

УДК 629.127.4 – 52

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАБЕЛЯ СВЯЗИ НА МАНЕВРЕННОСТЬ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

В.В. Костенко, И.Г. Мокеева

Институт проблем морских технологий
ДВО РАН, Владивосток

Рассматривается задача оценки требований к параметрам движительно-рулевого комплекса (ДРК), обеспечивающего заданную область маневрирования телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА) относительно носителя или гаража. Оценка основывается на результатах расчета натяжения кабеля связи в неравномерном потоке, обусловленном стационарным течением и движением ТНПА, с учетом гидродинамического сопротивления его корпуса. Разработан алгоритм расчета натяжения кабеля связи в неравномерном потоке. Приводится пример использования предлагаемой методики.

ВВЕДЕНИЕ

Соответствие характеристик движительно-рулевого комплекса (ДРК) значениям, требуемым для компенсации течения и реакции кабеля связи (КС), определяет эффективность использования телеуправляемых подводных аппаратов (ТНПА). В статье

предлагается методика расчета реакции КС, обусловленной не только стационарным течением в районе работ, но и движением аппарата в пределах заданной зоны маневрирования. Эта реакция вместе с гидродинамическим сопротивлением корпуса ТНПА определяют требования к характеристикам ДРК, а также к системе энергоснабжения ап-

парата и комплекса в целом.

Традиционная для ТНПА схема развертывания состоит из условно неподвижного в пространстве носителя или «гаража», легкого кабеля связи нейтральной плавучести и собственно аппарата (см. рис.1).

На рис.1 приняты следующие обозначения: O_nXYZ – инерциальная система координат с центром в точке крепления КС к «гаражу»; X_a, Y_a, Z_a – координаты аппарата в этой системе; $AX_cY_cZ_c$ – связанная с аппаратом система координат, оси которой параллельны осям системы O_nXYZ ; T_{nx}, T_{ny}, T_{nz} – проекции вектора натяжения кабеля \bar{T}_n в точке крепления к гаражу; T_{ax}, T_{ay}, T_{az} – проекции вектора натяжения кабеля \bar{T}_a в точке крепления к аппарату на оси системы координат $AX_cY_cZ_c$; V_{ax} – скорость движения аппарата вдоль оси AX_c относительно гаража навстречу течению; R_{ax} – сила гидродинамического сопротивления корпуса аппарата, обусловленная суммой скоростей аппарата V_{ax} и встречного течения V_{mx} ; Q_a – остаточная плавучесть аппарата; L_k – длина кабеля; R_{zm} –

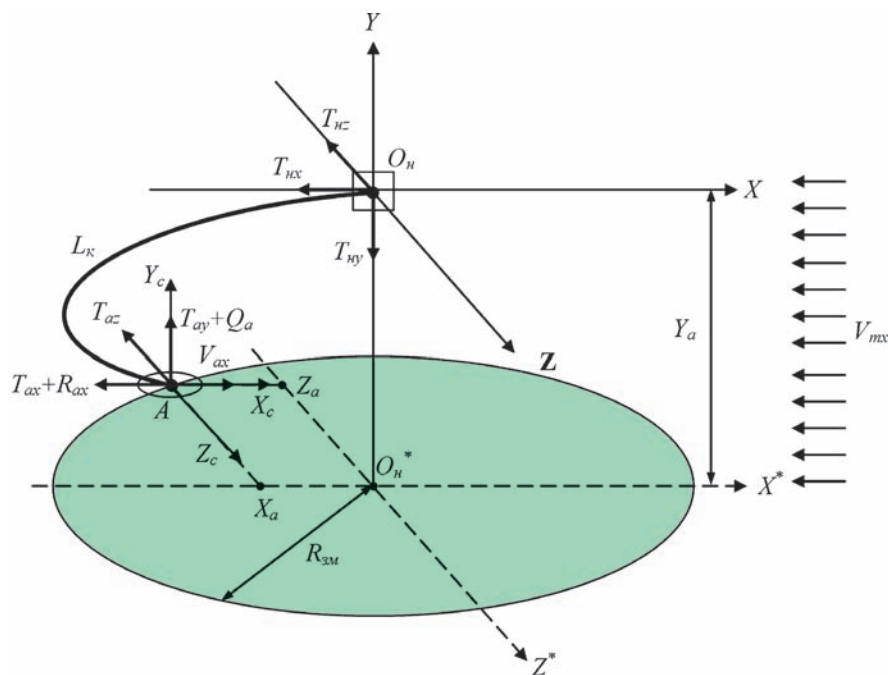


Рис. 1. Схема развертывания системы ТНПА – «гараж»

радиус зоны маневрирования, границы которой образованы совокупностью положений ТНПА при фиксированном заглублении Y_a .

Решение поставленной задачи состоит в определении вектора суммарной тяги ДРК, необходимого для удержания аппарата с кабелем в заданной точке пространства при неравномерном набегающем потоке, обусловленном стационарным течением и движением аппарата относительно гаража.

■ РАСЧЕТ НАТЯЖЕНИЯ КАБЕЛЯ СВЯЗИ

Для определения натяжения кабеля в стационарном потоке используются известные уравнения гибкой нити в установившемся потоке [1-3,7] с учетом допущений о постоянстве скорости течения по глубине и нерастяжимости этой нити. При этом можно рассчитать только реакцию кабеля для фиксированного положения аппарата. Очевиден интерес к возможности ТНПА маневрировать в этом положении с некоторой заданной абсолютной скоростью \vec{V}_a для продолжения запланированной миссии. Учет этой скорости требует решения поставленной задачи в поточной системе координат $O_n \tilde{X}\tilde{Y}\tilde{Z}$, представленной на рис. 2.

В принятой поточной системе координат $O_n \tilde{X}\tilde{Y}\tilde{Z}$ направление осей задано следующим образом. Ось \tilde{X} совпадает с направлением вектора результирующей скорости нижней точки кабеля $\vec{V} = \vec{V}_m + \vec{V}_{ma}$; ось \tilde{Y} совпадает с направлением перпендикуляра $O_n B$ из точки гаража O_n на линию, проведенную через нижнюю точку кабеля A в направлении вектора её результирующей скорости \vec{V} ; ось \tilde{Z} дополняет правую тройку ортогональных осей; $T_{a\tilde{x}}, T_{a\tilde{y}}$ – проекции на оси поточной системы вектора натяжения кабеля

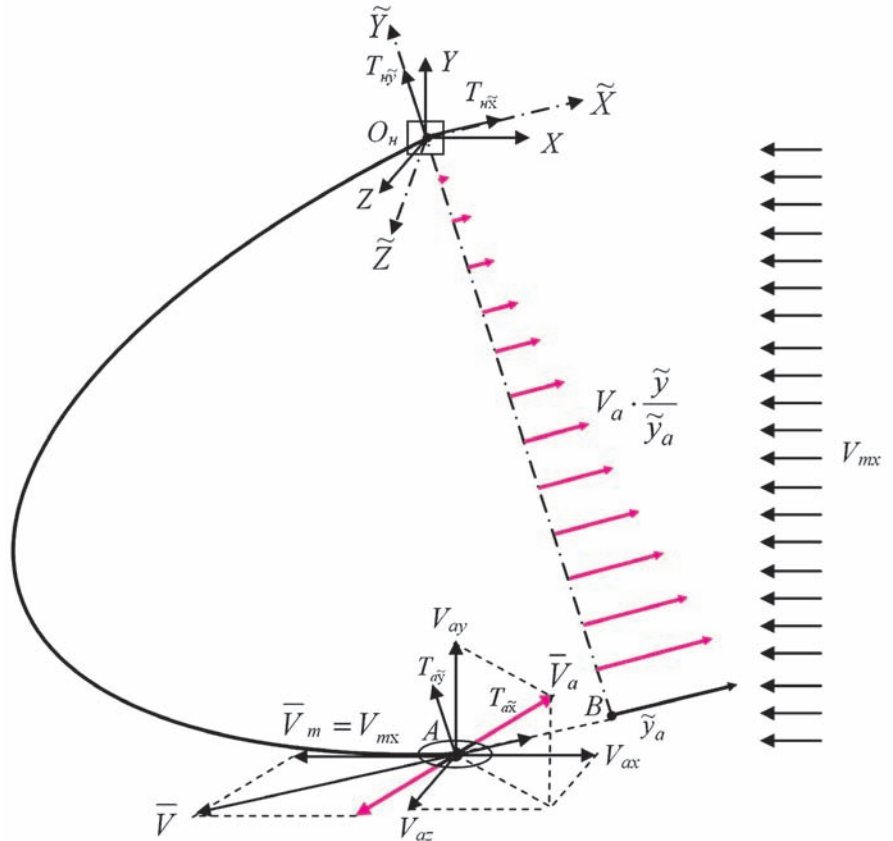


Рис. 2. Поточная система координат и распределение абсолютной скорости движения аппарата в плоскости кабеля связи

в точке крепления к аппарату; $T_{n\tilde{x}}, T_{n\tilde{y}}$ – проекции на оси поточной системы вектора натяжения кабеля в точке крепления к гаражу.

Направляющие косинусы оси \tilde{X} имеют вид:

$$C_{11} = V_x / |\vec{V}|;$$

$$C_{21} = V_y / |\vec{V}|; \quad C_{31} = V_z / |\vec{V}|,$$

где $|\vec{V}|$ – модуль результирующей скорости потока; V_x, V_y, V_z – проекции вектора результирующей скорости потока на оси инерциальной системы координат. При этом проекции перпендикуляра $O_n B$ в инерциальной системе координат $O_n XYZ$ определяются соотношениями:

$$X_B = -Y_a C_{31} + Z_a C_{21},$$

$$Y_B = -Z_a C_{11} + X_a C_{31},$$

$$Z_B = -X_a C_{21} + Y_a C_{11}.$$

Тогда направляющие косинусы оси \tilde{Y} могут быть получены из соотношений:

$$C_{12} = X_B / \tilde{y}_a; \quad C_{22} = Y_B / \tilde{y}_a;$$

$$C_{32} = Z_B / \tilde{y}_a,$$

где $\tilde{y}_a = \sqrt{X_B^2 + Y_B^2 + Z_B^2}$ – длина перпендикуляра $O_n B$. Для определения направляющих косинусов оси \tilde{Z} введем систему углов, в которой углы φ и ψ определяют ориентацию вектора результирующей скорости потока в инерциальной системе, а угол θ – боковой наклон поточной системы. При этом

$$\cos \varphi = V_x / V_{xz}, \quad \sin \varphi = -V_z / V_{xz},$$

$$\sin \psi = V_y / |\vec{V}|,$$

$$\cos \psi = (V_x / |\vec{V}|) \cdot \cos \varphi,$$

$$\cos \theta = C_{22} / \cos \psi, \quad \sin \theta = (C_{32} - \sin \varphi \cdot \sin \psi \cdot \cos \theta) / \cos \varphi;$$

здесь $V_{xz} = \sqrt{V_x^2 + V_z^2}$ – проекция вектора результирующей скорости потока $|\vec{V}|$ на плоскость $O_n XZ$.

Примем пространственное распределение составляющей вектора течения, определяемой движением аппарата $\vec{V}_{ma} = -\vec{V}_a$, известным и будем считать, что эта скорость убывает от своего значения в нижней точке кабеля до нуля в точке крепления к «гаражу» пропорционально ординате \tilde{y} в поточной системе. Такое допущение дает возможность рассмотреть задачу о равновесии кабеля связи в неравномерном потоке в плоскости $O_n \tilde{X}\tilde{Y}$ поточной системы координат. При этом уравнение привязной системы в установившемся потоке с учетом абсолютной скорости движения аппарата примет вид:

$$\frac{d\mathbf{f}}{dl} = \mathbf{b}, \quad \mathbf{f} = [T \ \alpha \ \tilde{x} \ \tilde{y} \ V]^T,$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} -R_\tau & -\frac{R_n}{T} \cos\alpha & \sin\alpha & - \\ & & & -\left|\frac{V_a}{\tilde{Y}_a}\right| \sin\alpha \end{bmatrix}^T. \quad (1)$$

В этих уравнениях: T – сила натяжения в текущей точке кабеля; α – угол между касательной к линии кабеля в этой точке и осью \tilde{x} (т.е. угол атаки); \tilde{x}, \tilde{y} – поточные координаты текущей точки кабеля; V – результирующая скорость потока в текущей точке кабеля; R_τ, R_n – касательная и нормальная составляющие силы гидродинамического сопротивления, действующей на единицу длины кабеля. Эти силы определяются соотношениями [3]:

$$R_\tau = k_\tau \cdot \frac{\rho \cdot V_\tau \cdot |V_\tau|}{2} \cdot d, \quad V_\tau = V \cdot \cos\alpha;$$

$$R_n = k_n \cdot \frac{\rho \cdot V_n \cdot |V_n|}{2} \cdot d, \quad V_n = V \cdot \sin\alpha,$$

где k_n, k_τ – нормальный и касательный коэффициенты гидродинамического сопротивления кабеля; d – диаметр кабеля; ρ – плотность воды.

Алгоритм решения задачи представляет собой следующую последовательность действий.

1. Задание исходных данных:

– характеристики кабеля L, d, k_n, k_τ ;

– скорость течения V_{mx} и абсолютная скорость движения аппарата (V_{ax}, V_{ay}, V_{az}) ;

– координаты аппарата относительно гаража X_a, Y_a, Z_a .

2. Расчет элементов матрицы C ориентации поточной системы координат относительно инерциальной по заданным скоростям аппарата V_{ax}, V_{ay}, V_{az} и течения V_{mx} .

3. Определение начального приближения натяжения кабеля в поточной системе координат по формулам цепной линии [7] с учетом только нормальной составляющей гидродинамического сопротивления R_n .

4. Итерационное уточнение решения, в ходе которого на каждой итерации выполняется численное интегрирование уравнений (1) по длине с учетом как R_n , так и R_τ , и определяется натяжение кабеля в поточной системе координат как со стороны аппарата (T_{ax}, T_{ay}) , так и со стороны «гаража» (T_{nx}, T_{ny}) .

5. Пересчет решения из поточной системы (T_{ax}, T_{ay}) и (T_{nx}, T_{ny}) в инерциальную систему координат через направляющие косинусы матрицы C из табл. 1.

Найденные в ходе решения проекции натяжения кабеля на оси связанной системы координат T_{ax}, T_{ay} и T_{az} являются тяговыми характеристиками ДРК, обеспечивающими достижение назначенных границ зоны маневрирования (X_a, Y_a, Z_a) с заданной абсолютной скоростью аппарата (V_{ax}, V_{ay}, V_{az}) . Разработанный алгоритм расчета равновесия кабеля в неравномерном потоке [4,5] был реализован в пакете Matlab прикладной программой ZONA.

Очевидно, что для выбора требований к параметрам ДРК необходимо определить максимальные значения возмущений от кабеля, поэтому расчет натяжений выполнялся на границе круговой зоны маневрирования в плоскости $O_n^* X^* Z^*$ с радиусом R_{zm} и в точках, соответствующих угловой координате λ (см. рис. 3):

$$\lambda = \delta\lambda \cdot j, \quad (2)$$

где $\delta\lambda = 30^\circ$ – шаг изменения угловой координаты, $j = 0, 1, 2, \dots, 11$ – номер расчетной точки. В табл. 2 приведены исходные данные расчета натяжений КС для схемы развертывания.

Результаты проведенных расчетов натяжения кабеля связи в неравномерном потоке сведены в табл. 3 и иллюстрируются рис. 4, 5.

Анализ полученных результатов показывает, что для принятых исходных данных компоненты натяжения кабеля связи в точке крепления к аппарату не превышают значений, приведенных в табл. 4.

Таблица 1. Матрица перехода C от инерциальной системы координат к поточной

Инерциальная система координат	Поточная система координат		
	\tilde{x}	\tilde{y}	\tilde{z}
x	$\cos\varphi \cdot \cos\psi$	$\sin\varphi \sin\theta - \cos\varphi \sin\psi \cos\theta$	$\sin\varphi \cos\theta + \cos\varphi \sin\psi \cos\theta$
y	$\sin\psi$	$\cos\psi \cos\theta$	$-\cos\psi \sin\theta$
z	$-\sin\varphi \cos\psi$	$\cos\varphi \sin\theta + \sin\varphi \sin\psi \cos\theta$	$\cos\varphi \cos\theta - \sin\varphi \sin\psi \sin\theta$

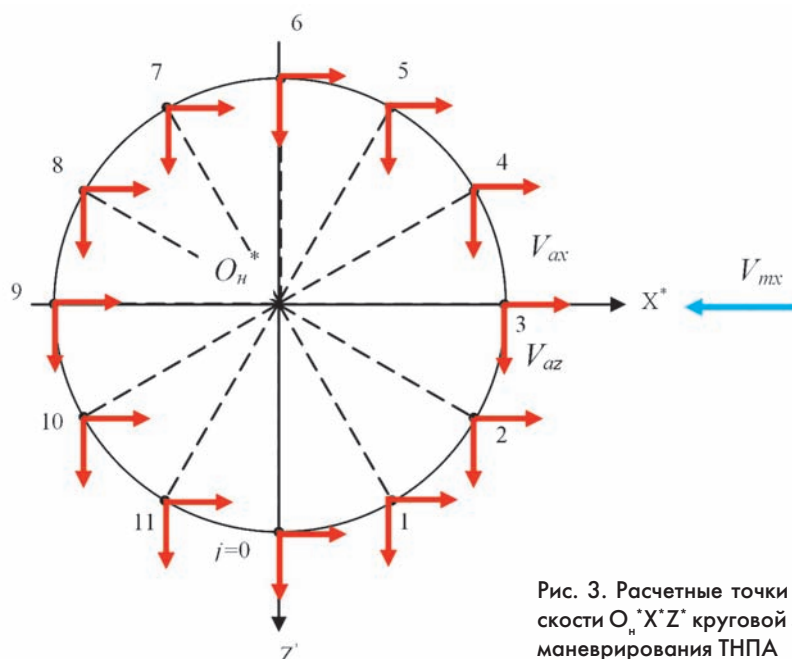


Рис. 3. Расчетные точки плоскости $O_n^* X^* Z^*$ круговой зоны маневрирования ТНПА

Таблица 2. Исходные данные расчета

Параметр		Значение
Кабель связи	L_k , м	200
	d , м	0.014
	k_n	1.800
	k_τ	0.025
	$n_{\text{звеньев}}$	50
Рабочая зона	R_{zu} , м	50
	Y_a , м	50
	λ , град	0÷360
Скорость аппарата	V_{ax} , м/с	0.50
	V_{ay} , м/с	-0.50
	V_{az} , м/с	0.50
Течение	V_{mx} , м/с	-0.50
	V_{mv} , м/с	0.00
	V_{mz} , м/с	0.00

Таблица 3. Результаты расчета натяжения кабеля

φ, град	Натяжение кабеля на гараже, Н				Натяжение кабеля на аппарате, Н			
	T_{nx}	T_{ny}	T_{nz}	$ \bar{T}_n $	T_{ax}	T_{ay}	T_{az}	$ \bar{T}_a $
0	-142	23	-23	146	-112	76	-76	155
30	-77	10	-2	78	-70	41	-40	90
60	-36	3	15	39	-43	24	-22	54
90	-42	8	49	65	-64	35	-29	79
120	-61	20	113	130	-116	67	-43	141
150	-95	28	159	187	-159	103	-44	195
180	-133	25	158	208	-166	127	-39	213
210	-153	18	123	197	-144	132	-42	200
240	-164	14	86	186	-122	130	-58	188
270	-184	17	56	193	-118	132	-83	196
300	-205	24	21	208	-128	129	-107	211
330	-194	28	-14	197	-133	110	-105	202

Таблица 4. Максимальные значения реакции кабеля на границах зоны маневрирования

Максимальное натяжение кабеля на аппарате, Н			
$ T_{ax} $	$ T_{ay} $	$ T_{az} $	$ \bar{T}_a $
166	132	107	213

■ РАСЧЕТ ТРЕБУЕМЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДРК

Помимо реакции кабеля на аппарат действуют силы гидродинамического сопротивления корпуса, зависящие от скорости набегающего потока. Допустим, что оси связанной с аппаратом системы координат $AX_c Y_c Z_c$ параллельны осям $O_n X Y Z$, а центр масс аппарата совпадает с центром давления. При этом условию равновесия действующих на ТНПА сил будут соответствовать уравнения:

$$\begin{aligned} F_x &= T_{ax} + R_x, \\ F_y &= T_{ay} + R_y + Q_a, \\ F_z &= T_{az} + R_z, \end{aligned} \quad (3)$$

где F_x, F_y, F_z – продольная, вертикальная и боковая составляющие тяги ДРК соответственно; Q_a – остаточная плавучесть ТНПА; R_x, R_y, R_z – продольная, вертикальная и боковая составляющие силы гидродинамического сопротивления корпуса аппарата соответственно.

С учетом суммирования набегающих потоков и предположения о необходимости компенсации лагового (действующего вдоль оси $O_n^* Z^*$) течения V_{mz} гидродинамическое сопротивление ТНПА можно вычислить по известной формуле [6]:

$$R_x = C_x \cdot \frac{\rho \cdot (V_{aux} + V)^2}{2} \cdot U^{2/3}, \quad (4)$$

$$R_y = C_y \cdot \frac{\rho \cdot V_{ay}^2}{2} \cdot U^{2/3},$$

$$R_z = C_z \cdot \frac{\rho \cdot (V_{az} + V)^2}{2} \cdot U^{2/3},$$

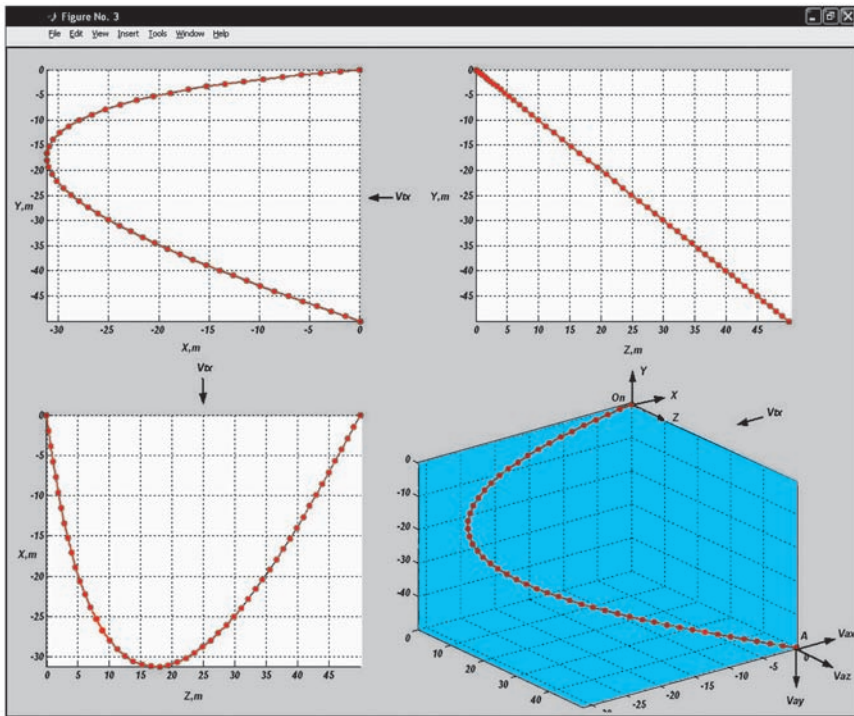


Рис. 4. Форма кабеля связи, рассчитанная для угловой координаты зоны маневрирования $=0^\circ$ ($X_0=0$ м, $Y_0=-50$ м, $Z_0=50$ м) и исходных данных табл. 2

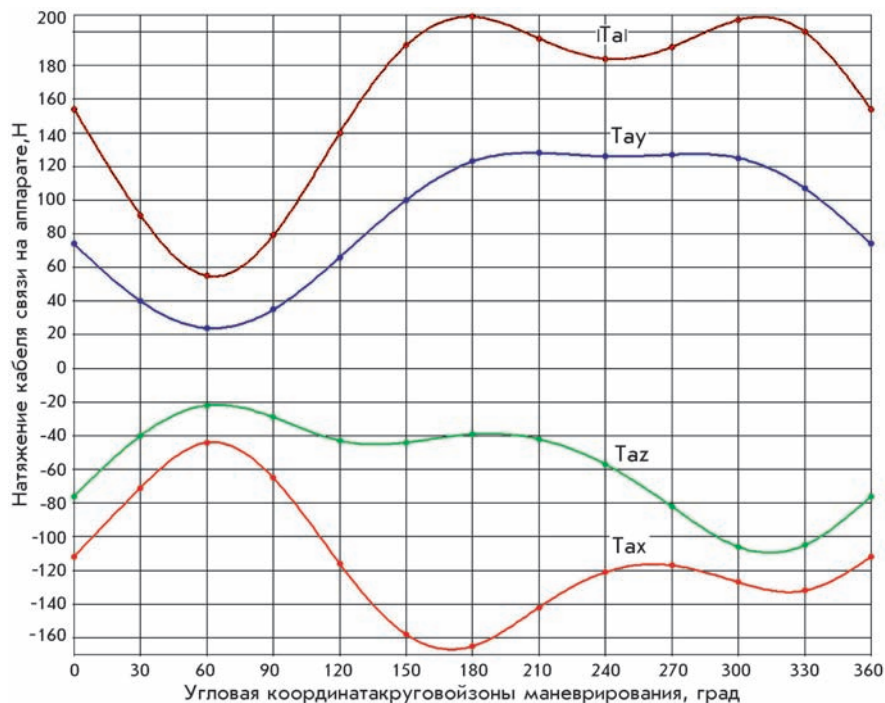


Рис. 5. Зависимость натяжения кабеля связи от положения аппарата на границе плоскости $O_n X Z$ круговой зоны маневрирования ТНПА

где C_x , C_y , C_z – коэффициенты сопротивления продольному, боковому и вертикальному движению ТНПА соответственно; $V_{m,x} = V_{m,z} = -0,50$ м/с – скорость

встречного течения; $U = 0,05$ м³ – водоизмещение аппарата.

Традиционно привязные ПА представляют собой плоскообтекаемую конструкцию

[6], а практика их проектирования и натурные испытания показывают, что гидродинамические коэффициенты C_x , C_y , C_z имеют значения, близкие к единице. В расчетах сил гидродинамического сопротивления корпуса примем $C_x = C_y = C_z = 1.0$. Остаточную плавучесть аппарата зададим равной $Q_a = +10$ Н. Для определенных ранее (см. табл. 4) максимальных значений компонент реакции кабеля связи и рассчитанных по формуле (4) гидродинамических сопротивлений требования к параметрам ДРК, вычисленные по (3), сведены в табл. 5. При этом максимальные значения проекций реакции кабеля связи T_{ax} и T_{az} приняты равными. Это означает, что предполагается обеспечить проектируемым ДРК работу аппарата в условиях «бокового» течения, действующего вдоль оси OZ инерциальной СК.

■ Расчет энергообеспечения ДРК

Для проектирования системы энергоснабжения аппарата и правильного выбора токоведущих параметров кабеля связи необходимо знать электрическую мощность, которая требуется для энергообеспечения ДРК. Поскольку в исходных данных оговорено одновременное движение по трем координатам (V_{ax}, V_{ay}, V_{az}), то буксировочная мощность, затрачиваемая ДРК на такое движение аппарата с компенсацией реакции кабеля и течения, определяется выражением

$$N_\sigma^\Sigma = N_\sigma^x + N_\sigma^y + N_\sigma^z, \quad (5)$$

где $N_\sigma^x = F_x \cdot (V_{ax} + V_{mx})$ – буксировочная мощность ДРК, затрачиваемая на движение аппарата вдоль оси AX_c (продольный ход); $N_\sigma^y = F_y \cdot V_{ay}$ – буксировочная мощность на вертикальное дви-

Таблица 5. Результат расчета требуемых управляющих воздействий ДРК ТНПА

$F_x = 236 \text{ Н}$		$F_y = 160 \text{ Н}$			$F_z = 236 \text{ Н}$	
$R_x, \text{ Н}$	$T_{ax}, \text{ Н}$	$R_y, \text{ Н}$	$T_{ay}, \text{ Н}$	$Q_a, \text{ Н}$	$R_z, \text{ Н}$	$T_{az}, \text{ Н}$
70	166	18	132	10	70	166*

Таблица 6. Результат расчета энергообеспечения ДРК

Буксировочная мощность ДРК, Вт				Потребляемая мощность ДРК, Вт			
N_σ^x	N_σ^y	N_σ^z	N_σ^Σ	N_σ^x	N_σ^y	N_σ^z	N_σ^Σ
236	80	236	552	572	194	572	1338

жение; $N_\sigma^z = F_z \cdot (V_{az} + V_{mz})$ – буксировочная мощность на движение вдоль оси AZ_c (лагом). В последнем выражении допущена возможность ориентации аппарата лагом к течению на границе зоны маневрирования.

С учетом потерь на преобразование электрической мощности бортового источника питания в мощность, затрачиваемую на маневрирование аппарата, определим требование к энергообеспечению ДРК:

$$N_\sigma^\Sigma = \frac{N_\sigma^x + N_\sigma^y + N_\sigma^z}{\eta_{гв} \cdot \eta_{сп}}, \quad (6)$$

где $\eta_{гв}$ – пропульсивный КПД гребных винтов ДРК, $\eta_{сп}$ – КПД гребного электропривода с учетом схемы управления, N_σ^Σ – суммарное энергопотребление ДРК. Имеющаяся в ИМПТ ДВО РАН практика проектирования гребного электропривода АНПА и ТНПА подтверждает достижимость достаточно высоких значений КПД как гребного винта $\eta_{гв} = 0,5 \div 0,6$, так и бесколлекторного электропривода постоянного тока $\eta_{сп} = 0,75 \div 0,80$ [8,9]. Результаты расчетов энергообеспечения ДРК для $\eta_{гв} = 0,55$ и $\eta_{сп} = 0,75$ с учетом

данных из таблиц 2-5 приведены в табл. 6.

В качестве общих выводов можно отметить следующее.

1. Исследование влияния кабеля связи на маневренность ТНПА является важным этапом проектирования не только его ДРК, но и системы энергоснабжения всего подводного технического комплекса, включая источник питания судна-носителя.

2. Влияние собственного движения аппарата на натяжение кабеля можно учесть, решая задачу о его равновесии в поточной системе координат с неравномерным потоком.

3. Предложенная методика позволяет определить управляющие воздействия ДРК, необходимые для движения аппарата в пределах заданной зоны маневрирования при установившемся встречном течении.

4. Выявленные требования к управляющим воздействиям ДРК позволяют определить его рациональную компоновку и сформулировать исходные данные для проектирования движителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крылов А.Н. О равновесии шаровой мины на течении // Крылов А.Н. Собр. соч. Т. 9. М.: Изд-во АН СССР, 1949.
2. Егоров В.И. Подводные буксируемые системы. Л.: Судостроение, 1981.
3. Виноградов Н.И. и др. Привязные подводные системы. Прикладные задачи статики и динамики. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2000.
4. 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.
5. Mokeeva I.G. Power consumption of tethered underwater vehicle // Proc. Sixth Pacific Asia Offshore Mechanics Symposium. Vladivostok, Russia. 2004.
6. Пантов Е.Н., Махин Н.Н., Шереметов Б.Б. Основы теории движения подводных аппаратов. Л.: Судостроение, 1973. 209 с.
7. Меркин Д.Р. Введение в механику гибкой нити. М.: Наука, 1980.
8. Борейко А.А., Горнак В.Е., Костенко В.В., Найденко Н.А., Хмельков Д.Б. Опыт разработки вентильного электропривода движителей подводного аппарата // Технические проблемы освоения Мирового океана: Матер. науч.-техн. конф. Владивосток: Дальнаука, 2007. С.135–140.
9. Горнак В.Е., Костенко В.В., Кушнерик А.А. Оптимизация характеристик движителей подводного аппарата // Технические проблемы освоения Мирового океана: Матер. науч.-техн. конф. Владивосток: Дальнаука, 2007. С.130–134.

