом обследовании гидролокаторами бокового и носового обзора, а также многолучевыми эхолотами (МЛЭ) [3, 5]. При этом актуальность исследования условий безопасного движения БПА над донной поверхностью с пересеченным рельефом является очевидной.

Целью работы является повышение безопасности использования подводных буксируемых комплексов при решении задач гидроакустического и фототелевизионного обследования донной поверхности с пересеченным рельефом. Для достижения поставленной цели было проведено моделирование установившегося движения системы «судно-буксировщик – кабель-трос – БПА», основанное на уравнении гибкой нерастяжимой нити в установившемся потоке [7, 8]. Статья содержит введение, четыре раздела и заключение. В первом разделе описана методика рас-

чета параметров движения ПБК, во втором показаны результаты анализа зависимости глубины погружения БПА от скорости буксировки и длины кабеля связи; в третьем проведен расчет безопасного для буксировки угла наклона донного рельефа; в четвертом представлены результаты расчета безопасной для буксировки высоты донного объекта.

1. Методика расчета параметров движения подводной буксируемой системы

Принятая к расчету схема подводной буксируемой системы «судно – кабель-трос – БПА» в продольно-вертикальной плоскости показана на рис. 1, где приняты следующие обозначения: $O_c X_c Y_c$ – связанная с судном система координат корневого конца кабеля; V_0 – скорость движения судна относительно воды; L – длина выпущенного кабеля связи; $\Delta X_a, \Delta Y_a$ – координаты БПА относительно судна; $R_{xy} = \sqrt{\Delta X_a^2 + \Delta Y_a^2}$ – наклонная дальность от судна до БПА; $\alpha_L = \arccos(\Delta X_a / R)$ – воображаемый угол наклона кабеля связи к горизонту; $O_a X_a Y_a$ – связанная с БПА система координат ходового конца кабеля, T_x^k, T_y^k, T_{xy}^k – натяжение корневого конца кабеля, R_x – гидродинамическое сопротивление БПА при буксировке, $T_x^x = T_{xy}^x$ – натяжение ходового конца кабеля при нулевой остаточной плавучести БПА.

В режиме движения судна с установившейся скоростью $V_0 = \text{const}$ кабель связи можно рассматривать

как нерастяжимую гибкую нить в потоке. При этом в векторной форме уравнение, определяющее форму кабеля в потоке, имеет следующий вид [7, 8]:

$$\frac{d\bar{T}}{dl} + \bar{R} + \bar{q} = 0, \quad (1)$$

где \bar{R} – сила гидродинамического сопротивления, действующая на единицу длины кабеля dl , \bar{q} – вес единицы длины кабеля в воде. Силы, действующие на единицу кабеля, и их ориентация в продольно-вертикальной плоскости, иллюстрирует рис. 2, где \bar{T} и $\bar{T} + \Delta\bar{T}$ – сила натяжения кабеля в точках M и N элемента dl соответственно; α – угол атаки (наклон

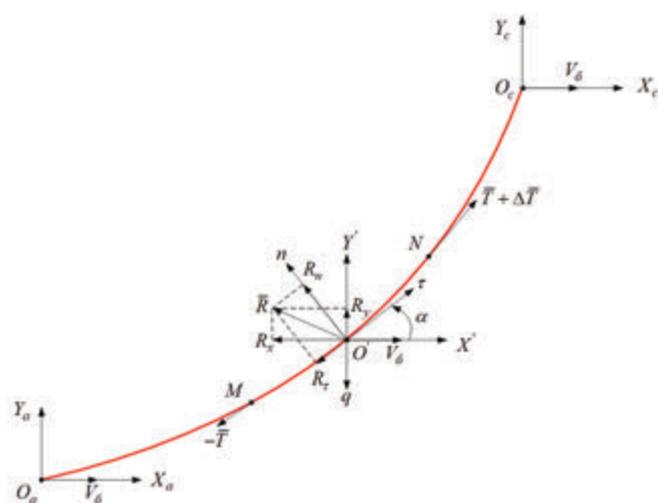


Рис. 2. Силы, действующие на единицу длины кабеля связи при буксировке

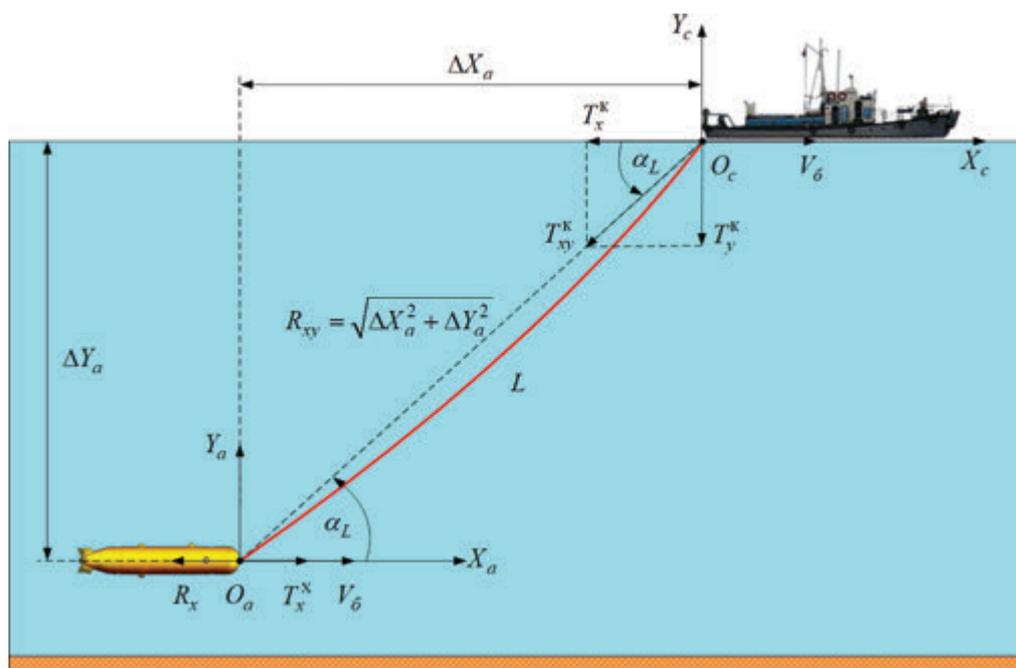


Рис. 1. Расчетная схема подводной буксируемой системы и действующие силы на концах кабеля связи

касательной τ к кабелю в центральной части элемента dl к вектору скорости буксировки V_6).

Разложив уравнение (1) по осям системы координат $O'X'Y'$ и проведя соответствующие преобразования, получим систему дифференциальных уравнений статики кабеля связи в продольно-вертикальной плоскости в режиме буксировки с постоянной скоростью:

$$\begin{cases} \frac{dT}{dl} = -(q \sin \alpha + R_\tau), \\ \frac{d\alpha}{dl} = -\frac{q \cos \alpha + R_n}{T}, \\ \frac{dx}{dl} = \cos \alpha, \\ \frac{dy}{dl} = \sin \alpha; \end{cases} \quad (2)$$

где $R_n = 0,5\rho dK_n V_n |V_n|$, $R_\tau = 0,5\rho dK_\tau V_\tau |V_\tau|$ – нормальная и тангенциальная составляющие сопротивления элемента кабеля соответственно; $V_n = V_6 \sin \alpha$, $V_\tau = V_6 \cos \alpha$ – нормальная и тангенциальная составляющая скорости набегающего потока соответственно; K_n , K_τ – нормальный и тангенциальный коэффициенты гидродинамического сопротивления кабеля соответственно; d – диаметр кабеля связи, ρ – плотность воды. При этом

$$\cos \alpha = \bar{V}_1 \cdot \bar{\tau}, \quad \sin \alpha = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}; \quad (3)$$

где $\bar{V}_1 = \bar{V}_6 / V_6$ – единичный вектор скорости буксировки, $V_6 = \sqrt{\bar{V}_6 \cdot \bar{V}_6}$, $\bar{V}_6 \cdot \bar{V}_6$ – скалярный квадрат, $\bar{\tau} = \bar{T} / T$ – единичный вектор касательной к линии кабеля, $T = \sqrt{\bar{T} \cdot \bar{T}}$, $\bar{T} \cdot \bar{T}$ – скалярный квадрат.

Если известны характеристики кабеля q , d , K_n , K_τ , натяжение кабеля \bar{T} и угол его ориентации в точке крепления к БПА α , то, интегрируя систему (2) по длине, можно определить координаты точки крепления кабеля к буксировщику, а значит, и координаты аппарата относительно судна. При условии нейтральной плавучести аппарата и его движении с нулевым углом атаки натяжение ходового конца кабеля будет обусловлено только силой гидродинамического сопротивления БПА [9]:

$$R_x = C_x \frac{\rho V_6^2}{2} U^{2/3}, \quad (3)$$

где C_x – коэффициент гидродинамического сопротивления БПА, а U – его водоизмещение.

Методика расчета конфигурации кабеля и натяжения на его концах, основанная на уравнениях гибкой нерастяжимой нити (1) и (2), а также использу-

ющая алгоритмы итерационного поиска координат ходового конца кабеля относительно буксировщика в связанной с ним системе координат $O_c X_c Y_c$, соответствующие заданным значения скорости буксировки V_6 , длины кабеля связи L и гидродинамическому сопротивлению БПА аппарата R_x , реализована в прикладной программе ZONA разработки ИПМТ ДВО РАН [10].

2. Расчет зависимости глубины погружения БПА от скорости буксировки и длины кабеля связи

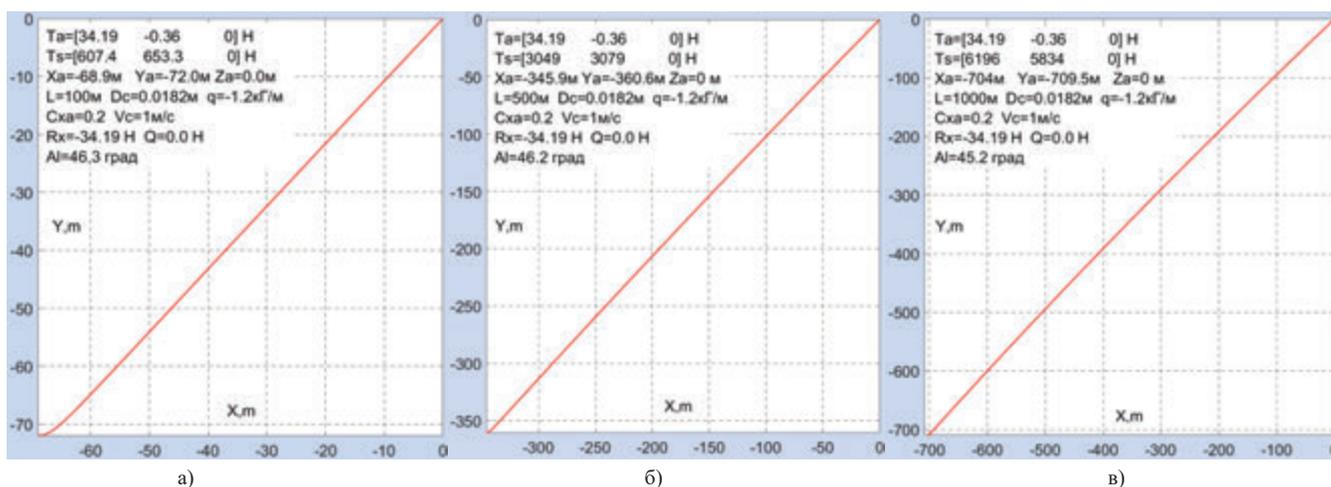
Цель расчета заключалась в определении зависимости глубины погружения БПА, а также натяжений на концах и конфигурации кабеля связи от скорости буксировки из диапазона $V_6 = 0 \div 2,0$ м/с при трех значениях длины кабеля $L = 100, 500, 1000$ м. Исходные данные, принятые для моделирования, сведены в табл. 1. Результаты проведенного расчета с использованием программы ZONA [10] иллюстрируют рис. 3–5 и табл. 2, где приняты следующие условные обозначения: $\alpha_{100}, \alpha_{500}, \alpha_{1000}$ – углы схода кабеля связи при его длине 100, 500 и 1000 м соответственно; $\alpha_{cp} = (\alpha_{100} + \alpha_{500} + \alpha_{1000}) / 3$ – среднее значение угла схода кабеля связи с судна-буксировщика. Следует отметить, что в соответствии с данными табл. 2 максимальное отклонение осредненной оценки угла α_{cp} от определенных в результате моделирования значений не превышает 0,7 градуса.

Таблица 1. Исходные данные для моделирования установившегося движения подводной буксируемой системы «судно – кабель-трос – БПА»

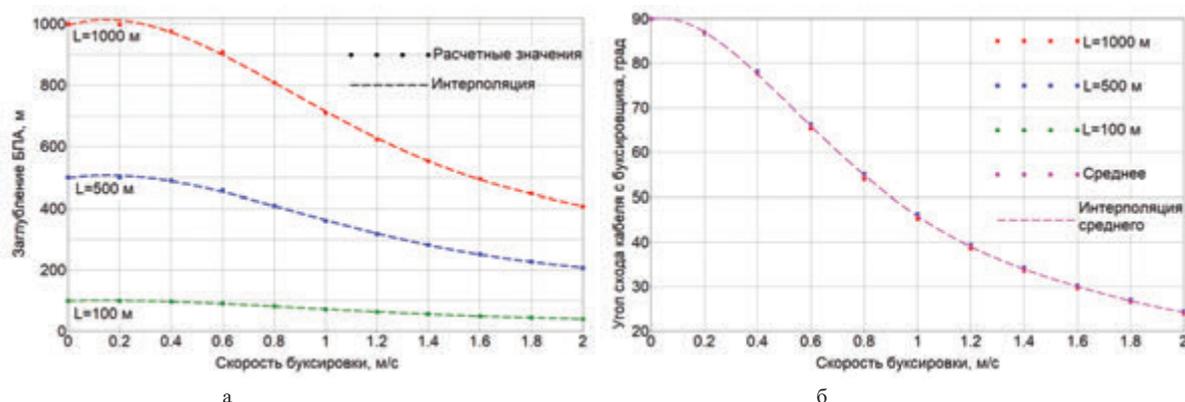
Наименование характеристики	Значение
Тип оптико-электрического кабель-троса связи	КГ (2x3,0+2E)-190-60
Диаметр кабеля связи (D), м	0,0182
Плавучесть кабеля связи (q), кг/м	-1,20
Длина кабеля связи (L), м	100/500/1000
Нормальный коэффициент сопротивления кабеля (K_n)	1,200
Тангенциальный коэффициент сопротивления кабеля (K_τ)	0,025
Водоизмещение БПА (U), м ³	0,200
Коэффициент гидродинамического сопротивления БПА (C_x)	0,2
Остаточная плавучесть БПА (Q_a), Н	0,0
Плотность морской воды (q_a), кг/м ³	1025

Таблица 2. Зависимость заглубления БПА и угла схода кабеля с судна от скорости буксировки

V_6 , м/с	$L=100$ м			$L=500$ м			$L=1000$ м			$\alpha_{ср}$, град
	Y_a , м	R_{xy} , м	α_{100} , град	Y_a , м	R_{xy} , м	α_{500} , град	Y_a , м	R_{xy} , м	α_{1000} , град	
0,0	-100,0	100,0	90,0	-500,0	500,0	90,0	-1000,0	1000,0	90,0	90,0
0,2	-99,7	99,9	86,7	-499,1	499,9	86,9	-998,3	999,9	86,8	86,8
0,4	-97,4	99,7	77,8	-489,0	499,7	78,1	-976,6	999,7	77,7	77,9
0,6	-91,1	99,6	66,2	-457,4	499,6	66,3	-908,7	999,5	65,4	66,0
0,8	-81,7	99,6	55,1	-409,6	499,6	55,1	-809,0	999,4	54,0	54,7
1,0	-72,0	99,7	46,3	-360,6	499,7	46,2	-709,5	999,5	45,2	45,9
1,2	-63,4	99,7	39,5	-317,5	499,7	39,5	-623,9	999,6	38,6	39,2
1,4	-56,1	99,7	34,2	-281,7	499,7	34,3	-553,3	999,6	33,6	34,0
1,6	-50,0	99,8	30,1	-252,1	499,8	30,3	-495,3	999,7	29,7	30,0
1,8	-45,0	99,8	26,8	-227,6	499,8	27,1	-447,4	999,7	26,6	26,8
2,0	-40,8	99,8	24,1	-207,0	499,8	24,5	-407,2	999,8	24,0	24,2



а) б) в)
 Рис. 3. Результаты расчета подводной буксируемой системы для скорости буксировки $V_6=1,0$ м/с:
 а) $L=100$ м, б) $L=500$ м, в) $L=1000$ м



а) б)
 Рис. 4. Зависимость заглубления БПА (а) и угла схода кабеля (б) от скорости буксировки и длины кабеля связи

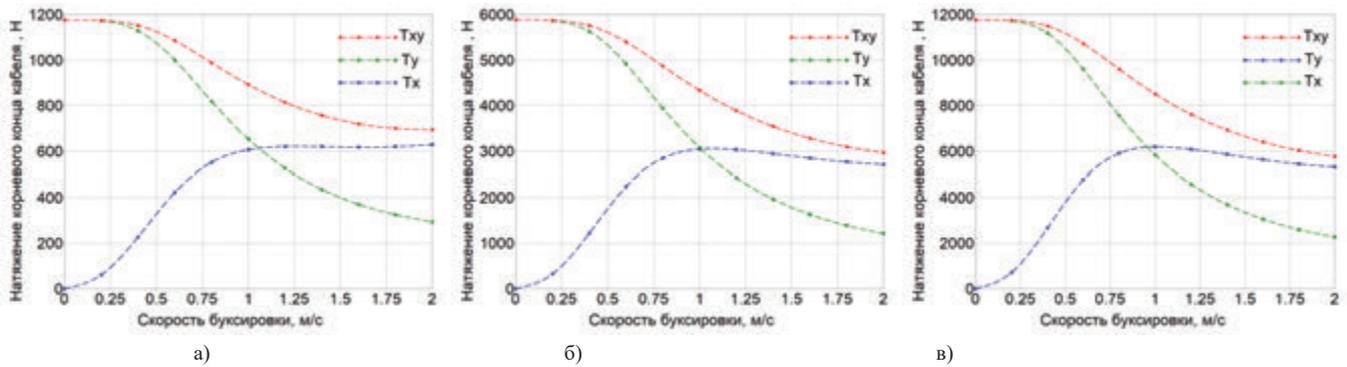


Рис. 5. Зависимость натяжения корневого конца кабеля от скоростей буксировки и длины кабеля связи:
а) $L=100$ м б) $L=500$ м, в) $L=1000$ м

Регрессионный анализ графиков рис. 4, б, проведенный средствами Advanced Grapher [11], выявил возможность использования аналитического представления зависимости осредненной оценки $\alpha_{cp}(V_6)$ следующим образом:

$$\begin{aligned} \alpha_{cp}(V_6) = & \\ = K_5 V_6^5 + K_4 V_6^4 + K_3 V_6^3 + K_2 V_6^2 + K_1 V_6 + K_0, & \end{aligned} \quad (4)$$

где $K_5 = 10,27$ град·с⁵/м⁵; $K_4 = -68,23$ град·с⁴/м⁴; $K_3 = 166,8$ град·с³/м³; $K_2 = -165,62$ град·с²/м²; $K_1 = 12,77$ град·с/м; $K_0 = 89,9$ град – коэффициенты интерполирующего полинома.

Анализ результатов проведенного моделирования движения подводной буксируемой системы на скоростях движения до 2 м/с позволяет представить конфигурацию кабеля связи в виде прямой линии, соединяющей судно-буксировщик и БПА, с углом наклона этой прямой, зависящим только от скорости буксировки и не зависящим от выпущенной длины.

3. Расчет отслеживаемого при буксировке угла наклона донного рельефа

В общем случае глубина погружения БПА может изменяться за счет изменения скорости хода и курса судна, путем регулирования углового положения крыльев и рулей аппарата либо изменением выпущенной с буксировочной лебедки носителя длины кабеля связи. Первый способ отличается чрезмерной инерционностью, составляющей десятки минут при выпущенной длине кабеля связи более сотни метров. Из-за малой скорости буксировки гидродинамические силы, создаваемые изменением углового положения рулей и крыльев, значительно уступают силам, обусловленным гидродинамическим сопротивлением и массоинерционными характеристиками кабеля связи. Практика показывает, что наиболее эффектив-

ным решением задачи безаварийной буксировки является управление глубиной погружения БПА путем регулирования выпущенной с буксировочной лебедки длины кабеля связи.

При этом допустимый наклон отслеживаемого донного рельефа будет зависеть от угла наклона траектории движения БПА, который определяется скоростью движения судна-буксировщика и скоростью выборки/приема кабеля связи буксирной лебедкой судна. В предыдущем разделе было установлено, что форма выбранного кабель-троса связи соответствует прямой линии, соединяющей его концы. При этом угол наклона кабеля к горизонту зависит только от скорости буксировки, в то время как изменение его длины в диапазоне 100 ÷ 1000 м приводит к пренебрежимо малому изменению упомянутого угла в пределах ± 1 градуса. С учетом этого допущения составляющие вектора скорости изменения длины кабеля при вращении барабана буксирной лебедки можно определить по очевидному выражению:

$$\begin{cases} V_{lx} = V_l \cos \alpha_L, \\ V_{ly} = V_l \sin \alpha_L, \\ V_l = \sqrt{V_{lx}^2 + V_{ly}^2}; \end{cases} \quad (5)$$

где V_l – скорость изменения длины кабеля; V_{lx} , V_{ly} – ее горизонтальная и вертикальная составляющие соответственно; $\alpha_L = \alpha_{cp}$ – принятый для расчета угол схода кабеля с буксировочного ролика. Расчетная схема движения подводной буксируемой системы при отслеживании донного рельефа приведена на рис. 6.

Угол наклона λ вектора результирующей скорости движения БПА $\vec{V}_{\text{бпа}}$ к горизонту, который по авиационной терминологии принято называть углом наклона траектории, будет зависеть как от скорости изменения длины кабеля V_l , так и от скорости буксировки V_6 в соответствии с формулой:

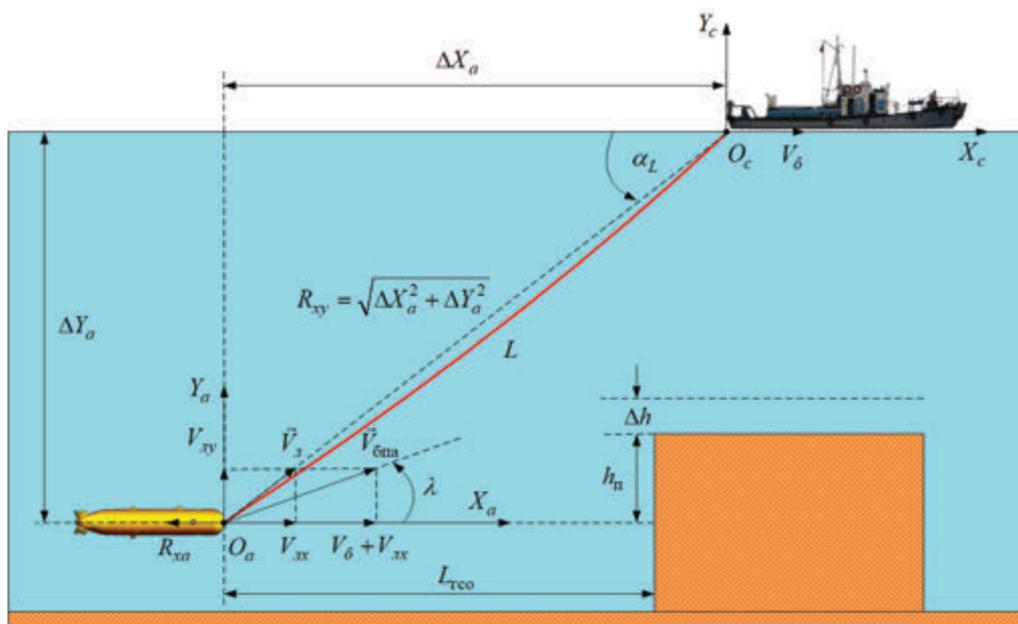


Рис. 6. Расчетная схема буксировки при обходе препятствия за счет изменения длины кабеля связи

$$\lambda = \arctg\left(\frac{V_{ly}}{V_{\delta} + V_{lx}}\right) \quad (6)$$

При этом безопасными и отслеживаемыми для буксировки являются уклоны донной поверхности $\lambda_{\text{дп}}$, соответствующие ограничению $|\lambda_{\text{дп}}| \leq \lambda$.

Результаты расчета угла наклона траектории движения БПА, проведенного для скоростей буксировки $V_{\delta}=0\div 2$ м/с и скоростей изменения длины кабеля связи $V_{\text{л}}=1, 2, 3, 4$ м/с, сведены в табл. 3 и иллюстрируются рис. 7–8.

Оптимальная скорость движения БПА при гидроакустической съемке составляет 1,0–1,5 м/с, а маршрутная фотосъемка с перекрытием кадров требует движения со скоростями 0,5–1,0 м/с [5]. Анализ графиков рис. 8 показывает, что при выполнении гидроакустической съемки на скорости буксировки до БПА $V_{\delta}=1,5$ м/с максимальный отслеживаемый угол склона донной поверхности составляет $\lambda_{\text{дп}}=23$ град для $V_{\text{л}}=4$ м/с и $\lambda_{\text{дп}}=13$ град для $V_{\text{л}}=1$ м/с соответственно. В случае проведения маршрутной фотосъемки на скорости $V_{\delta}=0,5$ м/с отслеживаемый угол склона дон-

Таблица 3. Зависимость скорости движения БПА от скоростей буксировки и изменения длины кабеля

V_{δ} , м/с	$\alpha_{\text{сп}}$, град	$V_{\text{л}}=1,0$ м/с				$V_{\text{л}}=2,0$ м/с				$V_{\text{л}}=3,0$ м/с				$V_{\text{л}}=4,0$ м/с			
		$V_{\text{лы}}$, м/с	$V_{\text{лх}}$, м/с	$V_{\text{ах}}$, м/с	λ , град	$V_{\text{лы}}$, м/с	$V_{\text{лх}}$, м/с	$V_{\text{ах}}$, м/с	λ , град	$V_{\text{лы}}$, м/с	$V_{\text{лх}}$, м/с	$V_{\text{ах}}$, м/с	λ , град	$V_{\text{лы}}$, м/с	$V_{\text{лх}}$, м/с	$V_{\text{ах}}$, м/с	λ , град
0,0	90,0	1,00	0,00	0,00	90,0	2,00	0,00	0,00	90,0	3,00	0,00	0,00	90,0	4,00	0,00	0,00	90,0
0,2	86,8	1,00	0,06	0,26	75,6	2,00	0,11	0,31	81,1	3,00	0,17	0,37	83,0	3,99	0,22	0,42	83,9
0,4	77,9	0,98	0,21	0,61	58,0	1,96	0,42	0,82	67,2	2,93	0,63	1,03	70,6	3,91	0,84	1,24	72,4
0,6	66,0	0,91	0,41	1,01	42,2	1,83	0,81	1,41	52,2	2,74	1,22	1,82	56,4	3,65	1,63	2,23	58,6
0,8	54,7	0,82	0,58	1,38	30,7	1,63	1,15	1,95	39,9	2,45	1,73	2,53	44,0	3,27	2,31	3,11	46,4
1,0	45,9	0,72	0,70	1,70	23,0	1,44	1,39	2,39	31,0	2,15	2,09	3,09	34,9	2,87	2,78	3,78	37,2
1,2	39,2	0,63	0,77	1,97	17,7	1,26	1,55	2,75	24,7	1,90	2,32	3,52	28,3	2,53	3,10	4,30	30,5
1,4	34,0	0,56	0,83	2,23	14,1	1,12	1,66	3,06	20,1	1,68	2,49	3,89	23,4	2,24	3,31	4,71	25,4
1,6	30,0	0,50	0,87	2,47	11,5	1,00	1,73	3,33	16,7	1,50	2,60	4,20	19,7	2,00	3,46	5,06	21,6
1,8	26,8	0,45	0,89	2,69	9,5	0,90	1,78	3,58	14,1	1,35	2,68	4,48	16,8	1,81	3,57	5,37	18,6
2,0	24,2	0,41	0,91	2,91	8,0	0,82	1,82	3,82	12,1	1,23	2,74	4,74	14,6	1,64	3,65	5,65	16,2

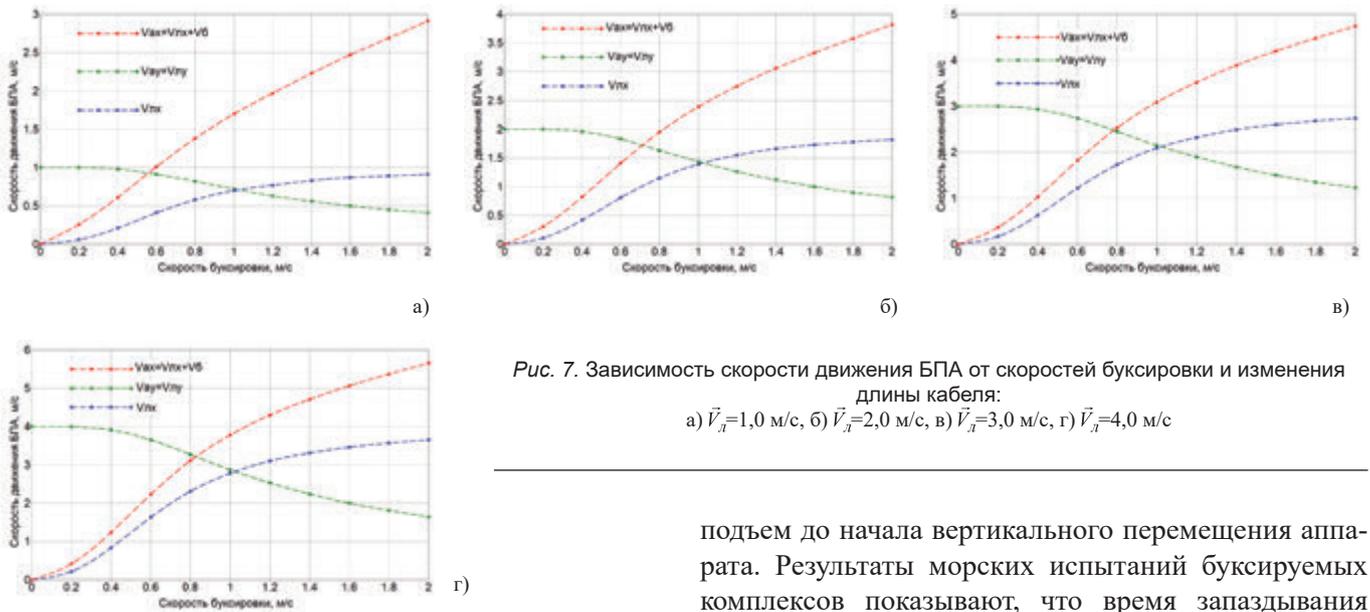


Рис. 7. Зависимость скорости движения БПА от скоростей буксировки и изменения длины кабеля:

а) $\vec{V}_л=1,0$ м/с, б) $\vec{V}_л=2,0$ м/с, в) $\vec{V}_л=3,0$ м/с, г) $\vec{V}_л=4,0$ м/с

ной поверхности составляет $\lambda_{дп}=65$ град для $V_л=4$ м/с и $\lambda_{дп}=50$ град для $V_л=1$ м/с.

4. Расчет безопасного для движения БПА возвышения донного препятствия

Определим взаимосвязь скорости буксировки с предельной высотой препятствия, которое может преодолеть аппарат за счет изменения длины кабеля связи. БПА может обойти препятствие типа «уступ» в продольно-вертикальной плоскости в том случае, если он оборудован вперед направленным гидролокатором секторного обзора (ГСО) (см. рис. 6) [5] при выполнении следующего условия:

$$V_{ly}t_{пп} \geq h_{п} + \Delta h, \tag{6}$$

где $h_{п}$ – возвышение препятствия над глубиной буксировки аппарата ΔY_a , $t_{пп}$ – время вертикального перемещения БПА с момента обнаружения препятствия ГСО, V_{ly} – максимальная скорость вертикального перемещения ходового конца кабеля под действием тянущего усилия судовой лебедки, Δh – запас высоты при прохождении БПА над препятствием

Запаздывание реакции системы «оператор–лебедка–кабель» определяется интервалом времени t_3 с момента фиксации препятствия ГСО до начала вертикального движения БПА:

$$t_3 = t_{ро} + t_{рл}, \tag{7}$$

где $t_{ро}$ – время реакции оператора от момента идентификации препятствия до включения буксировочной лебедки на подъем, $t_{рл}$ – время реакции лебедки и буксирного кабеля от момента подачи команды на

подъем до начала вертикального перемещения аппарата. Результаты морских испытаний буксируемых комплексов показывают, что время запаздывания $t_3 \leq 20$ с [5].

Расстояние L_x , который проходит БПА по горизонтали за время от момента обнаружения препятствия до окончания подъема на безопасную высоту над препятствием $h_{п} + \Delta h$, составляет:

$$L_x = (V_{\delta} + V_{lx}) \left(t_3 + \frac{h_{п} + \Delta h}{V_{ly}} \right). \tag{8}$$

Очевидно, что для безопасного обхода препятствия должно выполняться следующее неравенство:

$$\frac{L_{гсо}}{V_{\delta} + V_{lx}} \geq \left(t_3 + \frac{h_{п} + \Delta h}{V_{ly}} \right), \tag{9}$$

из которого можно определить максимальное значение безопасной для обхода высоты препятствия по формуле:

$$h_{n*} = L_{гсо} \frac{V_{ly}}{V_{\delta} + V_{lx}} - V_{ly}t_3 - \Delta h = L_{гсо} \operatorname{tg} \lambda - V_{ly}t_3 - \Delta h. \tag{10}$$

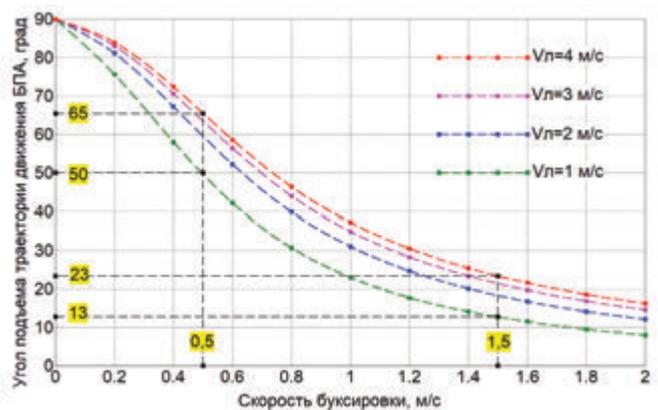


Рис. 8. Зависимость угла подъема траектории движения БПА от скоростей буксировки и изменения длины кабеля

Для расчета $h_{п*}$ были приняты следующие исходные данные: $L_{гco}=200$ м, $t_3=20$ с, $\Delta h=10$ м, $V_6=0\div 2$ м/с, $V_л=1,2,3,4$ м/с. Зависимость $h_{п*}(V_6, V_л)$ рассчитывалась по формуле (10), где угол наклона траектории движения БПА λ брался из табл. 3. Результаты проведенного расчета сведены в табл. 4 и иллюстрируются графиками рис. 9.

Таблица 4. Зависимость максимальной высоты препятствия от скоростей буксировки и изменения длины кабеля

V_6 , м/с	$V_л=1,0$ м/с		$V_л=2,0$ м/с		$V_л=3,0$ м/с		$V_л=4,0$ м/с	
	λ , град	$h_{п*}$, м						
0,2	75,6	745,3	81,1	1215,7	83,0	1533,9	83,9	1760,2
0,4	58,0	286,1	67,2	412,9	70,6	476,0	72,4	507,8
0,6	42,2	148,9	52,2	198,4	56,4	213,5	58,6	213,1
0,8	30,7	89,1	39,9	113,1	44,0	115,0	46,4	107,1
1,0	23,0	58,1	31,0	72,0	34,9	69,9	37,2	60,7
1,2	17,7	40,0	24,7	49,0	28,3	45,7	30,5	36,7
1,4	14,1	28,4	20,1	34,6	23,4	31,0	25,4	22,8
1,6	11,5	20,6	16,7	25,1	19,7	21,5	21,6	14,0
1,8	9,5	15,0	14,1	18,3	16,8	14,9	18,6	8,1
2,0	8,0	10,9	12,1	13,3	14,6	10,0	16,2	3,9

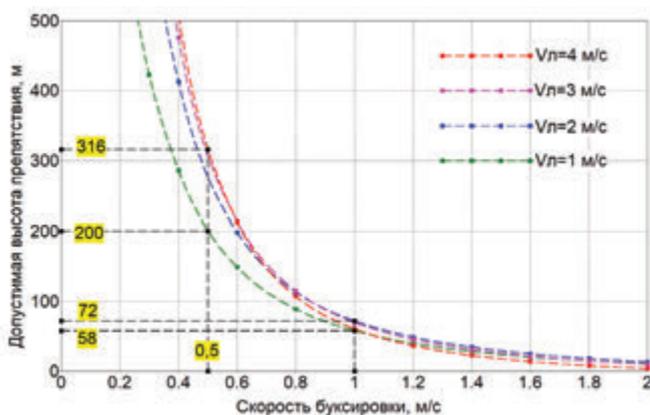


Рис. 9. Зависимость максимальной высоты обходимого БПА препятствия от скоростей буксировки и изменения длины кабеля

Анализ данных табл. 4 показывает, что на скоростях $V_6=0,5$ м/с и $V_л=1$ м/с допустимая высота препятствия $h_{п*}=200$ м, а для $V_л=4$ м/с $h_{п*}=316$ м. Установлено, что при $V_6>1,0$ м/с использование скоростей изменения длины кабеля $V_л=3;4$ м/с менее эффективно для безопасного обхода препятствия в сравнении с $V_л=2$ м/с. В соответствии с табл. 4 при буксировке со скоростью $V_6=1,0$ м/с для $V_л=2$ м/с $h_{п*}=72$ м, для $V_л=3$ м/с $h_{п*}=69,9$ м, а для $V_л=4$ м/с

$h_{п*}=60,7$ м. Причину этого снижения эффективности обхода препятствия можно объяснить тем, что при скорости изменения длины кабеля $V_л\geq 2$ м/с увеличение горизонтальной составляющей скорости движения аппарата $V_{ax}=V_6+V_{лх}$ приводит к критическому уменьшению времени его сближения с препятствием $t_c=L_{гco}/(V_6+V_{лх})$, которое отводится для требуемого вертикального перемещения $h_{п*}$ со скоростью $V_{лy}$.

Заключение

Анализ результатов проведенного исследования позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Проведено моделирование установившегося движения подводной буксируемой системы с использованием программы ZONA разработки ИПМТ ДВО РАН, основанной на численном интегрировании по длине уравнения гибкой нерастяжимой нити.

2. Анализ результатов моделирования движения подводной буксируемой системы показал возможность представления формы кабеля связи прямой линией, соединяющей судно-буксировщик и БПА. Установлено, что отклонение наклонной дальности между концами кабеля от его длины не превышает 0,6 м, а угол наклона кабеля к горизонту определяется только скоростью буксировки и не зависит от выпущенной длины.

3. Максимальная достижимая глубина БПА при скорости буксировки 2,0 м/с и длине кабеля связи КГ (2х3,0+2Е)-190-60 $L=100, 500$ и 1000 м составляет $\Delta Y_a = -41, -207, -407$ м соответственно.

4. Максимальное натяжение кабеля связи на буксировочном ролике соответствует нулевой скорости буксировки, определяется весом кабеля в воде и составляет $T_{xy}=1176, 5886, 11760$ Н для выпущенной длины $L=100, 500, 1000$ м соответственно.

5. Исследованы режимы безопасной буксировки БПА для постоянного угла уклона донного рельефа и наличия ступенчатого препятствия с маневрированием БПА в продольно-вертикальной плоскости за счет регулирования длины кабеля связи со скоростями 1, 2, 3 и 4 м/с.

6. При буксировке БПА в режиме гидроакустической съемки со скоростью 1,5 м/с максимальный отслеживаемый угол наклона донного рельефа составляет 23 и 13 градусов для скоростей выборки кабеля 4 и 1 м/с соответственно. Для маршрутной фотосъемки с перекрытием на скорости 0,5 м/с отслеживаемый угол рельефа соответствует 65 и 50 градусам при скорости выборки кабеля 4 и 1 м/с соответственно.

7. Оборудование БПА направленным вперед гидролокатором для обнаружения препятствия по курсу

его движения на дальности 200 м обеспечивает условия для безопасного обхода донного препятствия на скорости буксировки 0,5 м/с с возвышением относительно глубины погружения аппарата 200 и 316 м при скорости выборки кабеля 1 и 4 м/с соответственно.

8. Установлено, что при буксировке на скоростях более 1,0 м/с использование скоростей изменения длины кабеля 3 и 4 м/с менее эффективно для безопасного обхода препятствия в сравнении со скоростью 2 м/с. Причина этого эффекта объясняется тем, что при скорости изменения длины кабеля более 2 м/с соответствующее увеличение горизонтальной составляющей скорости движения БПА критически уменьшает время его сближения с препятствием, которое используется для требуемого вертикального перемещения аппарата.

Работа выполнена по теме государственного задания ИПМТ ДВО РАН «Разработка автономных и гибридных подводных робототехнических комплексов, их систем управления, навигации и связи для расширения функциональных возможностей средств освоения Мирового океана» (№ государственной регистрации 1022061700020-5-2.2.2).

Сведения об авторах:

КОСТЕНКО Владимир Владимирович, к.т.н., ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией исполнительных устройств и систем телеуправления

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Адрес: 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а

Научные интересы: подводная робототехника, системы управления движением, движительно-рулевые комплексы, динамические модели, буксируемые системы

Тел.: +7 (984) 145-43-85

E-mail: kostenko@marine.febras.ru, kosten.ko@mail.ru

SPIN-код: 2310-3141

ORCID: 0000-0002-3821-3787

Resercher ID: AAF-6399-2021

Scopus ID: 57189036440

МОКЕЕВА Ирина Геннадьевна, старший научный сотрудник лаборатории исполнительных устройств и систем телеуправления

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а

Научные интересы: подводная робототехника, моделирование движения автономных и телеуправляемых роботов, оптимизация движительно-рулевых комплексов, подводные привязные системы

Тел.: +7 (423) 243-24-16

E-mail: pq1205@rambler.ru

ORCID: 0000-0001-6217-6763

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Римский-Корсаков Н.А., Свиридов С.А., Руссак Ю.С., Костин А.Б., Тихонова Н.Ф. Разработка и эксплуатация глубоководного океанографического комплекса в составе буксируемых аппаратов «Звук» // Океанологические исследования. 2023. № 51 (1). С. 133–161. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(1).7.

2. Римский-Корсаков Н.А. Технические средства для исследований дна акваторий гидролокационными методами // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 10-2. С. 205–213.

3. Лискин В.А., Зарецкий А.В., Римский-Корсаков Н.А. Разработка глубоководных буксируемых систем для исследования придонной области океана // Научное обозрение. Технические науки. 2019. № 1. С. 37–42.

4. Римский-Корсаков Н. А. Структура технологии гидролокационных исследований дна и подводных объектов // Океанологические исследования. 2017. Т. 45, № 1. С. 187–195.

5. Римский-Корсаков Н.А., Лискин В.А., Зарецкий А.В. Аспекты технологии океанологических исследований с использованием буксируемых аппаратов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 7. С. 37–43.

6. Бродский П.Г. и др. К вопросу разработки технологии поиска и идентификации подводных потенциально опасных объектов в арктических морях Российской Федерации // Навигация и гидрография. 2016. С. 36.

7. Меркин Д.Р. Введение в механику гибкой нити. М.: Наука, 1980. 240 с.

8. Herman D.A., Kostenko V.V., Mokeeva I.G. Choice of ROV's thruster set power according to footprint's radius on steady motion // OCEANS '94. Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation. Proceedings. Brest, 1994. Vol.3. P. III/453-III/456/ (doi: 10.1109/OCEANS.1994.364241).

9. Пантов Е.Н. и др. Основы теории движения подводных аппаратов /Е.Н. Пантов, Н.Н. Махин, Б.Б. Шереметов. Л.: Судостроение, 1973. 211 с.

10. Костенко В.В., Мокеева И.Г. Исследование характеристик стационарных режимов движения подводной привязной системы «ТНПА – кабель – судно» // Подводные исследования и робототехника. 2024. №2 (48). С. 12–20. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_48_02_02. EDN: AZEUEO.

11. Евстегнеева А.С. Использование компьютерной программы Advanced Grapher как средство реализации принципа наглядности в процессе обучения математике // Молодой ученый. 2018. № 2 (188). С. 108–112.



Для цитирования:

Костенко В.В., Мокеева И.Г. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ БЕЗОПАСНОЙ БУКСИРОВКИ ПОДВОДНОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ ПЕРЕСЕЧЕННОГО РЕЛЬЕФА // Подводные исследования и робототехника. 2026. № 1 (55). С. 4–14. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_55_01_01. EDN: ATVBNHR.

DETERMINING THE CONDITIONS FOR SAFE TOWING OF AN UNDERWATER VEHICLE IN CONDITIONS OF CROSSED BOTTOM RELIEF

V.V. Kostenko, I.G. Mokeeva

Among the technical means for studying the World Ocean, a special place is occupied by underwater towed systems consisting of a towing vessel, a communication cable and a towed underwater vehicle. These systems are widely used in oceanography, the navy, industrial fishing and geological exploration. Ensuring the operational reliability of the use of these systems requires a study of the permissible parameters of the bottom surface along the course of the towed underwater vehicle in the area of operations (angle of inclination, height of obstacle). In the course of the conducted research, the steady-state motion of the underwater towed complex "vessel – communication cable – towed vehicle" was simulated in the longitudinal-vertical plane using the application program developed at the IMTP FEBRAS, based on the numerical integration of the equation of a flexible inextensible thread in a steady flow. The paper presents the results of calculating the influence of the towing speed and the length of the communication cable on the tension of the cable ends and the immersion depth of the apparatus with zero residual buoyancy. Taking into account the identified dominant dependence of the communication cable shape on the towing speed, a calculation was made of the acceptable values for tracking the slope of the bottom surface and the safe elevation above the immersion depth of the apparatus to avoid obstacles along the route. In these calculations, the vertical movement of the towed apparatus was achieved by changing the length of the communication cable at a given speed.

Keywords: towed underwater system, communication cable, flexible inextensible line equation, towed underwater vehicle, cable length adjustment, terrain slope tracking, obstacle avoidance

References

1. Rimsky-Korsakov N.A., Sviridov S.A., Russak Yu.S., Kostin A. B., and Tikhonova N. F., (2023). Razrabotka i ekspluatatsiya glubokovodnogo okeanograficheskogo kompleksa v sostave buksiruemykh apparatov «Zvuk» [Development and operation of deep-sea oceanographic complex as part of towed vehicles "Zvuk"]. *Journal of Oceanological Research*, 51(1), 133-161. (in Russ.).
2. Rimsky-Korsakov N.A. (2017). Tekhnicheskie sredstva dlya issledovaniy dna akvatorij gidrolokatsionnymi metodami [Technical means for research of the bottom of water areas using sonar methods]. *International Journal of Applied and Basic Research*, 10(2), 205-213. (in Russ.).
3. Liskin V.A., Zareckij A.V., Rimskij-Korsakov N.A. (2019). Razrabotka glubokovodnykh buksiruemykh sistem dlya issledovaniya pridonnoj oblasti okeana [Development of deep-sea towed systems for ocean bottom exploration]. *Scientific Review. Technical Sciences*. (1), 37-42. (in Russ.).
4. Rimsky-Korsakov N.A. Struktura tekhnologii gidrolokatsionnykh issledovaniy dna i podvodnykh ob'ektov [The structure of the technology of sonar research of the bottom and underwater objects]. *Journal of Oceanological Research*. 2017. No. 45(1). P. 187-195. (in Russ.).
5. Rimskij-Korsakov N.A., Liskin V.A., Zareckij A.V. Aspekty tekhnologii okeanologicheskikh issledovaniy s ispol'zovaniem buksiruemykh apparatov [Aspects of oceanographic research technology using towed vehicles]. *International Journal of Applied and Basic Research*. 2018. No. 7. P. 37-43. (in Russ.).
6. Brodskij P.G., Lobanov A.A., Rudenko E.I., Balesnyj Yu.N. (2016). K voprosu razrabotki tekhnologii poiska i identifikatsii podvodnykh potencial'no opasnykh ob'ektov v arkticheskikh moryakh Rossijskoj federatsii [On the development of technology for searching and identifying underwater potentially dangerous objects in the Arctic seas of the Russian Federation]. *Navigation and oceanography*. 2016. Vol. 46. P. 36-44. (in Russ.).
7. Merkin D.R. Vvedenie v mekhaniku gibkoj niti [Introduction to flexible filament mechanics], Nauka Publ, Moskva, Russia, 1980. (in Russ.).
8. Herman D.A., Kostenko V.V., Mokeeva I.G. Choice of ROV's thruster set power according to footprint's radius on steady motion. In *Proceedings of OCEANS'94*. 1994. Vol. 3. P. III-453. IEEE.
9. Pantov E., Mahin N., Sheremetov B. Osnovy teorii dvizheniya podvodnykh apparatov [Fundamentals of the theory of movement of underwater vehicles], Sudostroenie Publ., Leningrad, Russia, 1973. (in Russ.).
10. Kostenko V.V., Mokeeva I.G. Issledovanie harakteristik stacionarnykh rezhimov dvizheniya podvodnoj privyaznoj sistemy "TNPA - kabel' - sudno" [Study of the characteristics of stationary motion modes of the underwater tethered system "ROV-cable-ship"]. *Underwater investigation and robotics*. 2024. No 2(48). P. 12-20. (in Russ.).
11. Evstegneeva A.S. Ispol'zovanie komp'yuternoj programmy Advanced Grapher kak sredstvo realizatsii principa naglyadnosti v processe obucheniya matematike [Using the Advanced Grapher computer program as a means of implementing the principle of visualization in the process of teaching mathematics]. *Young scientist*. 2018. No. 2(188). P. 108-112. (in Russ.).

Information about the authors

KOSTENKO Vladimir V., Ph.D., leading researcher, head laboratory of actuating devices and remote control system

Federal State Budgetary Institution of Science M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems Far East Branch Russian Academy of Sciences,

Address: 5a, Sukhanov Str., Vladivostok, 690950.

Scientific interests: Underwater robotics, motion control systems, propulsion and steering systems, dynamic models, towed systems

Phone : +7 (984) 145-43-85,

E-mail: kostenko@marine.febras.ru, kosten.ko@mail.ru

SPIN-код: 2310-3141

ORCID: 0000-0002-3821-3787

Resercher ID: AAF-6399-2021

Scopus ID: 57189036440

MOKEEVA Irina G., senior researcher, laboratory of actuating devices and remote control system

Federal State Budgetary Institution of Science M.D. Ageev Institute of Marine Technology Problems Far East Branch Russian Academy of Sciences,

Address: 5a, Sukhanov Str., Vladivostok, 690950.

Scientific interests: Underwater robotics, motion modeling of AUV's and ROV's, optimization of propulsion and steering systems, underwater tethering systems

Phone: +7 (423) 243-24-16,

E-mail: pq1205@rambler.ru

ORCID: 0000-0001-6217-6763

