

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПРИВЯЗНОГО ТИПА В РЕЖИМЕ СОВМЕСТНОГО ДВИЖЕНИЯ С СУДНОМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ

В.В. Костенко, Д.Н. Михайлов, И.Г. Мокеева

Эффективность использования подводных аппаратов привязного типа зависит от соответствия характеристик движительно-рулевого комплекса (ДРК) значениям, требуемым для компенсации реакции кабеля связи с обеспечивающим судном. В статье представлена оценка требований к тяговым характеристикам ДРК, обеспечивающего маневрирование телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА) относительно носителя или подводного гаража в режиме движения комплекса вдоль протяженного донного объекта. Оценка основывается на результатах расчета натяжения кабеля связи (КС) в потоке, обусловленном совместным движением привязной системы «носитель–заглубитель–аппарат». Гидродинамическое сопротивление корпуса аппарата и КС совместно определяют требования к тяговым характеристикам ДРК, а также к системе энергообеспечения комплекса в целом. Для расчета натяжения КС системы «аппарат–носитель» в стационарном потоке предлагается алгоритм, основанный на уравнении цепной линии и численном интегрировании уравнений нерастяжимой гибкой нити. Рассматриваются два варианта использования предлагаемой методики для расчета привязной системы:

- однозвенная система в составе ТНПА – плавучий кабель связи с судном,
- двухзвенная система в составе ТНПА – плавучий кабель связи – пассивный заглубитель – грузонесущий кабель-трос связи с судном.

Ключевые слова: подводная привязная система, телеуправляемый необитаемый подводный аппарат, пассивный заглубитель, установившееся движение, кабель связи, цепная линия, уравнение гибкой нерастяжимой нити.

Введение

Типовая модель использования ТНПА предполагает его работу в пределах зоны маневрирования относительно судна обеспечения, которое удерживается в заданной точке географических координат средствами динамического позиционирования или за счет постановки на якорь. При этом площадь зоны маневрирования аппарата ограничена радиусом 100–200 м, который определяется рабочей глубиной, скоростью течения в районе работ и длиной кабеля связи с судном. Для обследования протяженных подводно-технических объектов и выполнения поисковых работ гидроакустическими и оптическими средствами используются как автономные, так и буксируемые необитаемые подводные аппараты (АНПА и БНПА). Если недостатком использования АНПА

является отсутствие информационного канала связи для оперативной передачи результатов обследования на судно, то БНПА при наличии такого канала не имеет возможности двигаться впереди судна или перемещаться в горизонтальной плоскости для фото- и видеосъемки гидроакустической цели, обнаруженной гидролокатором переднего обзора. Приведенные недостатки АНПА и БНПА обусловили актуальность исследования возможности использования ТНПА для обследования протяженных донных объектов в режиме прямолинейного и установившегося движения носителя и аппарата. Целью работы является определение параметров движения однозвенного и двухзвенного вариантов привязной системы ТНПА – кабель связи – судно. Первый вариант представляет собой приведенную на рис. 1, а систему, состоящую из судна-носителя (СН), ТНПА и кабеля связи ней-

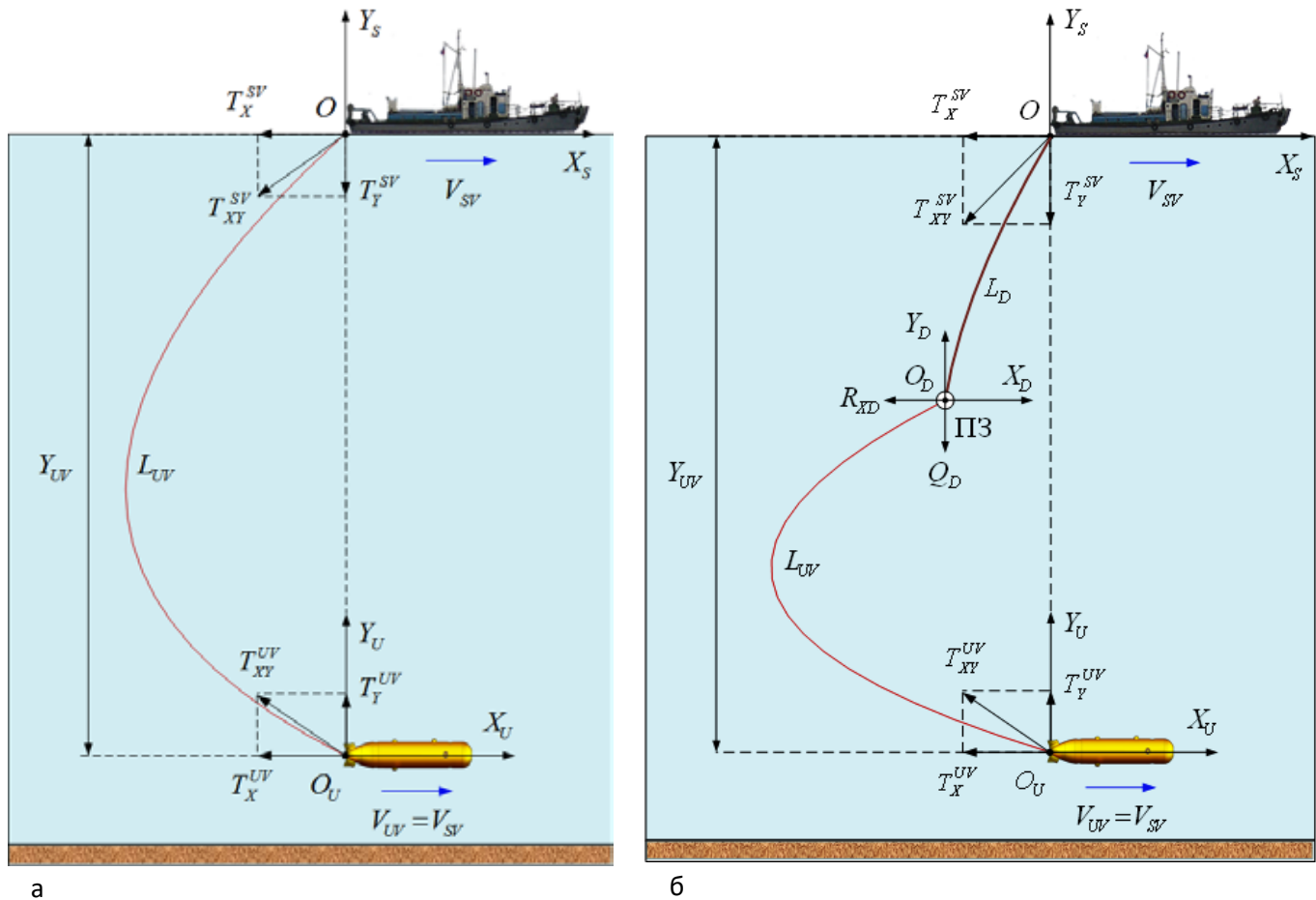


Рис. 1. Однозвенный (а) и двухзвенный (б) варианты использования привязной системы

тральной плавучести, который обеспечивает энерго-снабжение аппарата и его информационный обмен с постом управления. Рисунок 1, б иллюстрирует «глубоководный» вариант привязной системы, в состав которой дополнительно включены грузонесущий кабель (ГК) отрицательной плавучести и пассивный заглубитель (ПЗ).

В процессе исследований потребовалось:

- разработать методику расчета параметров установившегося движения подводной привязной системы;
- определить зависимость натяжения концов кабеля связи от соотношения между его длиной и заглублением аппарата;
- установить влияние скорости движения однозвенной привязной системы на натяжение концов кабеля при фиксированном заглублении аппарата относительно СН;
- определить зависимость натяжения кабеля связи на аппарате и СН в двухзвенной привязной системе от скорости движения.

1. Методика расчета параметров движения подводной привязной системы

Для определения пространственной формы кабеля связи и натяжения его концов при разных значениях скорости движения могут быть использованы два основных инструмента расчета статики привязных систем – численное интегрирование уравнений равновесия гибкой нити при постоянном течении и уравнения цепной линии [1].

1.1. Расчет однозвенной привязной системы

Для больших углов attack кабеля связи можно пренебречь касательной составляющей его гидродинамического сопротивления. При этом КС располагается в плоскости $\xi\eta$, ориентацию которой определяют направление движения системы, плавучесть кабеля и координаты аппарата относительно СН (см. рис. 2). При установившейся скорости совместного движения СН и ТНПА для определения натяжения и конфигурации кабеля могут быть использованы формулы расчета цепной линии [1]. На рис. 2 ось ξ параллельна вектору результирующей равномерно

распределенной нагрузки на кабель:

$$\bar{p} = \bar{R}_n + \bar{q}, \quad \bar{R}_n = R_n \bar{n}, \quad R_n = K_n \rho V^2 d / 2, \quad (1)$$

где $\bar{R}_n$ – вектор гидродинамического сопротивления, $\bar{q}$ – плавучесть кабеля, $\bar{n}$ – нормаль к потоку, K_n – коэффициент нормальной составляющей гидродинамического сопротивления, ρ – плотность воды, V – скорость набегающего потока, d – диаметр кабеля связи.

Натяжение в любой точке цепной линии определяется соотношением:

$$T_m = p_m / \xi_0, \quad (2)$$

где T_m и p_m – модули векторов натяжения и нагрузки, соответственно; ξ_0 – абсцисса вершины цепной линии в поточной системе координат $\xi\eta$; $\sin \psi = q / p_m$, $\cos \psi = \lambda / p_m$, ψ – угол наклона цепной линии между осями $\xi_0\xi$ и OX_S . Для определения ξ_0 в процессе итерационного поиска находится корень x^* следующего уравнения [1]:

$$\sinh x = x \sqrt{L^2 - (OB)^2} / AB, \quad (3)$$

где L – длина кабеля; AB , OB – пролет и превышение цепной линии соответственно;

$$AB = \sqrt{(BC)^2 + z_A^2}, \quad BC = x_A \sin \psi - y_A \cos \psi, \\ OB = x_A \cos \psi + y_A \sin \psi; \quad x_A, y_A, z_A \text{ – координаты}$$

аппарата в инерциальной системе $OX_S Y_S Z_S$, $\sin \alpha = BC / AB$, $\cos \alpha = z_A / AB$.

Полученное решение уравнения (3) позволит определить $\xi_0 = 2x^* / AB$ и натяжение T_m .

Для расчета конфигурации кабеля определим координаты аппарата (η_A, ξ_A) и судна (η_S, ξ_S) в связанной системе:

$$\eta_A = AB / 2 + \text{Arth}(OB / L) / \xi_0, \quad \xi_A = (ch(\xi_0 \eta_A) - 1) / \xi_0; \\ \eta_S = \eta_A + AB, \quad \xi_S = (ch(\xi_0 \eta_S) - 1) / \xi_0. \quad (4)$$

Далее на отрезке $[\eta_A \eta_S]$ с выбранным шагом $\Delta\eta$ выполняется расчет конфигурации кабеля и проекций натяжения по следующим соотношениям:

$$\eta_{i+1} = \eta_i + \Delta\eta, \quad \xi_{i+1} = (ch(\xi_0 \eta_{i+1}) - 1) / \xi_0 - \xi_S; \\ \Delta\xi = \xi_{i+1} - \xi_i, \quad \Delta l = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\xi)^2}; \\ \sin \theta = \Delta\eta / \Delta l, \quad \cos \theta = \Delta\xi / \Delta l; \\ T_\xi = T_m \cos \theta, \quad T_\eta = T_m \sin \theta, \\ T_x = T_\xi \cos \psi - T_\eta \sin \alpha \sin \psi, \\ T_y = T_\xi \sin \psi + T_\eta \sin \alpha \cos \psi, \\ T_z = -T_\eta \cos \alpha. \quad (5)$$

Приведенные формулы составляют содержание подпрограммы ChainLine, используемой в расчетах привязных систем при указанных допущениях [2].

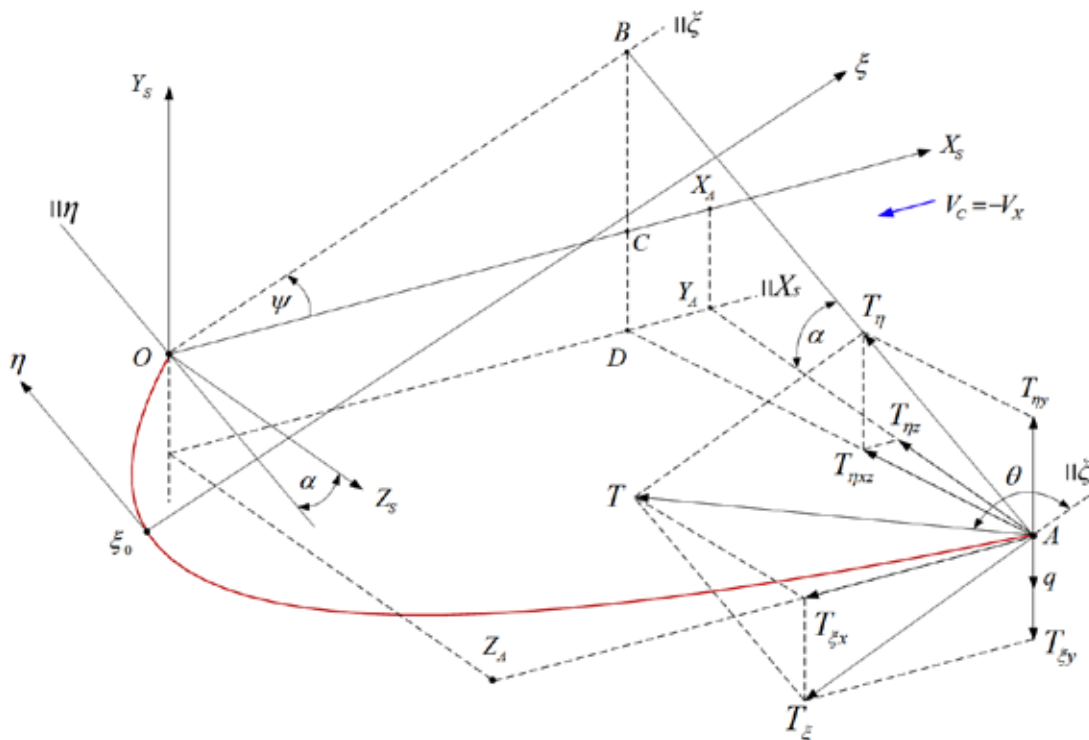


Рис. 2. К расчету проекций натяжения кабеля по уравнению цепной линии

1.2. Расчет двухзвенной привязной системы

Подпрограмма TwoSegm выполняет расчет двухзвенника по заданному натяжению на нижнем конце и вычисление целевой функции – расстояния между верхним концом верхнего сегмента и точкой с координатами судна. Алгоритм подпрограммы в зависимости от постановки задачи предусматривает три варианта реализации, структура которых приведена на рис. 3.

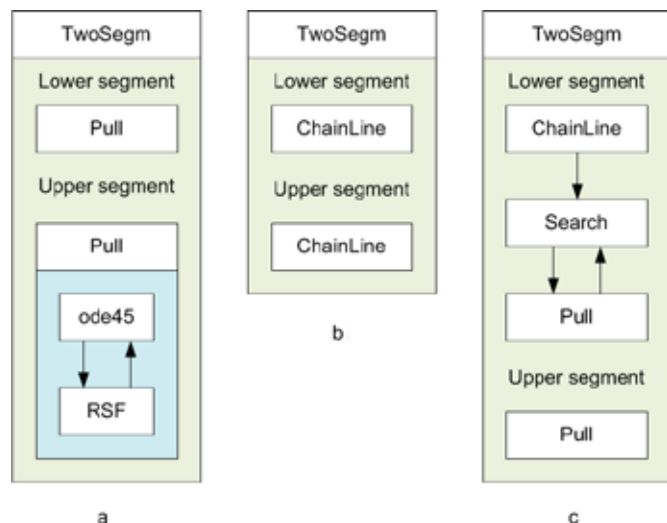


Рис. 3. Варианты алгоритмов программы TwoSegm для расчета двухзвенного варианта

Вариант (а) конфигурации алгоритма выбирается в случае, когда система движется с постоянной скоростью или при удержании на постоянном течении в точке, известной только относительно судна. Подпрограмма **Pull** использует процедуру ode45 MATLAB и выполняет интегрирование системы дифференциальных уравнений статики гибкой нити, которая в векторной форме имеет вид [1, 3]:

$$\frac{d\bar{T}}{dl} + \bar{R} + \bar{q} = 0, \quad (6)$$

где $\bar{R} = (R_x, R_y, R_z)$ – вектор силы гидродинамического давления, действующей на единицу длины кабеля, и ее проекции; $\bar{q}$ – вес единицы длины кабеля в воде; $\bar{T} = (T_x, T_y, T_z)$ – сила натяжения в текущей точке кабеля. Вариант (b) соответствует ситуации, когда известны координаты всех трех модулей: судна, аппарата и заглубителя. При этом аппарат удерживается в точке под судном при установившейся скорости движения привязной системы. Вариант (c) предназначен для расчета привязной системы в случае, когда координаты аппарата даются относительно заглубителя. Подпрограмма ChainLine здесь использована для определения начального приближения

решения. Уточнение вектора натяжения на концах кабеля реализовано в ходе итерационного поиска минимума целевой функции, которую определяют вычисленные координаты корневого (верхнего) конца кабеля относительно начала системы координат, связанной с заглубителем.

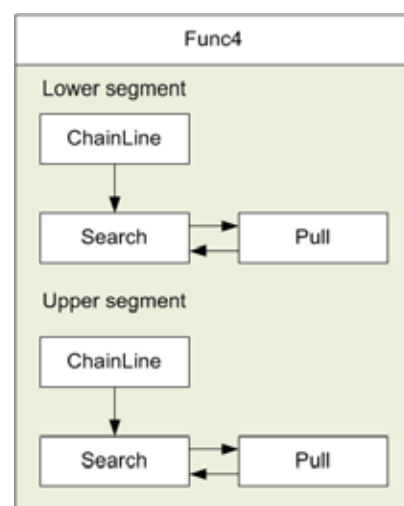


Рис. 4. Структура подпрограммы Func4

Если выбор другой исходной точки не привел к успешному решению, в подпрограмме Func4 делается попытка решить задачу для каждого сегмента в отдельности. Входная переменная для Func4 – уточняемое положение гаража, выходная (целевая) функция – сумма двух отрезков – расстояния верхнего конца нижнего сегмента до заглубителя и верхнего конца верхнего сегмента до судна. Структура под-

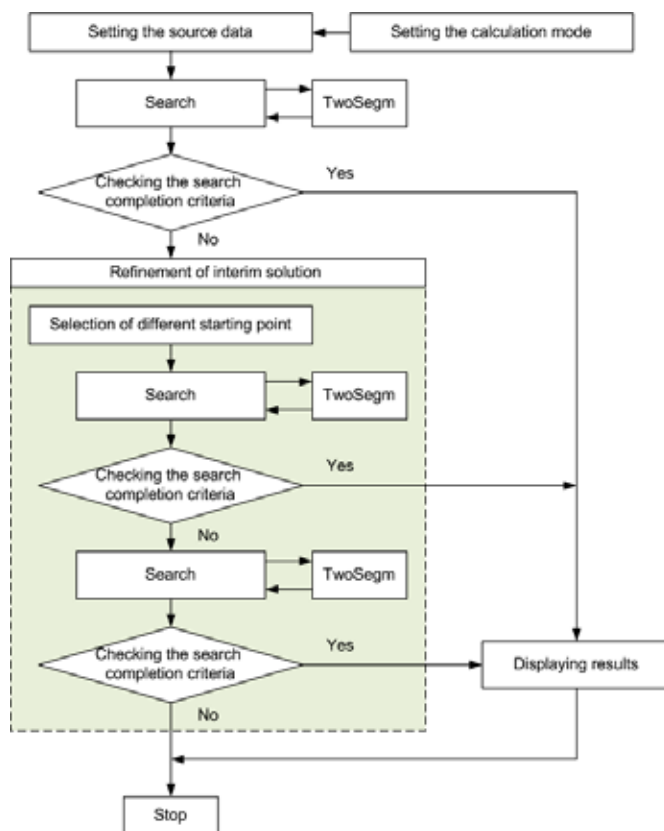


Рис. 5. Обобщенная блок-схема алгоритма расчета параметров привязной системы

программы Func4 приведена на рис. 4, а обобщенная блок-схема алгоритма расчета параметров привязных систем – на рис. 5.

2. Выбор запаса длины кабеля связи

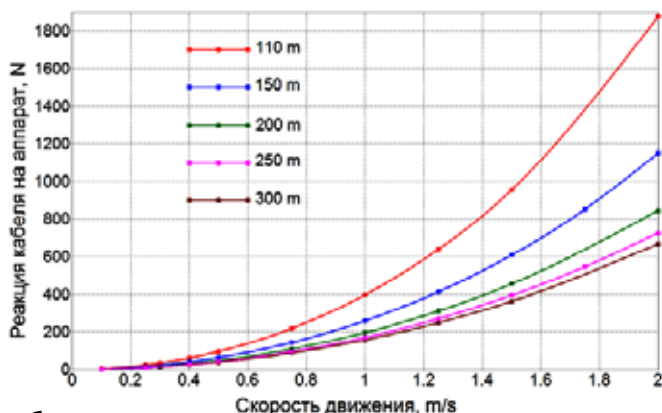
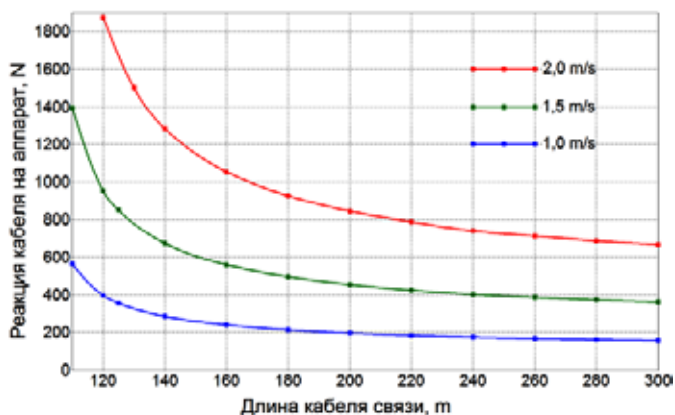
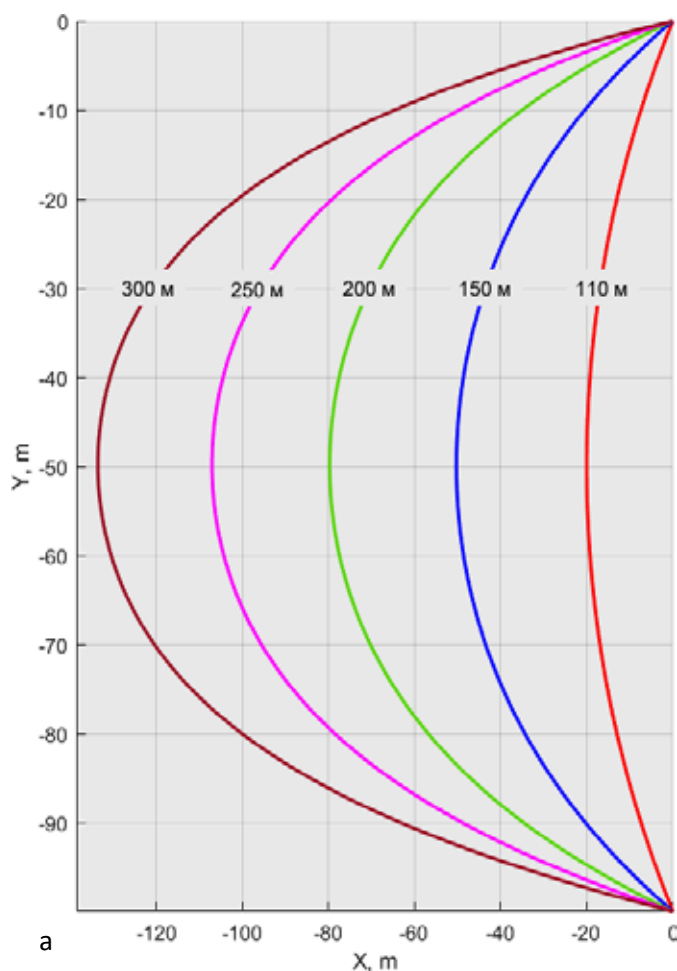
В случае синхронного движения обеспечивающего судна и аппарата натяжение на концах кабеля связи зависит от его длины, а также от заглубления ТНПА относительно СН или заглубителя. Очевидно, что с увеличением длины кабеля его натяжение будет уменьшаться за счет уменьшения нормальной составляющей гидродинамического давления. Однако чрезмерное увеличение длины приводит к нежелательному увеличению электрических потерь, а также усложнению процедуры разворачивания и мобилизации привязной системы. Поэтому возникла задача определения рационального запаса длины кабеля по отношению к глубине погружения аппарата или заглубителя. На графиках рис. 6 приведены рассчитанные по предложенной выше методике зависимость формы кабеля связи и результирующего натяжения его ходового конца от длины, полученные для скоро-

сти набегающего потока 1 м/с при движении аппарата строго под СН.

Анализ графиков рис. 6 показывает, что для $L_{\text{лк}} > 2 \cdot H_a$ происходит незначительное уменьшение результирующей силы натяжения кабеля, которая составляет порядка 0,2 Н/м. Это позволяет считать выбор соотношения $L_{\text{лк}}/H_a = 2$ рациональным при развертывании привязных систем.

3. Расчет натяжения кабеля в однозвенной привязной системе

Расчет натяжения КС проводился для кабеля связи типа КП100ВКП со следующими характеристиками: диаметр $d_k = 10$ мм, вес в воде $q = +0.00066$ кГ/м. Во всех расчетах был принят запас длины кабеля $L_{\text{лк}}/H_a = 2$. При этом аппарат позиционировался строго под обеспечивающим судном на глубине погружения 100 м. Рисунок 7, а демонстрирует изменение формы кабеля связи в продольно-вертикальной плоскости. Полученные в результате расчета зависимости натяжения концов КС от скорости совместного движения судна и аппарата показаны на рис. 7, б.



6

Рис. 6. Зависимость формы (а) и натяжения ходового конца кабеля связи (б) от его длины для скорости движения привязной системы 1 м/с

В результате регрессионного анализа графиков рис. 7, б средствами программы Advance Grapher [4] была установлена возможность вычисления реакции кабеля на аппарат и судно. Приняты следующие функциональные зависимости от скорости движения, интерполирующие результаты моделирования для двойного запаса длины $L_{\text{лк}}=2 \cdot H_a$:

$$\begin{aligned} T_{VX} &= -14,9 \cdot V_X^3 - 145,4 \cdot V_X^2 - 8,2 \cdot V_X, \\ T_{VY} &= 2,1 \cdot V_X^3 + 23,8 \cdot V_X^2 + V_X, \\ T_{SX} &= -15 \cdot V_X^3 - 144,9 \cdot V_X^2 - 8,9 \cdot V_X, \\ T_{SY} &= -1,5 \cdot V_X^3 - 26,2 \cdot V_X^2 + 1,3, \end{aligned} \quad (7)$$

где T_{VX} , T_{VY} – горизонтальная и вертикальная проекции натяжения кабеля на аппарате соответственно; T_{SX} , T_{SY} – горизонтальная и вертикальная проекции натяжения кабеля на обеспечивающем судне соответственно.

Оценку сопротивления движению ТНПА в составе привязной системы целесообразно проводить на скорости, обеспечивающей максимальную эффективность использования обзорно-поискового оборудования. Максимальная скорость выполнения ги-

дроакустической съемки, как правило, не превышает 1 м/с. При этом маршрутная фотосъемка с перекрытием кадров требует движения аппарата относительно грунта со скоростью не более 0,5 м/с [5]. Анализ результатов проведенного расчета показывает, что результирующее натяжение КС на рабочей глубине аппарата 100 м при скорости движения привязной системы относительно воды 1,0 м/с не превышает 185 Н (горизонтальная составляющая 180 Н, а вертикальная – 30 Н). Существующие грузонесущие КС с нулевой плавучестью отечественного и зарубежного производства имеют рабочее натяжение 2000–5000 Н за счет использования кевларовых силовых элементов. Поэтому основным фактором, ограничивающим скорость движения однозвенной привязной системы, будут тяговые характеристики ДРК ТНПА, которые должны удовлетворять следующим требованиям:

$$F_x = T_{vx} + R_{ax}, \quad F_y = T_{vy} + Q_a, \quad (8)$$

где F_x , F_y – продольная и вертикальная тяги ДРК, соответственно; R_{ax} – лобовое гидродинамическое сопротивление ТНПА; Q_a – остаточная плавучесть аппа-

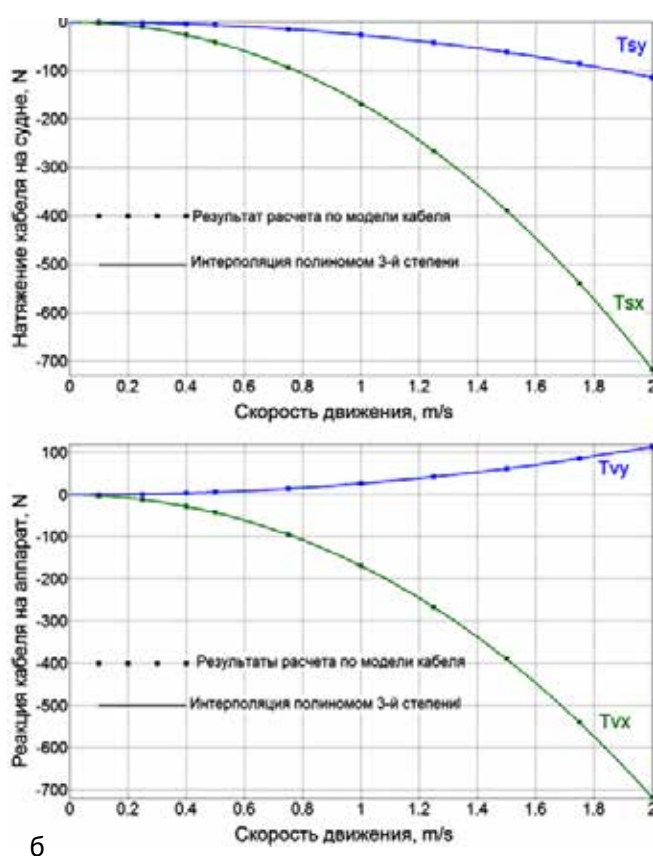
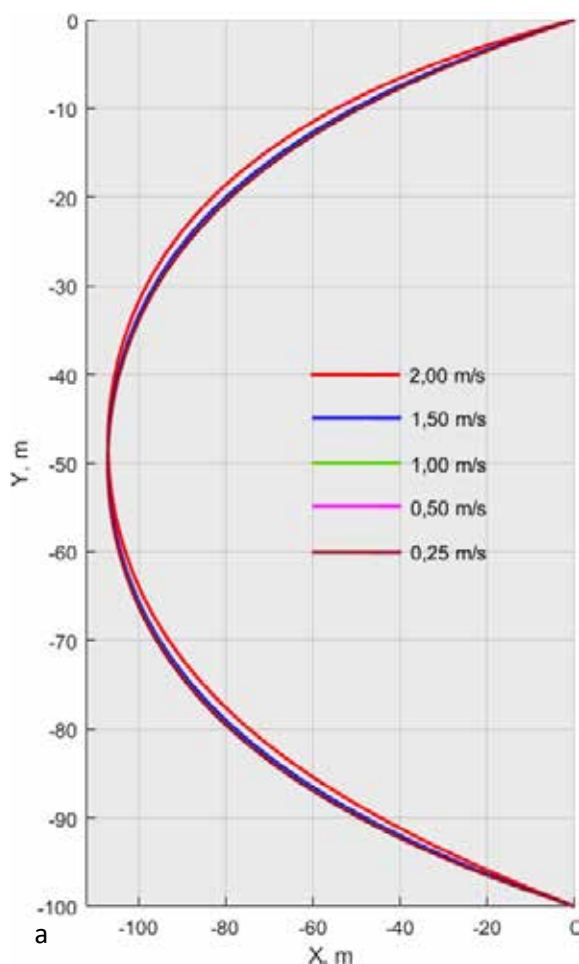


Рис. 7. Зависимость формы (а) и натяжения (б) ходового конца кабеля связи от скорости движения однозвенной привязной системы

рата. При этом возможность использования ТНПА в составе однозвенной привязной системы на скорости 1 м/с требует следующих запасов тяги ДРК для компенсации реакции кабеля: $\Delta F_x \geq 185$ Н, $\Delta F_y \geq 30$ Н.

4. Расчет натяжений кабеля в двухзвенной привязной системе

Мировая практика глубоководного использования ТНПА показывает, что для увеличения маневренности аппарата в условиях даже незначительного течения целесообразно использование двухзвенной схемы развертывания, состоящей из «тяжелого» грузонесущего кабеля связи между судном и пассивным заглубителем с существенной отрицательной плавучестью, а также «легкого» кабеля связи между заглубителем и аппаратом. При этом большая часть реакции кабельной линии связи на аппарат, обусловленной его гидродинамическим сопротивлением движению, компенсируется весом грузонесущего кабеля и заглубителя [6–10]. Для расчета реакции кабе-

ля на аппарат и обеспечивающее судно была принята двухзвенная схема, изображенная на рис. 2, со следующими основными характеристиками:

- верхний грузонесущий кабель-трос «СН-ПЗ» – $L_D=50$ м, $d_D=0,019$ м, $q_D=-0.285$ кГ/м;
- нижний плавучий кабель «ПЗ-ПА» – $L_{UV}=100$ м, $d_{UV}=0,01$ м, $q_{UV}=-0.0007$ кГ/м;
- остаточная плавучесть ПЗ – $Q_g=-100$ кГ,
- коэффициент гидродинамического сопротивления ПЗ – $C_x=1.2$,
- водоизмещение ПЗ – $U=1$ м³;
- в процессе движения аппарат находится строго под СН на заглублении 100 м.

Сила гидродинамического сопротивления ПЗ определялась по типовым формулам [11]:

$$R_{gx} = C_x \cdot \frac{\rho \cdot V_{mx}^2}{2} \cdot U^{2/3}. \quad (9)$$

На рис. 8, а приведены графики, иллюстрирующие изменение формы кабелей двухзвенной привязной системы на скорости движения от 0.5 до 1.5 м/с.

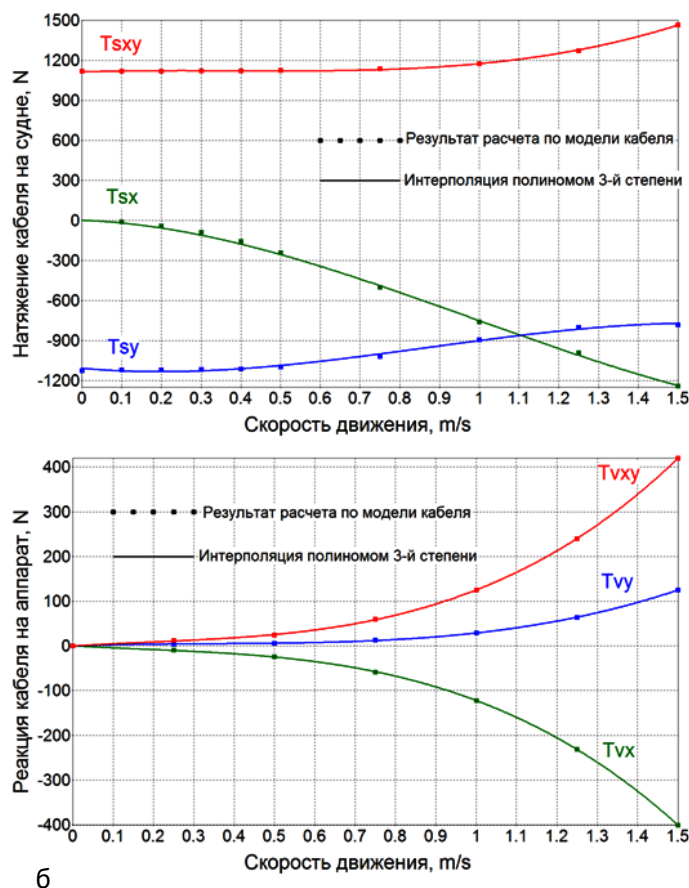
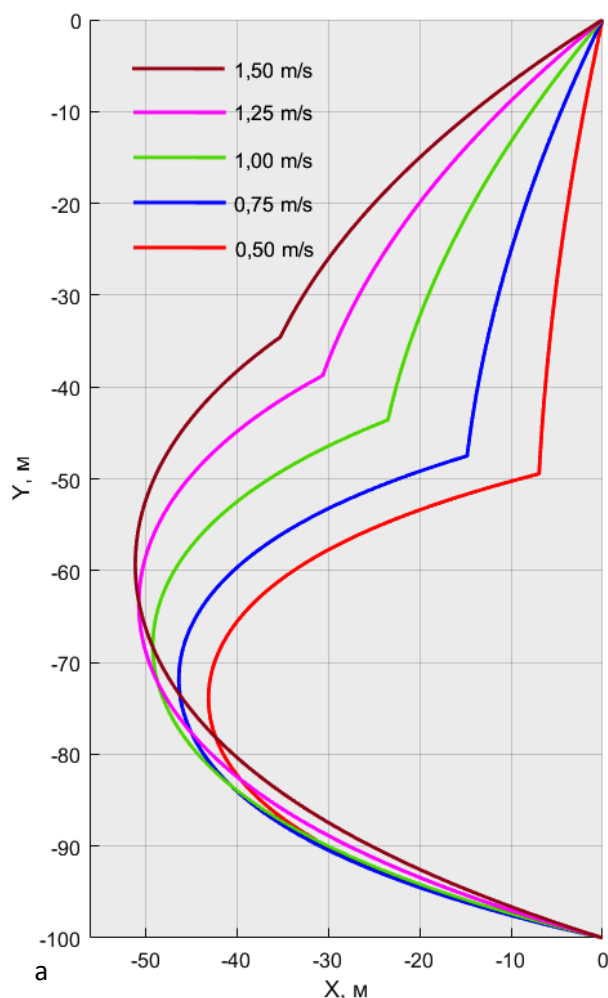


Рис. 8. Зависимость формы (а) и натяжения (б) концов кабеля связи от скорости движения двухзвенной привязной системы

Результаты расчета натяжения кабелей связи на аппарате и судне приведены на рис. 8, б.

Регрессионный анализ результатов проведенных расчетов показал возможность следующего аналитического представления зависимости реакции кабеля на аппарат и судно от скорости движения привязной системы:

$$\begin{aligned} T_{VX} &= -144,9 \cdot V_X^3 + 72,3 \cdot V_X^2 - 49,5 \cdot V_X, \\ T_{VY} &= 75,2 \cdot V_X^3 - 80 \cdot V_X^2 + 33,7 \cdot V_X, \\ T_{SX} &= 330 \cdot V_X^3 - 972 \cdot V_X^2 - 110 \cdot V_X, \\ T_{SY} &= -396 \cdot V_X^3 + 775 \cdot V_X^2 - 272 \cdot V_X - 1107 \end{aligned} \quad (10)$$

В результате моделирования было установлено, что при максимальной скорости движения привязной системы 1 м/с горизонтальная проекция реакции кабеля на аппарате не превышает 110 Н, а вертикальная 25 Н. Таким образом, была подтверждена эффективность двухзвенной привязной системы при проведении глубоководных работ за счет силовой разгрузки нижнего кабеля и использования пассивного заглубителя. Применение данного технического решения позволило почти в два раза снизить возмущающее воздействие кабеля на подводный аппарат.

Заключение

Проведенное моделирование стационарного режима движения привязных подводных систем позволяют сделать следующие основные выводы:

- показано, что рациональный запас длины кабеля относительно заглубления буксируемого оборудования соответствует удвоенной глубине погружения;
- подтверждена принципиальная возможность отслеживания протяженных донных объектов как однозвенной, так и двухзвенной привязными системами;
- для однозвенной привязной системы, предполагающей использование обзорного ТНПА с энергообеспечением через кабель связи, натяжение ходового конца на скорости движения 1 м/с при заглублении аппарата 100 м составляет порядка 180 Н; используемый при этом кабель имеет многократный запас прочности, а доступные для ТНПА энергоресурсы вполне достаточны для создания требуемой тяги ДРК;
- использование двухзвенной привязной системы с пассивным заглубителем, связанным с обеспечивающим судном бронированным и грузонесущим кабелем, уменьшает реакцию кабеля на аппарат до 110 Н;

– горизонтальная реакция кабеля на аппарат многократно превышает вертикальную как для однозвенного, так и для двухзвенного варианта привязной системы;

– представляется перспективной двухзвенная привязная система «АНПА – оптоволоконный микрокабель – заглубитель – грузонесущий кабель связи с судном», которая позволит свести к минимуму действующие на аппарат возмущения и сохранить его автономность.

Разработка алгоритмов расчета натяжения кабелей связи двухзвенной подводной привязной системы выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ 13.1902.21.0012 «Фундаментальные проблемы изучения и сохранения глубоководных экосистем в потенциально рудоносных районах Северо-западной части Тихого океана».

ЛИТЕРАТУРА

1. Меркин Д.Р. Введение в механику гибкой нити: монография. М.: Наука, 1980. 240 с.
2. Мокеева И.Г. Математические модели кабельной линии в расчетах рабочей зоны привязного подводного аппарата // Тр. ДВГТУ. Сер.3. Кораблестроение и океанотехника. 1994. Вып. 113. С. 94–110.
3. Kostenko V.V., Mokeeva I.G.. Choise of ROV's thruster set power according to footprint's radius on steady motion // Proc. "Ocean-94" Conf. (Brest, France). 1994. Vol. 2. P. 34–37.
4. Евстегнеева А. С. Использование компьютерной программы Advanced Grapher как средство реализации принципа наглядности в процессе обучения математике // Молодой ученый. 2018. №. 2. С. 108–112.
5. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение /А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, В.В. Костенко, Ю.В. Матвиенко, А.М. Павин, А.Ф. Щербатюк; [отв. ред. Л.В. Киселев]; ФГБУН Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН. Владивосток, 2018. 368 с.
6. Sandford A. J. Code of practice for the safe and efficient operation of remotely operated vehicles //Submersible Technology: Adapting to Change. Springer, Dordrecht, 1988. С. 45–50.
7. Коноплин А. Ю. Разработка алгоритмов управления перемещениями ТНПА и блоком-заглубителем // Робототехника и искусственный интеллект. 2018. С. 44–49.
8. Коноплин А. Ю., Денисов В.А., Даутова Т.Н., Кузнецов А.Л., Московцева А.В. Технология использования ТНПА для комплексного исследования глубоководных экосистем // Подводные исследования и робототехника. 2019. №. 4. С. 4–12. DOI: 10.25808/24094609.2019.30.4.001.
9. Протасов Е. В. Телеуправляемые аппараты для подводно-технических работ // Деловой журнал Neftegaz. RU. 2019. №. 8. С. 16–19.
10. Алексеев Ю. К. Двухзвенные глубоководные робототехнические системы и некоторые перспективы подводной робототехники // Материалы 8-й Всерос. науч.-технич. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана». Владивосток, 2019. С. 159–166. (https://www.elibrary.ru/download/elibrary_41668442_94051949.pdf).
11. Пантов Е.Н. и др. Основы теории движения подводных аппаратов /Е.Н. Пантов, Н.Н. Махин, Б.Б. Шереметов. Л.: Судостроение, 1973. 217 с.

Об авторах

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

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН

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

Научные интересы: подводная робототехника, системы управления движением автономных и телеуправляемых подводных роботов, движительно-рулевые комплексы, динамические модели, подводные привязные системы.

Тел.: +7 (423) 243-24-16

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

SPIN-код: 2310-3141

ORCID ID: 0000-0002-3821-3787

Resercher ID: AAF-6399-2021

Scopus ID: 57189036440

МИХАЙЛОВ Денис Николаевич, старший научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН

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

Научные интересы: подводная робототехника, аппаратно-программные платформы, движительно-рулевые комплексы и системы энергообеспечения автономных и телеуправляемых подводных роботов

Тел.: +7 (423) 243-24-16

E-mail: denmih@marine.febras.ru

SPIN-код: 1940-6170

ORCID ID: 0000-0002-2427-8459

Resercher ID: P-4784-2017

Scopus ID: 57215280371

МОКЕЕВА Ирина Геннадьевна, старший научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН

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

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

Тел.: +7 (423) 243-24-16

E-mail: pq1205i@rambler.ru

ORCID ID: 0000-0001-6217-6763

Для цитирования:

Костенко В.В., Михайлов Д.Н., Мокеева И.Г. К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПРИВЯЗНОГО ТИПА В РЕЖИМЕ СОВМЕСТНОГО ДВИЖЕНИЯ С СУДНОМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ // Подводные исследования и робототехника. 2021. №. 4(38). С. 26–36. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_38_04_03.



ON USING A TETHERED-TYPE UNDERWATER VEHICLE IN JOINT MOTION WITH A SUPPORT VESSEL

V.V. Kostenko, D.N. Mikhailov, I.G. Mokeeva

The efficiency of using tethered underwater vehicles depends on the compliance of the propulsion and steering complex (PSC) characteristics with the values required to compensate for the reaction of the communication cable with the supporting vessel. The article presents an assessment of the requirements for the traction characteristics of the PSC, which provides maneuvering of a remotely operated underwater vehicle (ROV) relative to a carrier or an underwater depressor when moving alongside an extended bottom object. The assessment is based on the results of calculating the tension of the communication cable (CC) in the flow caused by the joint motion of the "support vessel-depressor-ROV" tethered system. The ROV's body and CC hydrodynamic resistance jointly determine the requirements for the traction characteristics of the PSC and the energy supply system of the complex as a whole. An algorithm based on the equation of a chain line and numerical integration of the equations of an inextensible flexible thread is proposed to calculate the tension of the CC of the underwater tethering system in a stationary flow. Two variants of using the proposed methodology for calculating the tethered system are considered:

- a single-link system consisting of "ROV – umbilical cable-communication with the vessel";
- a two-link system consisting of "ROV – umbilical communication cable – passive depressor – cargo-carrying cable-communication with the vessel".

Keywords: underwater tethering system, remote operated vehicle, passive depressor, steady motion, communication cable, chain line, equation of flexible inextensible thread

References

1. Merkin D.R. *Introduction to the mechanics of flexible filament* M.: Nauka. 1980. 240 p.
2. Mokeeva I.G. Mathematical models of the cable line in the calculations of the working area of a tethered underwater vehicle Trudy DVG TU. Seriya 3. *Krablestroenie i okeanotekhnika*. 1994. Vypusk 113, P. 94–110 (in Russia).
3. Herman D.A., Kostenko V.V., Mokeeva I.G. Choice of ROV's thruster set power according to footprint's radius on steady motion. Proceedings of OCEANS'94. IEEE, 1994. T. 3. C. III/453-III/456 vol. 3.
4. Evstegneeva A.S. Using the computer program Advanced Grapher as a means of implementing the principle of visibility in the process of teaching mathematics. *Molodoj uchenyj*, 2018. No. 2. P. 108–112 (in Russia)
5. Inzartzev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Scherbatyuk A.F. *Podvodnye robototekhnicheskie komplekсы: sistemy, tehnologii, primeneniye* [Underwater robotic systems: systems, technologies, application]. *Otv. red: L.V. Kiselev*. Vladivostok: Dalnauka, 2018, 367 p.
6. Sandford A. J. Code of practice for the safe and efficient operation of remotely operated vehicles. *Submersible Technology: Adapting to Change*. Springer, Dordrecht, 1988. P. 45–50.
7. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu., Konoplin N.Yu. Development of Intellectual Support System for ROV Operators. IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 272 (032101). DOI: 10.1088/1755-1315/272/3/032101.
8. Konoplin A.Yu., Denisov V.A., Dautova T.N., Kuznetsov A.L., Moskovtseva A.V. Technology of the ROV using for comprehensive research of deep-sea ecosystems. *Underwater Investigations and Robotics*. 2019. No. 4 (30). P. 4–12. DOI: 10.25808/24094609.2019.30.4.001
9. Protasov E.V. Remote controlled vehicles for underwater technical work. *Delovoj zhurnal Neftegaz*. 2019. No. 8. P. 16–19 (in Russia).
10. Alekseev Yu.K. Two-link deep-sea robotic systems and some perspectives of underwater robotics. *Materialy 8-j Vseross. nauch.-tekhnich. konf. «Tekhnicheskie problemy osvoeniya Mirovogo okeana»*, 2019. P. 159–166 (in Russia).
11. Pantov E.N., Makhin N.N., Sheremetov B.B. *Fundamentals of the theory of movement of underwater vehicles*. L.: Sudostroenie, 1973. 210 p.

Recommended citation:

Kostenko V.V., Mikhailov D.N., Mokeeva I.G. ON USING A TETHERED-TYPE UNDERWATER VEHICLE IN JOINT MOTION WITH A SUPPORT VESSEL. *Underwater investigation and robotics*. 2021. No. 4(38). P. 26–36. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_38_04_03.

About the authors

KOSTENKO Vladimir Vladimirovich,

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

Institute for Marine Technology Problems FEB RAS

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

Research interests: underwater robotics, motion control systems for autonomous and remote-controlled underwater robots, propulsion and steering systems, dynamic models, underwater tethering systems.

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

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

SPIN-код: 2310-3141

ORCID ID: 0000-0002-3821-3787

Researcher ID: AAF-6399-2021

Scopus ID: 57189036440

MIKHAILOV Denis Nikolaevich,

senior research scientist

Institute for Marine Technology Problems FEB RAS

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

Research interests: underwater robotics, hardware and software platforms, propulsion and steering systems and power supply systems for autonomous and remote-controlled underwater robots

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

E-mail: denmih@marine.febras.ru

SPIN-код: 1940-6170

ORCID ID: 0000-0002-2427-8459

Researcher ID: P-4784-2017

Scopus ID: 57215280371

MOKEEVA Irina Gennadievna,

senior research scientist

Institute for Marine Technology Problems FEB RAS

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

Research interests: underwater robotics, motion modeling of autonomous and remote-controlled underwater robots, optimization of propulsion and steering systems, underwater tethering systems

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

E-mail: pq1205i@rambler.ru

ORCID ID: 0000-0001-6217-6763

