

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БУКСИРУЕМОГО ПОПЛАВКА-РЕТРАНСЛЯТОРА НА ДВИЖЕНИЕ АНПА

В.В. Костенко, И.Г. Мокеева

В статье предлагается расчетно-экспериментальная методика оценки параметров движения автономного необитаемого подводного аппарата при буксировке по поверхности поплавок, обеспечивающего радиосвязь аппарата с удаленным постом управления, а также измерение географических координат подводной привязной системы. В основу методики положен анализ зависимости силовых воздействий на концах буксировочного кабеля от глубины погружения и скорости движения аппарата при фиксированной длине линии связи с поплавком. Для моделирования установившегося движения привязной системы «аппарат – кабель связи – поплавок» использовалась разработанная в ИПМТ ДВО РАН прикладная программа ZONA, основанная на численном интегрировании по длине уравнения гибкой нерастяжимой нити в установившемся потоке. По результатам проведенного моделирования и в соответствии с зависимостью гидродинамического сопротивления аппарата от скорости движения были определены требования к управляющим воздействиям его движительно-рулевого комплекса.

Проведен расчет мощности, потребляемой движительно-рулевым комплексом при установившемся движении аппарата с буксировкой поплавок, основанный на результатах натурных испытаний АНПА и бассейновых испытаний его подруливающего движителя. Результаты этого расчета, проведенного для АНПА ММТ-3500 разработки ИПМТ ДВО РАН, позволили оценить зависимость времени его автономной работы и дальности хода от скорости установившегося движения и глубины погружения аппарата для выбранной длины кабеля связи с поплавком-ретранслятором. В ходе анализа результатов проведенных расчетов выполнена оценка скоростей экономичного движения привязной системы «АНПА – кабель связи – поплавок», обеспечивающих ей максимальные дальности хода.

Ключевые слова: подводная привязная система, АНПА, кабель связи, поплавок-ретранслятор, уравнение гибкой нерастяжимой нити, движительно-рулевой комплекс, мощность потребления, скорость экономичного хода, автономность использования.

Введение

Наиболее перспективным средством проведения подводных обзорно-поисковых работ являются автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА). С помощью АНПА можно проводить гидроакустическое профилирование морского дна, гидроакустическую и маршрутную фотосъемку его поверхности, вертикальное профилирование толщи воды с измерением океанографических параметров, измерение аномалий геомагнитного поля, поиск затонувших объектов, а также разведку подводных месторождений полезных ископаемых [1–10]. Существенно увеличить эффективность использования АНПА можно, обеспечив его высокоскоростную радиос-

вязь с удаленным постом управления (ПУ) в режиме реального времени [11]. Совместная работа АНПА с буксируемым по поверхности поплавок-ретранслятором (ПР) обеспечивает возможность оперативной передачи на ПУ больших объемов информации, накопленных в результате работы системы технического зрения аппарата. Кроме этого, отсутствует необходимость установки в районе выполнения работ гидроакустической навигационной системы с длинной базой, а накопленные бортовой навигационной системой ошибки определения координат периодически корректируются с помощью спутниковой навигационной системы ПР. Такое техническое решение существенно увеличивает производительность обследования протяженных объектов подводной

инфраструктуры типа трубопроводов нефти и газа. Очевидны актуальность и интерес к исследованию параметров установившегося движения АНПА с буксируемым ПР, направленному на увеличение времени автономного использования комплекса и производительности обследования протяженных объектов.

Целью работы является определение зависимости времени автономной работы и дальности хода АНПА ММТ-3500 с буксируемым по поверхности ПР от скорости движения комплекса. Конструктивный облик АНПА и ПР разработки ИПМТ ДВО РАН представлен на рис. 1. Для достижения поставленной цели было проведено моделирование установившегося движения подводной привязной системы (ППС) «АНПА – кабель связи – ПР», основанное на уравнении гибкой нерастяжимой нити в установившемся потоке [12, 13]. Статья содержит введение, пять разделов и заключение. В первом разделе представлен алгоритм расчета силового воздействия кабеля связи на АНПА и ПР, во втором показаны результаты анализа зависимости силового воздействия кабеля на АНПА от глубины погружения и скорости движения аппарата; в третьем разделе проведен анализ потребляемой маршевыми движителями (МД) мощности, основанный на результатах натурных испытаний АНПА; в четвертом дан прогноз зависимости мощности потребления подруливающего движителя (ПД) от создаваемой тяги, основанный на результатах бассейновых испытаний ПД; в пятом разделе определена зависимость времени автономной работы и дальности хода комплекса от скорости и глубины погружения аппарата.

1. Алгоритм расчета силового воздействия кабеля связи на АНПА и ПР

Принятая к расчету схема ППС «АНПА – кабель-трос – ПР» в продольно-вертикальной плоскости показана на рис. 2, где приняты следующие условные обозначения: $O_a X_a Y_a$ – связанная с центром тяжести АНПА система координат корневого конца кабеля; V_6 – скорость движения АНПА судна относительно воды; L – длина кабеля связи; dX, dY – координаты буксируемого ПР относительно АНПА; $O_f X_f Y_f$ – связанная с ПР система координат ходового конца кабеля с началом в точке центра масс поплавка; T_{ax}, T_{ay}, T_{axy} – горизонтальная, вертикальная проекции и результирующая силового воздействия кабеля на АНПА соответственно; F_{ax}, F_{ay} – силовые воздействия ДРК, обеспечивающие движение АНПА с буксируемым ПР; T_{fx}, T_{fy}, T_{fxy} – горизонтальная, вертикальная проекции и результирующая силового воздействия кабеля на ПР соответственно; R_{fx} – гидродинамическое сопротивление ПР при буксировке, Q_f – избыточная плавучесть ПР, которая компенсирует силовое воздействие T_{fy} со стороны кабеля для удержания поплавка на поверхности воды в процессе буксировки.

В режиме движения ПС с установившейся скоростью $V_6 = \text{const}$ кабель связи можно представить как гибкую нерастяжимую нить в равномерно набегающем по глубине потоке. При этом в векторной форме уравнение, определяющее форму кабеля в потоке, имеет следующий вид [12, 13]:

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

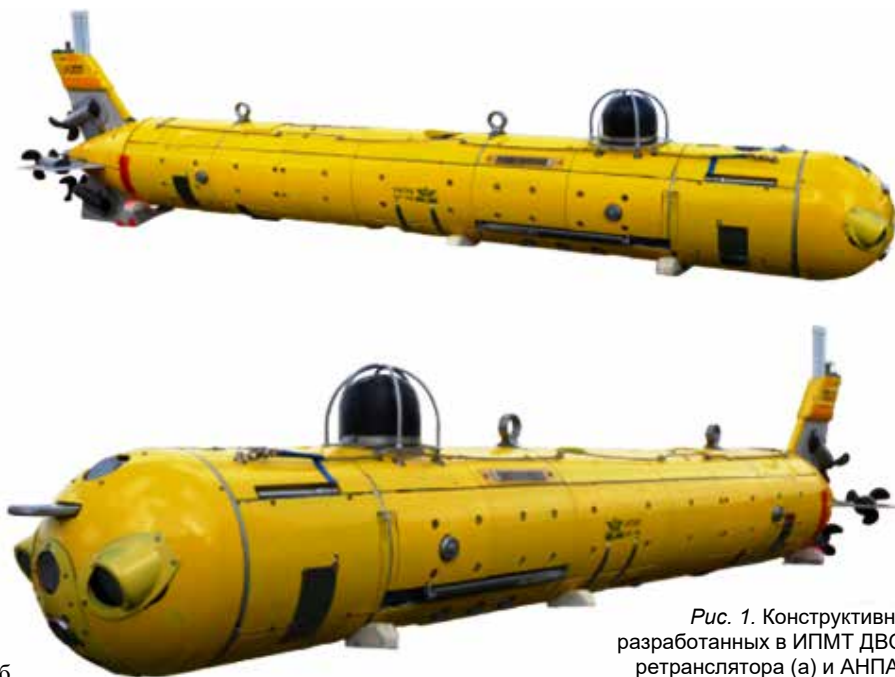


Рис. 1. Конструктивный облик разработанных в ИПМТ ДВО РАН поплавок-ретранслятора (а) и АНПА ММТ-3500 (б)

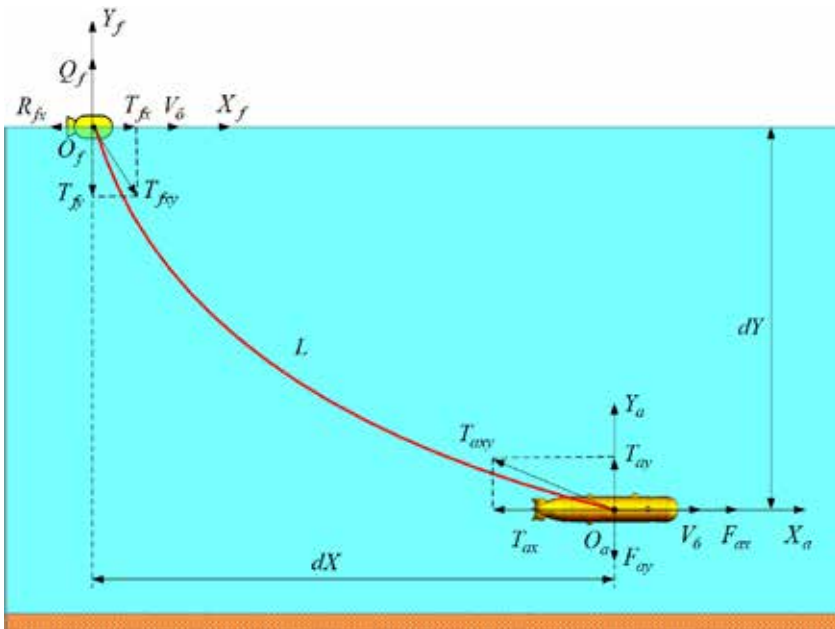


Рис. 2. Расчетная схема подводной привязной системы и действующие силы на концах кабеля связи

где \bar{R} – сила гидродинамического сопротивления, действующая на единицу длины кабеля dl , \bar{q} – вес единицы длины кабеля в воде.

Действующие на единицу кабеля в продольно-вертикальной плоскости силы иллюстрирует рис. 3, где \bar{T} и $\bar{T} + \Delta\bar{T}$ – сила натяжения кабеля в точках M и N элемента dl соответственно; α – угол атаки (угол между касательной τ к кабелю в центре элемента dl с вектором скорости буксировки V_0).

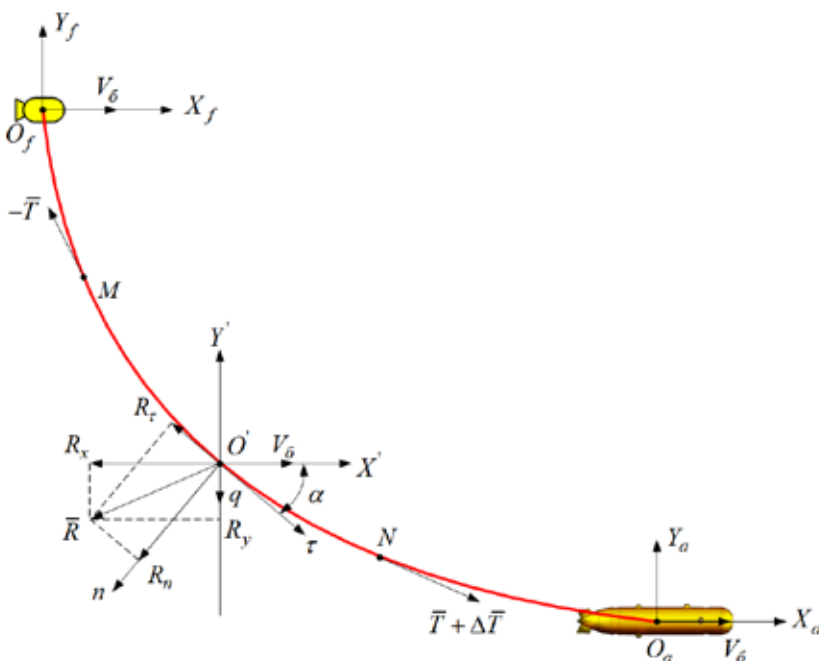


Рис. 3. Силы, действующие на единицу длины кабеля связи при буксировке

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 движения ППС со скоростью буксировки V_0 :

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

где $R_\tau = 0,5\rho dK_\tau V_\tau |V_\tau|$
 $R_n = 0,5\rho dK_n V_n |V_n|$ – нормальная и тангенциальная составляющие сопротивления элемента кабеля соответственно; $V_n = V_0 \sin \alpha$, $V_\tau = V_0 \cos \alpha$ – 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 $\bar{V}_1 = \bar{V}_0 / V_0$ – единичный вектор скорости буксировки, $V_0 = \sqrt{\bar{V}_0 \cdot \bar{V}_0}$, $\bar{V}_0 \cdot \bar{V}_0$ – 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 и его натяжение \bar{T} , то, интегрируя систему (2) по длине, можно определить координаты точки крепления кабеля к ПР, а значит, и его координаты относительно АНПА. При условии наличия у ПР запаса плавучести Q_p компенсирующего вертикальную проекцию натяжения кабеля T_{fy} , горизонтальная составляющая натяжения T_{fx} обусловлена силой гидродина-

мического сопротивления погруженного в воду объема [14]:

$$R_{fx} = C_{fx} \frac{\rho V_6^2}{2} U_f^{2/3} \quad (4)$$

где C_{fx} – коэффициент гидродинамического сопротивления ПР, а U_f – его водоизмещение, необходимое для удержания поплавка на поверхности воды.

Методика расчета конфигурации кабеля и натяжения на его концах, основанная на уравнениях гибкой нерастяжимой нити (1) и (2) и использующая алгоритмы итерационного поиска координат ходового конца кабеля относительно АНПА в связанной с ним системе координат $O_a X_a Y_a$, при заданных значениях глубины погружения аппарата dY и скорости его движения V_6 , длины кабеля связи L , а также гидродинамического сопротивления ПР R_{fx} , была реализована в прикладной программе ZONA разработки ИПМТ ДВО РАН [13].

2. Расчет зависимости натяжения на концах кабеля связи от глубины погружения и скорости движения АНПА

Цель расчета заключалась в определении натяжения на концах и формы кабеля связи длиной $L=50$ м от скорости буксировки из диапазона $V_6=0,2 \div 1,0$ м/с для четырех значений глубины погружения АНПА $dY=40,30,20,10$ м. Исходные данные, принятые для моделирования, сведены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные для моделирования установившегося движения ППС «АНПА – кабель – ПР»

Наименование характеристики	Значение
Диаметр кабеля связи (D), м	0,006
Плавучесть кабеля связи (q), кг/м	0,0
Длина кабеля связи (L), м	50
Нормальный коэффициент сопротивления кабеля (K_n)	1,200
Тангенциальный коэффициент сопротивления кабеля (K_t)	0,025
Водоизмещение ПР (U_p), м ³	0,028±0,046
Коэффициент гидродинамического сопротивления ПР (C_x)	0,2
Запас остаточной плавучести ПР (Q_a), Н	190
Плотность морской воды (ρ_a), кг/м ³	1025

Ниже приведены результаты проведенного расчета, где на рисунках 4–7 показана форма кабеля связи длиной 50 м на скоростях буксировки 0,2 и 1,0 м/с, соответствующая глубинам погружения АНПА 40,

30, 20 и 10 м. Анализ этих рисунков показывает, что форма кабеля определяется глубиной погружения аппарата и практически не зависит от скорости буксировки.

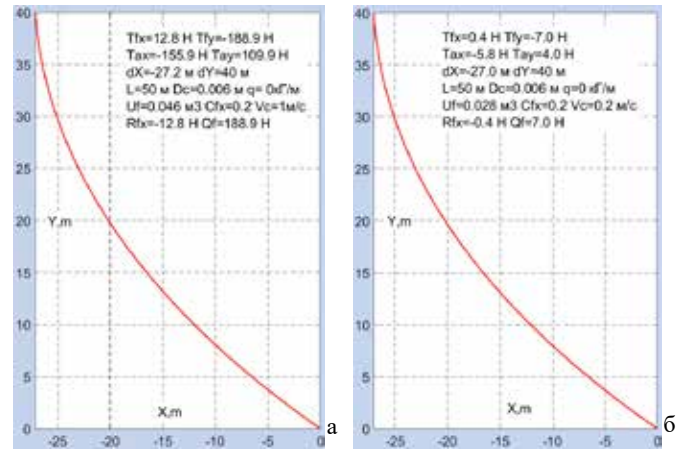


Рис. 4. Форма кабеля связи и натяжение на его концах при $L=50$ м и $H_a=40$ м: а) $V_6=1,0$ м/с; б) $V_6=0,2$ м/с

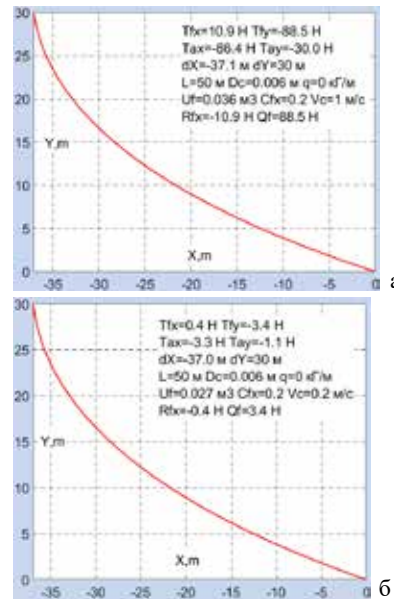


Рис. 5. Форма кабеля связи и натяжение на его концах при $L=50$ м и $dY=30$ м: а) $V_6=1,0$ м/с; б) $V_6=0,2$ м/с

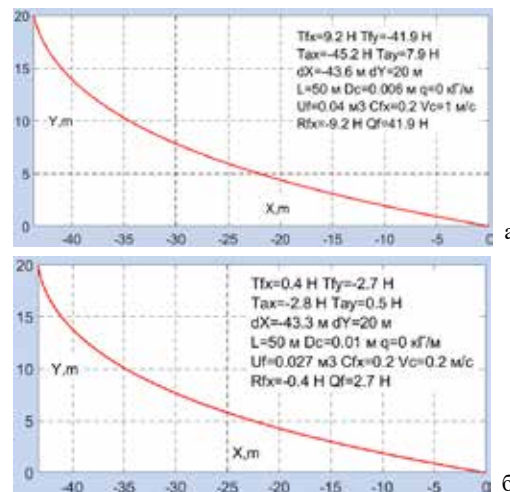


Рис. 6. Форма кабеля связи и натяжение на его концах при $L=50$ м и $dY=20$ м: а) $V_6=1,0$ м/с; б) $V_6=0,2$ м/с

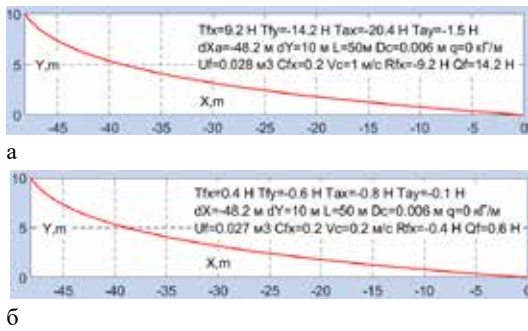


Рис. 7. Форма кабеля связи и натяжение на его концах при $L=50$ м и $dY=10$ м: а) $V_6=1,0$ м/с; б) $V_6=0,2$ м/с

Зависимость натяжения кабеля со стороны поплавка иллюстрируют табл. 2 и графики рис. 8, а со стороны АНПА – рис. 9 и табл. 3, где U_f – погруженный для компенсации вертикальной проекции натяжения кабеля T_{fy} объем ПР, который определяет его сопротивление R_{fx} в соответствии с выражением (4).

Таблица 2. Результаты расчета натяжения кабеля связи со стороны АНПА

$V_6, \text{ м/с}$	$dY=40$ м		$dY=30$ м		$dY=20$ м		$dY=10$ м	
	$T_{ax}, \text{ Н}$	$T_{ay}, \text{ Н}$	$T_{ax}, \text{ Н}$	$T_{ay}, \text{ Н}$	$T_{ax}, \text{ Н}$	$T_{ay}, \text{ Н}$	$T_{ax}, \text{ Н}$	$T_{ay}, \text{ Н}$
1,0	-155,5	109,4	-87,5	30,7	-47,1	8,4	-22,2	1,7
0,9	-124,4	87,7	-70,5	24,7	-38,1	6,8	-18,0	1,4
0,8	-97,3	68,6	-55,4	19,4	-30,0	5,4	-14,2	1,1
0,7	-73,8	52,0	-42,2	14,8	-22,9	4,1	-10,9	0,9
0,6	-53,8	37,9	-30,9	10,9	-16,8	3,0	-8,0	0,6
0,5	-37,1	26,2	-21,4	7,5	-11,7	2,1	-5,5	0,4
0,4	-23,6	16,7	-13,7	4,8	-7,4	1,3	-3,5	0,3
0,3	-13,2	9,3	-7,7	2,7	-4,2	0,8	-2,0	0,2
0,2	-5,9	4,1	-3,4	1,2	-1,9	0,3	-0,9	0,1

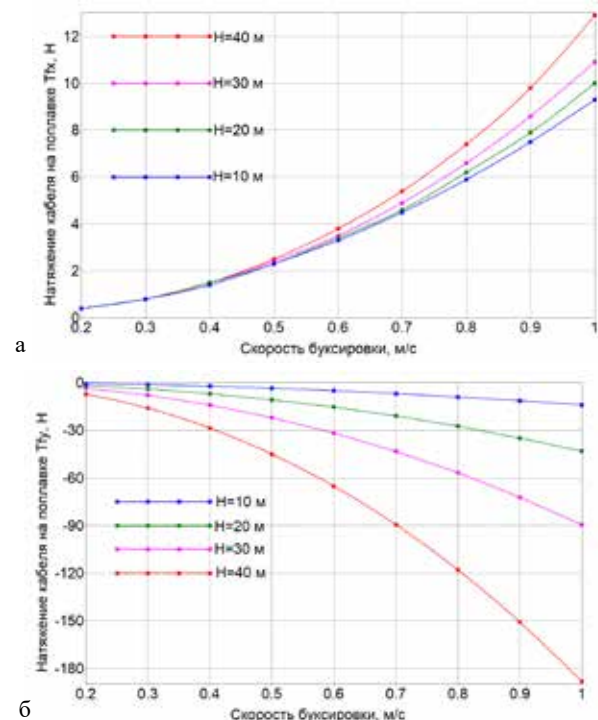
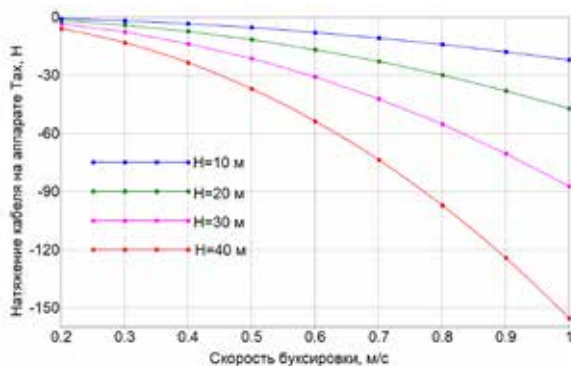


Рис. 9. Горизонтальное (а) и вертикальное (б) натяжение кабеля связи со стороны поплавка

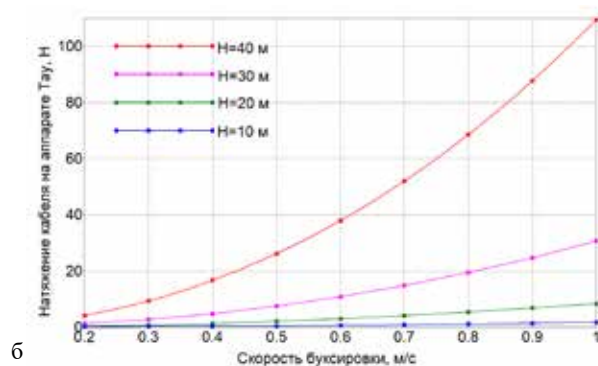


Рис. 8. Горизонтальное (а) и вертикальное (б) натяжение кабеля связи со стороны АНПА

Таблица 3. Результаты расчета натяжения кабеля связи со стороны поплавка

$V_6, \text{ м/с}$	$dY=40$ м, $dX=-27$ м			$dY=30$ м, $dX=-37$ м			$dY=20$ м, $dX=-44$ м			$dY=10$ м, $dX=-48$ м		
	$U_f, \text{ м}^3$	$T_{fx}, \text{ Н}$	$T_{fy}, \text{ Н}$	$U_f, \text{ м}^3$	$T_{fx}, \text{ Н}$	$T_{fy}, \text{ Н}$	$U_f, \text{ м}^3$	$T_{fx}, \text{ Н}$	$T_{fy}, \text{ Н}$	$U_f, \text{ м}^3$	$T_{fx}, \text{ Н}$	$T_{fy}, \text{ Н}$
1,0	0,046	12,9	-188,3	0,036	10,9	-89,5	0,031	10,0	-43,1	0,028	9,3	-14,1
0,9	0,042	9,8	-150,8	0,034	8,6	-72,1	0,031	7,9	-34,8	0,028	7,5	-11,4
0,8	0,039	7,4	-117,9	0,033	6,6	-56,7	0,030	6,2	-27,4	0,028	5,9	-9,0
0,7	0,036	5,4	-89,4	0,031	4,9	-43,2	0,029	4,6	-21,0	0,028	4,5	-6,9
0,6	0,034	3,8	-65,2	0,030	3,5	-31,6	0,029	3,4	-15,4	0,028	3,3	-5,0
0,5	0,032	2,5	-45,0	0,029	2,4	-21,9	0,028	2,3	-10,7	0,027	2,3	-3,5
0,4	0,030	1,5	-28,6	0,028	1,5	-14,0	0,028	1,5	-6,8	0,027	1,4	-2,2
0,3	0,029	0,8	-16,0	0,028	0,8	-7,8	0,027	0,8	-3,8	0,027	0,8	-1,3
0,2	0,028	0,4	-7,1	0,027	0,4	-3,5	0,027	0,4	-1,7	0,027	0,4	-0,6

3. Анализ потребляемой маршевыми двигателями АНПА ММТ-3500 мощности на движение по результатам натуральных испытаний

Для оценки потребляемой АНПА ММТ-3500 мощности на движение 03.09.2024 г. был проведен испытательный запуск аппарата в условиях мелко-водного полигона бухты Патрокл (г. Владивосток) в режиме стабилизации глубины погружения 7 м с целевыми скоростями установившегося движения в диапазоне 0,4–2 м/с сначала курсом 240° , а затем встречным курсом 60° . Зарегистрированную в ходе этого запуска скорость движения АНПА по доплеровскому лагу иллюстрирует рис. 10, а потребляемую двигателями мощность – рис. 11. При этом электрическая мощность, необходимая для движения аппарата, оценивалась по экспериментальным данным о токах потребления гребного электропривода маршевых двигателей и напряжению бортового источника питания.

Полученная в ходе экспериментального запуска АНПА ММТ-3500 зависимость потребляемой двигателями мощности от скорости движения аппарата $N_{\text{мд}}(V_x)$ приведена на табл. 4 и иллюстрируется рис. 11.

Регрессионный анализ графика рис. 11, проведенный средствами программы Advanced Grapher [15], выявил возможность использования аналитического

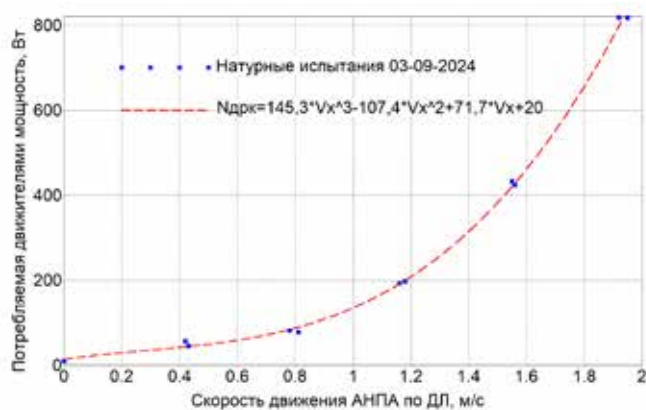


Рис. 11. Зависимость мощности потребления маршевых двигателей АНПА ММТ-3500 от скорости движения

представления зависимости $N_{\text{мд}}(V_x)$ следующим образом:

$$N_{\text{мд}}(V_x) = K_{v3}V_x^3 + K_{v2}V_x^2 + K_{v1}V_x + K_{v0}, \quad (5)$$

где $K_{v3}=145,3$ Вт·с³/м³, $K_{v2}=-107,4$ Вт·с²/м², $K_{v1}=71,7$ Вт·с/м, $K_{v0}=20$ Вт – коэффициенты интерполирующего полинома зависимости.

Анализ результатов вычислительного эксперимента по виртуальной продувке 3D модели АНПА ММТ-3500 [16], приведенных на рис. 12, показал возможность использования следующей зависимости гидродинамического сопротивления аппарата R_{ax} от скорости набегающего потока V_x :

$$R_{\text{ax}}(V_x) = K_{\text{гс}}V_x^2 \quad (6)$$

где $K_{\text{гс}} = 40,1$ – коэффициент гидродинамического сопротивления АНПА, кг/м.

Таблица 4. Результаты исследования потребляемой АНПА ММТ-3500 мощности на движение

N этапа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{\text{дл}}$, м/с	0,42	0,78	1,18	1,55	1,92	1,95	1,56	1,16	0,81	0,43
$N_{\text{мд}}$, Вт	56,5	81,7	197,0	432,0	818,0	817,0	424,0	192,0	78,0	46,0

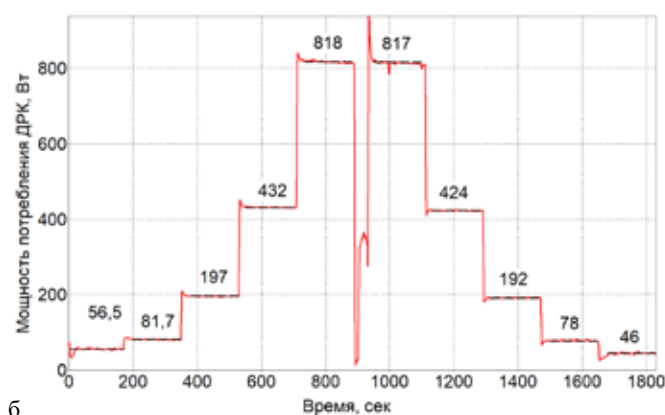
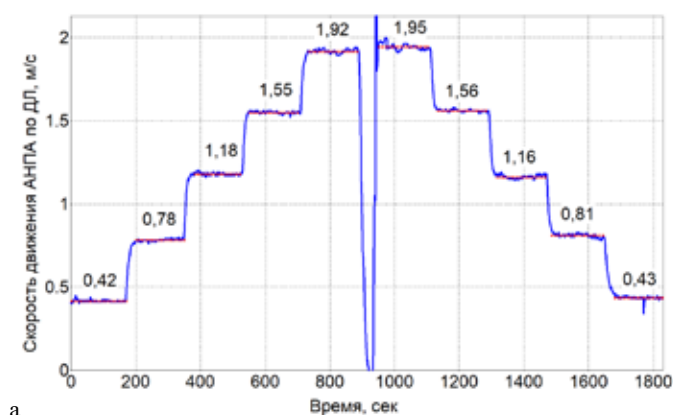


Рис. 10. Результаты натуральных испытаний АНПА ММТ-3500: а) скорость движения по ДЛ; б) мощность потребления двигателей от АБ

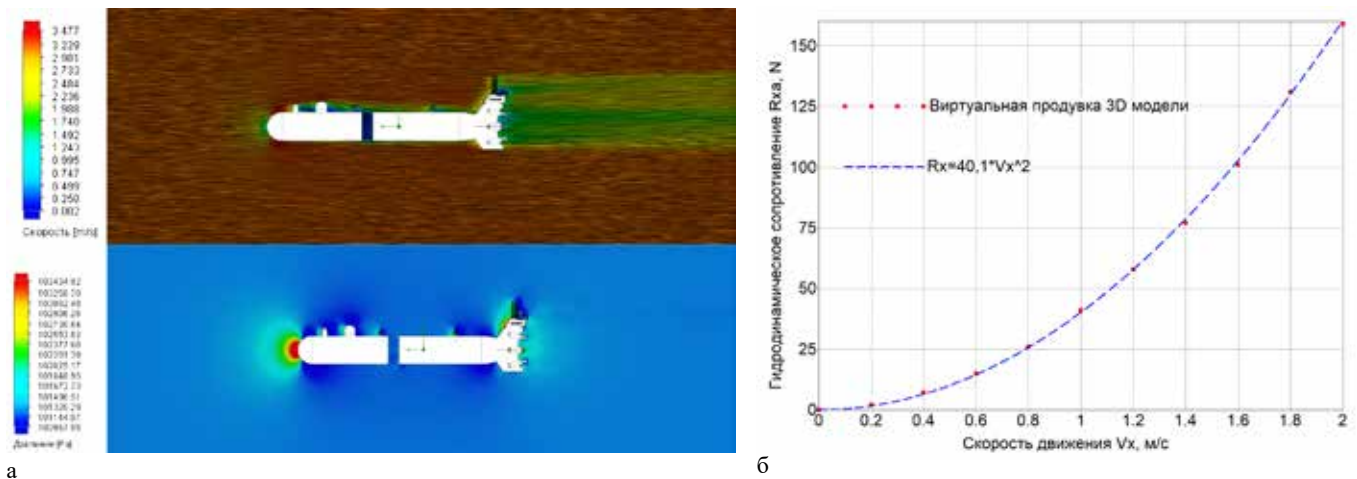


Рис. 12. Результаты виртуальной продувки 3D модели АНПА ММТ-3500:
а) картины линии тока и давления б) зависимость лобового сопротивления от скорости хода

В соответствии с выражением (6) для экспериментальных значений скорости по ДЛ из таблицы 4 было определено гидродинамическое сопротивление АНПА, которое компенсируется соответствующей продольной тягой F_x движительно-рулевого комплекса (ДРК) аппарата. При этом для выявления зависимости мощности потребления МД от требуемой тяги F_x для движения аппарата с соответствующей скоростью можно таблицу 4 привести к следующему виду:

Таблица 5. Зависимость потребляемой АНПА «ММТ-3500» мощности от создаваемой ДРК продольной тяги

$V_{дл}$, м/с	0,42	0,78	1,18	1,55	1,92	1,95	1,56	1,16	0,81	0,43
F_x , Н	7,1	24,4	55,8	96,3	147,8	152,5	97,6	54,0	26,3	7,4
$N_{мд}$, Вт	56,5	81,7	197,0	432,0	818,0	817,0	424,0	192,0	78,0	46,0

График зависимости $N_{мд}(F_x)$, построенной в соответствии с табл. 5, показан на рис. 13.

В результате использования регрессионного анализа [15] графика рисунка 13 была определена аналитическая форма представления зависимости $N_{мд}(F_x)$:

$$N_{мд}(F_x) = K_{fx3}F_x^3 + K_{fx2}F_x^2 + K_{fx1}F_x + K_{fx0}, \quad (7)$$

где $K_{fx3}=0,0023$ Вт/Н³, $K_{fx2}=-0,08$ Вт/Н², $K_{fx1}=2,44$ Вт/Н, $K_{fx0}=14$ Вт – коэффициенты интерполирующего полинома зависимости.

4. Прогноз мощности потребления подруливающего двигателя при компенсации вертикального натяжения кабеля со стороны АНПА

Примем допущение о малом влиянии на тягу ПД поперечного набегающего потока, вызванного уста-

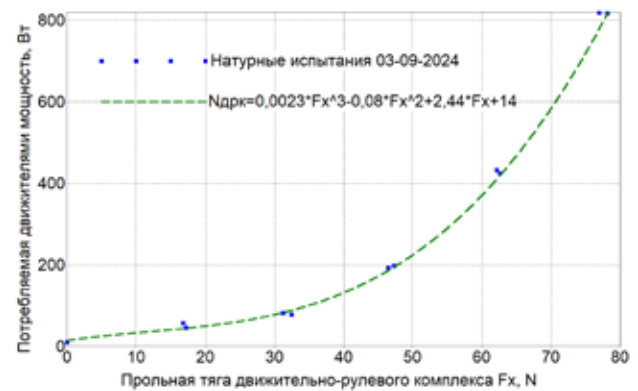


Рис. 13. Зависимость мощности потребления двигателей от создаваемой для движения аппарата тяги

новившимся движением аппарата при буксировке. При этом зависимость потребляемой ПД мощности от создаваемой тяги можно оценить по результатам бассейновых испытаний двигателя в швартовном режиме, которые показаны на рис. 14 и сведены в табл. 6, где приняты следующие обозначения: N_y – код управления, $F_{пд}$ – швартовный упор, $N_{пд}$ – потребляемая мощность.

Таблица 6. Результаты бассейновых испытаний подруливающего двигателя АНПА ММТ-3500

N_y	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20
$F_{пд}$, Н	-68,7	-59,9	-49,8	-39,8	-30,3	-20,9	-12,8	-5,6
$N_{пд}$, Вт	302	237	176	124	82	49	26	12
N_y	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{пд}$, Н	4,5	10,4	17,4	24,8	33,1	41,7	49,9	58,2
$N_{пд}$, Вт	11	25	46	77	117	168	226	292

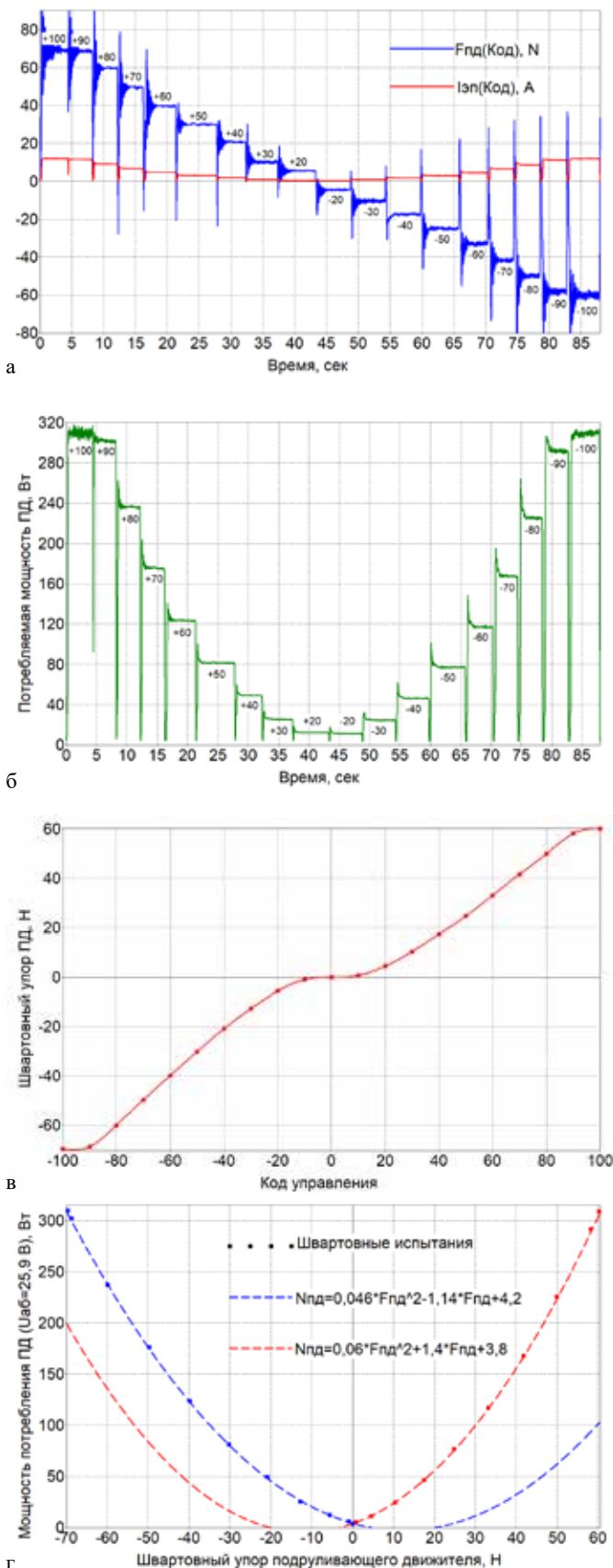


Рис. 14. Результаты швартовых испытаний подруливающего двигателя АНПА ММТ-3500: а) швартовый упор и ток потребления, б) потребляемая мощность, в) зависимость упора от кода управления, г) зависимость мощности потребления от создаваемого упора

В результате регрессионного анализа зависимости $N_{нд}(F_{нд})$, показанной на рис. 14, г, была определена ее аналитическая форма:

$$N_{нд}(F_{нд}) = \begin{cases} K_{+fy2}F_{нд}^2 + K_{+fy1}F_{нд} + K_{+fy0} & \text{для } F_{нд} \geq 0 \\ K_{-fy2}F_{нд}^2 + K_{-fy1}F_{нд} + K_{-fy0} & \text{для } F_{нд} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

где $K_{+fy2}=0,06$ Вт/Н², $K_{+fy1}=1,4$ Вт/Н, $K_{+fy0}=3,8$ Вт, $K_{-fy2}=0,046$ Вт/Н², $K_{-fy1}=-1,14$ Вт/Н, $K_{-fy0}=4,2$ Вт – коэффициенты интерполирующего полинома зависимости $N_{нд}(F_{нд})$.

5. Расчет зависимости эксплуатационных параметров комплекса «АНПА – кабель связи – ПР» от скорости буксировки и глубины погружения аппарата

Главными эксплуатационными параметрами АНПА являются время его автономной работы T_a и дальность хода D_a при заранее обусловленных значениях энергоемкости аккумуляторной батареи $E_{аб}$, скорости движения V_x и потребляемой системами аппарата мощности $N_{анпа}$. Очевидна справедливость соотношений [1, 3, 6]:

$$\begin{aligned} T_a &= E_{аб} / N_{анпа}, \\ D_a &= V_x T_a; \end{aligned} \quad (9)$$

где $N_{анпа} = N_{рза} + N_{дрк}$ – суммарная электрическая мощность потребления АНПА от аккумуляторной батареи (АБ), $N_{рза}$ – электрическая мощность, постоянно потребляемая оборудованием аппарата без учета ДРК, $N_{дрк} = N_{мд} + N_{нд}$ – электрическая мощность потребления электроприводов ДРК.

Мощность потребления МД будет соответствовать выражению (7) и определяться требуемой от ДРК продольной тяги $F_x = R_{ax} + T_{ax}$, необходимой для компенсации как гидродинамического сопротивления АНПА R_{ax} , так и горизонтальной составляющей натяжения кабеля связи со стороны аппарата T_{ax} . Если принять допущение о том, что точка крепления кабеля связи к аппарату находится на оси вращения ПД, то компенсация вертикального натяжения кабеля будет компенсироваться только этим движителем, а потребляемая им мощность $N_{нд}(T_{ay})$ вычисляется по выражению (8). Результаты расчета зависимости $N_{дрк}(V_x)$, проведенного с учетом данных о натяжении кабеля связи со стороны АНПА из табл. 2 и собственном сопротивлении аппарата R_{ax} с использованием соотношений (7) и (8), сведены в табл. 7 и показаны на рис. 15.

Мощность потребления радиоэлектронного оборудования обзорно-поискового АНПА без учета ДРК

Таблица 7. Зависимость мощности потребления ДРК АНПА ММТ-3500 от скорости буксировки ПР, Вт

$V_{б'}$, м/с		0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$dY=40$ м	$N_{мд}$	29	43	77	192	539	1420	3380	7308	14643
	$N_{пд}$	10	19	36	66	114	188	299	458	679
	$N_{дрк}$	39	62	113	258	652	1608	3678	7766	15322
$dY=30$ м	$N_{мд}$	25	35	49	83	175	404	912	1927	3800
	$N_{пд}$	6	8	11	15	22	31	44	60	82
	$N_{дрк}$	31	43	60	98	197	435	955	1987	3883
$dY=20$ м	$N_{мд}$	22	29	39	53	82	150	298	595	1143
	$N_{пд}$	5	5	6	7	8	10	12	14	17
	$N_{дрк}$	27	34	45	60	90	160	310	609	1161
$dY=10$ м	$N_{мд}$	20	26	33	41	54	79	130	229	412
	$N_{пд}$	4	4	5	5	5	5	6	6	6
	$N_{дрк}$	24	30	38	46	59	84	136	235	418

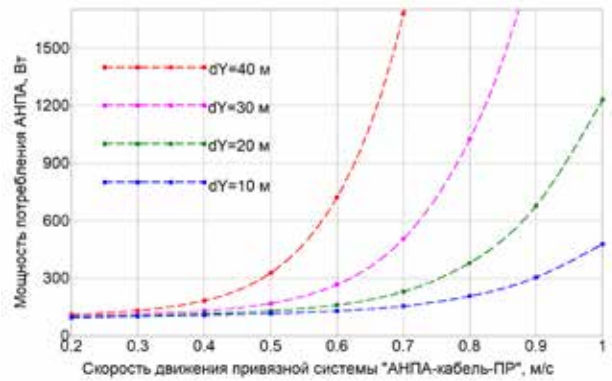


Рис. 16. Зависимость общей мощности потребления АНПА ММТ-3500 от скорости движения при буксировке ПР

Результаты расчета параметров автономности АНПА, проведенные по соотношениям (9) для $E_{аб} = 2849$ Вт·час и $N_{рза} = 70$ Вт, сведены в табл. 8 и иллюстрируются графиками рис. 17.

можно представить суммой следующих слагаемых:

$$N_{рза} = N_{су} + N_{гбо} + N_{гбо}, \quad (10)$$

где $N_{су}$ – мощность потребления электронного оборудования системы управления АНПА (система бортового управления, навигационные датчики, контрольная аварийная система, оборудование локальной вычислительной сети), $N_{гбо}$ – мощность потребления гидролокатора бокового обзора (ГБО), $N_{млэ}$ – мощность потребления многолучевого эхолота (МЛЭ). В ходе опытной эксплуатации и натурных испытаний АНПА ММТ-3500, оборудованного ГБО разработки ИПМТ ДВО РАН и МЛЭ R2 Sonic 2020 от фирмы R2 Sonic LLT (США), установлено, что средняя мощность потребления $N_{рза} \approx 70$ Вт. Графики зависимости общей потребляемой мощности АНПА $N_{анпа} = N_{рза} + N_{дрк}$ при буксировке ПР от скорости движения и глубины погружения аппарата приведены на рис. 16.

Таблица 8. Результаты расчета зависимости параметров автономности использования АНПА от скорости движения при буксировке поплавка-ретранслятора ($E_{аб} = 2849$ Вт·час, $N_{рза} = 70$ Вт)

$V_{б'}$, м/с	$dY=40$ м		$dY=30$ м		$dY=20$ м		$dY=10$ м	
	$T_{а'}$, час	$D_{а'}$, км	$T_{а'}$, час	$D_{а'}$, км	$T_{а'}$, час	$D_{а'}$, км	$T_{а'}$, час	$D_{а'}$, км
1,0	0,19	0,67	0,72	2,59	2,32	8,33	5,83	21,00
0,9	0,36	1,18	1,38	4,49	4,19	13,59	9,35	30,28
0,8	0,76	2,19	2,78	8,00	7,49	21,58	13,87	39,95
0,7	1,70	4,28	5,64	14,22	12,39	31,22	18,44	46,47
0,6	3,94	8,52	10,68	23,08	17,77	38,38	22,03	47,58
0,5	8,69	15,65	16,92	30,45	22,00	39,60	24,57	44,22
0,4	15,53	22,37	21,90	31,54	24,91	35,86	26,59	38,29
0,3	21,54	23,27	25,38	27,41	27,31	29,49	28,51	30,79
0,2	26,28	18,92	28,45	20,49	29,62	21,33	30,34	21,85

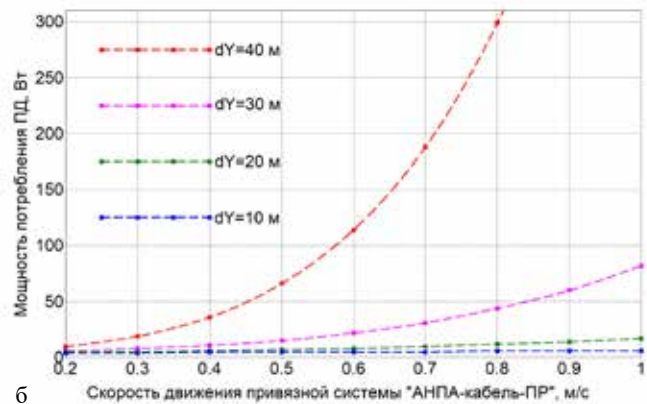
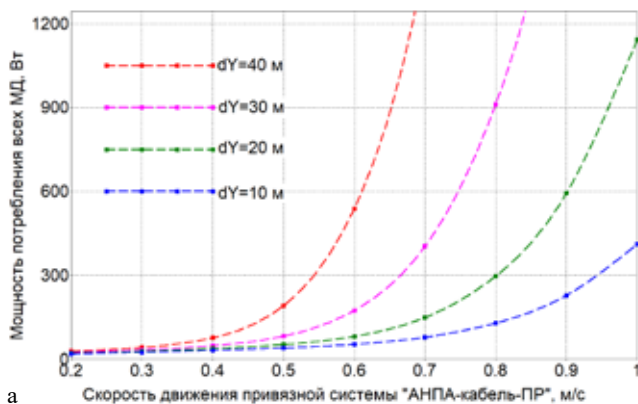


Рис. 15. Зависимость мощности потребления ДРК АНПА ММТ-3500 от скорости движения при буксировке ПР: а) мощность потребления МД; б) мощность потребления ВГД

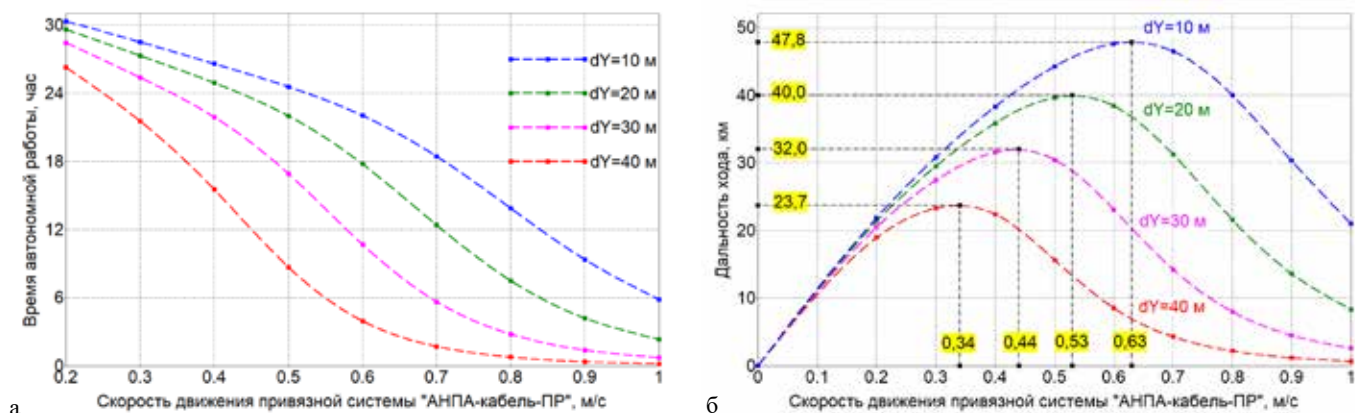


Рис. 17. Зависимость параметров автономности использования ММТ-3500 от скорости движения при буксировке ПР: а) время автономной работы; б) дальность хода

В результате анализа графиков рис. 17, б установлено наличие выраженных экстремумов зависимости $D_a(V_x)$. Средствами программы Advanced Grapher [15] были найдены значения скоростей экономного движения ППС, обеспечивающие максимальную дальность хода аппарата. Результаты этого анализа сведены в табл. 9 и могут быть использованы при планировании маршрутного задания АНПА для проведения обзорно-поисковых исследований.

Таблица 9. Анализ режимов движения с максимальной дальностью хода АНПА ММТ-3500 при буксировке ПР

dY , м	$V_{эx}$, м/с	T_a , час	D_a , км
40	0,34	19,4	23,7
30	0,44	20,2	32,0
20	0,53	20,9	40,0
10	0,63	21,1	47,8

Заключение

Анализ результатов проведенного исследования позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Разработана расчетно-экспериментальная методика оценки зависимости дальности хода и времени автономности от скорости движения АНПА при буксировке по поверхности поплавка-ретранслятора.

2. Проведено моделирование установившегося движения подводной привязной системы «АНПА – кабель связи – ПР» с использованием программы ZONA разработки ИПМТ ДВО РАН, основанной на численном интегрировании по длине уравнения гибкой нерастяжимой нити.

3. В результате проведенного моделирования установлена зависимость силовых воздействий кабеля связи фиксированной длины 50 м на АНПА и ПР от установившейся скорости буксировки в диапазоне 0,2÷1,0 м/с для глубин погружения аппарата 40–30–20–10 м. При этом установлено, что форма кабеля связи фиксированной длины определяется глубиной погружения АНПА и практически не зависит от скорости буксировки

4. Проведен анализ потребляемой маршевыми движителями мощности на движение по результатам натурных испытаний АНПА ММТ-3500. Установлена ее зависимость от скорости движения аппарата, измеряемой бортовым доплеровским лагом. Использование результатов виртуальной продувки 3D модели аппарата позволило также установить зависимость потребляемой МД мощности при движении аппарата от создаваемой продольной тяги ДРК.

5. Принято допущение о незначительном влиянии установившегося движения АНПА при буксировке на тягу вертикального ПД, которое позволило оценить зависимость потребляемой им мощности от создаваемой тяги по результатам бассейновых испытаний движителя в швартовном режиме.

6. Определена зависимость потребляемой АНПА мощности при буксировке ПР, а также времени его автономной работы и дальности хода от скорости установившегося движения аппарата. Анализ этих зависимостей выявил наличие экстремумов функции $D_a(V_x)$, которым соответствуют скорости экономичного хода в диапазоне 0,34÷0,63 м/с для глубин движения АНПА 40÷10 м.

7. Результаты проведенных исследований могут быть использованы для оптимального планирования маршрутного задания АНПА при проведении обзорно-поисковых исследований протяженных объектов подводной инфраструктуры в мелководных акваториях.

8. Дальнейшие исследования будут направлены на теоретическое обоснование технических решений регулирования оптимальной длины кабеля связи между АНПА и ПР, обеспечивающей максимальную дальность хода комплекса для требуемой глубины погружения 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).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Киселев Л.В. и др. Автоматические подводные аппараты. Л.: Судостроение, 1981. 223 с.
2. Nicholson J. W., Healey A. J. The present state of autonomous underwater vehicle (AUV) applications and technologies // Marine Technology Society Journal. 2008. Т. 42. № 1. С. 44–51.
3. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы: системы и технологии / под общ. ред. М.Д. Агеева, М.: Наука, 2005. 223 с.
4. Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Рылов Н.И. Мониторинг морского дна с применением технологий интеллектуальной обработки данных поисковых устройств на борту автономного необитаемого подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. – 2015. № 2 (20). С. 20–27.
5. Матвиенко Ю.В. и др. Перспективы повышения эффективности автономных подводных роботов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2016. № 1 (174). С. 123–141.
6. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / [отв. ред. Л.В. Киселев]; ФБГУН Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН. Владивосток, 2018. 368 с.
7. Sánchez P.J.B., Papealías M., Márquez F.P.G. Autonomous underwater vehicles: Instrumentation and measurements // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2020. Vol. 23. No. 2. P. 105–114.
8. Борейко А.А. и др. Результаты и перспективы использования АНПА в комплексных экспедиционных исследованиях // Перспективные системы и задачи управления. 2022. С. 388–391.
9. Володин А.Н., Панасенко В.В., Хорошев В.А. Анализ и перспективы развития автономных необитаемых подводных аппаратов // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника. 2022. С. 198–204.
10. Щербатюк А.Ф. Перспективы использования автономной подводной робототехники для мониторинга портовых акваторий // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023). 2023. С. 1055.
11. Костенко В.В., Львов О.Ю. Комбинированная система связи и навигации автономного подводного робота с поплавковым модулем // Подводные исследования и робототехника. 2017. №1 (23). С. 31–43.
12. Меркин Д.Р. Введение в механику гибкой нити. М.: Наука, 1980. 240 с.
13. Костенко В.В., Мокеева И.Г. Исследование характеристик установившихся режимов и динамики привязной системы автономного подводного робота с буксируемым поверхностным модулем радиосвязи // Подводные исследования и робототехника. 2020. №2 (32). С. 34–41.
14. Пантов Е.Н. и др. Основы теории движения подводных аппаратов / Е.Н. Пантов, Н.Н. Махин, Б.Б. Шереметов. Л.: Судостроение, 1973. 211 с.
15. 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.
16. Kostenko V., Pryazhennikov P. Methodology for the Development and Design of the AUV Propulsion System // 2025 International Conference on Ocean Studies (ICOS). Vladivostok, Russian Federation, 2025. P. 011–017. DOI: 10.1109/ICOS67841.2025.11371639.

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

Для цитирования:

Костенко В.В., Мокеева И.Г. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БУКСИРУЕМОГО ПОПЛАВКА-РЕТРАНСПЛЯТОРА НА ДВИЖЕНИЕ АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2026. № 2 (56). С. 60–69. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_56_02_03. EDN: QYAUHL.

STUDY OF THE INFLUENCE OF A TOWED REPEATER FLOAT ON THE MOVEMENT OF AUV

V.V. Kostenko, I.G. Mokeeva

The article proposes a computational and experimental method for assessing the motion parameters of an autonomous unmanned underwater vehicle when towing a float along the surface, which provides radio communication between the vehicle and a remote control post, as well as measuring the geographic coordinates of the underwater tethered system. The methodology is based on the analysis of the dependence of the force effects at the ends of the towing cable on the immersion depth and speed of the underwater vehicle with a fixed length of the communication line with the float. To simulate the steady-state motion of the tethered system “underwater vehicle – communication cable – float”, the ZONA application program was used, based on numerical integration over the length of the equation of a flexible inextensible thread in a steady flow. Based on the results of the simulation and in accordance with the dependence of the AUV’s hydrodynamic resistance on the speed of movement, the requirements for the control actions of its propulsion and steering system were determined. The calculation of the power consumed by the propulsion and steering system for the AUV’s steady motion during towing of the float was carried out, based on the results of full-scale tests of the vehicle and pool tests of its vertical thruster. The results of this calculation, carried out for the MMT-3500 AUV developed by IMTP FEBRAS, made it possible to estimate the dependence of its autonomous operating time and range on the speed of steady movement and the immersion depth of the vehicle for the selected length of the communication cable with the repeater float. During the analysis of the results of the calculations, an assessment was made of the speeds of economical movement of the tethered system “AUV – communication cable – float”, providing it with maximum cruising ranges.

Keywords: underwater tethered system, AUV, communication cable, repeater float, flexible inextensible line equation, propulsion and steering complex, power consumption for movement, economy speed, autonomy of use, cruising range.

References

1. Unmanned Free Submersibles / Ageev M.D., Kasatkin B.A., Kiselev L.V., et al. L: Sudostroenie, 1981. 224 p. (In Russian).
2. Nicholson J.W., Healey A.J. The present state of autonomous underwater vehicle (AUV) applications and technologies // *Marine Technology Society Journal*. 2008. Vol. 42, No. 1. P. 44–51.
3. Autonomous underwater robots: systems and technology / M.D. Ageev, L.V. Kiselev, Yu.V. Matvienko; Edited by M.D. Ageev / [Executive Ed. L.V. Kiselev]; Institute of Marine Technology Problems. M.: Nauka, 2005. 398 p. (In Russian).
4. Inzarcev A.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Rylov N.I. Monitoring morskogo dna s primeneniem tekhnologij intellektual’noj obrabotki dannyh poiskovyh ustrojstv na bortu avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Seabed monitoring using intelligent data processing technologies from search devices on board an autonomous underwater vehicle]. *Underwater investigation and robotics*. 2005. Vol. 2, No. 20. P. 20–27. (in Russia).
5. Matvienko Yu.V., Inzarcev A.V., Kiselev L.V., Shcherbatyuk A.F. Perspektivy povysheniya effektivnosti avtonomnykh podvodnykh robotov [Prospects for improving the efficiency of autonomous underwater robots] // *News of the Southern Federal University. Technical Sciences*. 2016. 1(174). P. 123–141. (in Russia).
6. Inzartsev A., Kiselev L., Kostenko V., Matvienko Yu., Pavin A., Shcherbatyuk A. Underwater robotic complexes: systems, technologies, application. Ed. by L. Kiselev. FSB Institute of Problems of Marine Technologies FEB RAS: Vladivostok, 2018. 368 p. (In Russian).
7. Sánchez P.J.B., Papaalias M., Márquez F.P.G. Autonomous underwater vehicles: Instrumentation and measurements // *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. 2020. 23(2). P. 105–114.
8. Borejko A.A., Konoplin A.Yu., Mihajlov D.N., Borovik A.I., Kir’yanov A.V. Rezul’taty i perspektivy ispol’zovaniya ANPA v kompleksnykh ekspeditsionnykh issledovaniyakh [Results and prospects of using AUVs in complex expeditionary research]. *Proceedings of the conference “Advanced Control Systems and Problems”*. 2022. P. 388–391. (in Russia).
9. Volodin A.N., Panasenko V.V., Horoshev V.A. Analiz i perspektivy razvitiya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Analysis and development prospects of autonomous unmanned underwater vehicles] // *Proceedings of the conference “Intelligent Systems, Control, and Mechatronics*. 2022. P. 198–204. (in Russia).
10. Shcherbatyuk A.F. Perspektivy ispol’zovaniya avtonomnoj podvodnoj robototekhniki dlya monitoringa portovykh akvatorij [Prospects for using autonomous underwater robotics for monitoring port waters]. *Pro-*

ceedings of the Conference on Management of Large-Scale Systems Development (MLSD'2023). 2023. 1055 (In Russia)..

11. Kostenko V.V., L'vov O.Yu. Kombinirovannaya sistema svyazi i navigacii avtonomnogo podvodnogo robota s poplavkovym modulem [Combined communication and navigation system for an autonomous underwater robot with a float module] // Underwater investigation and robotics. 2017. 1(23). P. 31–43. (in Russia).

12. Merkin D.R. Vvedenie v mekhaniku gibkoj niti [Introduction to flexible filament mechanics] // Nauka Publ. Moskva, Russia, 1980. (in Russia).

13. Kostenko V.V., Mokeeva I.G. Issledovanie harakteristik ustanovivshisya rezhimov i dinamiki privyaznoj sistemy avtonomnogo podvodnogo robota s buksiruемым poverhnostnym modulem radiosvyazi [Study of steady-state characteristics and dynamics of the tethered system of an autonomous underwater robot with a towed surface radio communication

module] // Underwater investigation and robotics. 2020. 2(32). P. 34–41. (in Russia).

14. Pantov E., Mahin N., Sheremetov B. Osnovy teorii dvizheniya podvodnyh apparatov [Fundamentals of the theory of movement of underwater vehicles] // Sudostroenie Publ. Leningrad, Russia. 1973. (in Russian).

15. Evstegneeva A.S. Ispol'zovanie komp'yuternoj programmy Advanced Grapher kak sredstvo realizacii 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. 2(188). P. 108–112. (in Russia).

16. Kostenko V., Pryazhennikov P. Methodology for the Development and Design of the AUV Propulsion System // 2025 International Conference on Ocean Studies (ICOS). Vladivostok, Russian Federation, 2025. P. 011–017. DOI: 10.1109/ICOS67841.2025.11371639.

Information about the authors

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

