УДК [519.8 + 504.064.3: 528.8]: 629.584

Трунов О.М.,
к.т.н., доцент, завідувач кафедри медичних приладів і систем,
Миколаївський державний гуманітарний університет ім. Петра Могили

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВОДНОЇ АКВАТОРІЇ У КОНТЕКСТІ МІНІМІЗАЦІЇ ВИТРАТ

Досліджені особливості визначення граничних значень параметрів підводного устаткування для моніторингу водної акваторії у контексті мінімізації витрат. Продемонстровані можливості застосування нелінійних степеневих характеристик з урахуванням нелінійних властивостей підводних апаратів та геометричного програмування розв'язок задачі максимізації прибутків як багатокроковий алгоритм визначення граничних параметрів технологічного устаткування

The definitions' particularities of parameters' limits of equipment for monitoring the water area for cost minimizing have been analyzed. There were exhibited the possibilities of applying the unlinear range characteristics with accounting the unlinear features of underwater devices and with a help of methods of geometric programming, the solvings of problem of maximizing the incomes have been built, as a polystepped algorithm of definition the parameters' limits of the technological equipment.

Зростаюча кількість потенційних забруднювачів або техногенно небезпечного глибоководного устаткування, такого, як підводні бурові для видобутку, трубогони для перекачки газу та нафти або підводні атомні човни, що затонули внаслідок аварії, збільшує необхідність постійного моніторингу підводної акваторії. Одним із можливих засобів контролю устаткування такого типу або наслідків аварії є автономні підводні апарати, що містять на своєму борту комплекс приладів експрес-аналізу та передачі інформації.

Специфіка функціонального призначення цього типу обладнання висуває нові вимоги до технічних характеристик. Однак на стадіях передескізного та ескізного проекту визначення таких параметрів, як швидкість, вантажопідйомність, є проблематичним у зв'язку з відсутністю можливостей для формулювання технічних вимог. Тому визначення граничних значень параметрів, виходячи із економічної доцільності у контексті мінімізації витрат, запропоноване у роботі [3], є одним із підходів, привабливих до практичного застосування на стадії передескізного проекту.

Поставимо за мету дослідити можливості визначення граничних значень параметрів для устаткування моніторингу водної акваторії.

Постановка задачі

Припустимо, що для обстеження підводної акваторії за заданий час підводний апарат переміщує комплекс приладів експрес-аналізу та збору проб. Необхідно визначити швидкість повздовжнього сканування v як швидкість переміщення та вантажопідйомність T.

Розіб'ємо задачу на три кроки: на першому припустимо, що коефіцієнт опору є константою, а незмінною функцією швидкості, тоді загальні витрати визначимо як суму витрат за такими категоріями: витрати на оренду устаткування I_1; витрати на заробітну платню екіпажу I_2; витрати на закупку пального для роботи підводного апарата та допоміжного устаткування енергозабезпечення I_3. Позначимо L довжину шляху, що проходить підводний апарат у один кінець, а ширина захвату його приладами аналізу складу речовини підводної поверхні під час обстеження D_1. Тоді час роботи устаткування визначиться:

$$\tau = \frac{S}{vN D_1 (1-\alpha)^{N-1}}, \qquad (1)$$

де S – площа поверхні, що підлягає обстеженню, N – кількість проходів, $\alpha = \frac{\Delta}{D_1}$ – відносна ширина перекриття зон обстеження.

Припустимо, вартість оренди устаткування, за одиницю часу апроксимується степеневою функцією

$$B_a = k_1 T^n, \qquad (2)$$

де k_1 та n – це коефіцієнти апроксимації. Відповідно до співвідношень (1) та (2) подамо першу складову витрат

$$I_1 = k_1 \frac{S}{N D_1 (1-\alpha)^{N-1}} T^n v^{-1}. \qquad (3)$$

Витрати на оплату заробітної платні членам екіпажу, що обслуговують устаткування та оренду судна визначаються по загальному часу робіт і відповідно будуть мати вигляд

$$I_2 = k_2 \tau = \frac{k_2 S}{N D_1 (1-\alpha)^{N-1}} v^{-1}, \qquad (4)$$

де k_2 – сумарна заробітна платня з урахуванням податків за одиницю часу.

Остання складова – витрати пального на продукування електроенергії для зарядки акумуляторних батарей підводного апарата – пропорційна довжині загального пройденого шляху, тобто NL та гідродинамічному опору, який, у свою чергу, можна визначити як

$$R = C_{RX} T^a v^2$$

Таким чином, третю складову подамо як

$$I_3 = k_3 NLT^a v^2, \qquad (5)$$

де позначено

$$k_3 = \frac{C_{RX} C_V}{\eta_p q_V},$$

де C_{RX} – коефіцієнт опору, q_V – теплотворна спроможність одиниці маси пального, η_P – ККД. перетворень енергії, C_V – вартість одиниці маси пального.

Підсумувавши всі витрати, представлені співвідношеннями (3)-(5), подамо загальні витрати як позіном вантажоспроможності та швидкості апарату

$$g(T,V) = c_1 T^n v^{-1} + c_2 v^{-1} + c_3 T^a v^2 \qquad (6)$$

де для зручності викладу позначено нові константи:

$$c_1 = k_1 \frac{S}{N D_1 (1-\alpha)^{N-1}},$$

$$c_2 = \frac{k_2 S}{N D_1 (1-\alpha)^{N-1}}, \quad c_3 = k_3 NL.$$

Поставимо задачу визначення граничної швидкості та вантажопідйомності устаткування для забезпечення перевезень як задачу геометричного програмування без обмежень. Остання зводиться до визначення оптимальних коефіцієнтів ваги δ_i та знаходження двоїстої функції.

Подамо для позінома (6) двоїсту функцію

$$\upsilon(\delta) = \left(\frac{c_1}{\delta_1}\right)^{\delta_1} \left(\frac{c_2}{\delta_2}\right)^{\delta_2} \left(\frac{c_3}{\delta_3}\right)^{\delta_3}$$

Запишемо систему рівнянь, скориставшись умовами ортогональності та нормалізації:

$$\begin{aligned} n\delta_1 + a\delta_3 &= 0 \\ -\delta_1 - \delta_2 + 2\delta_3 &= 0 \\ \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 &= 1 \\ \delta_1 > 0, \quad \delta_2 > 0, &\quad \delta_3 > 0. \end{aligned}$$

Не складно переконатись, що цим вимогам задовольняє єдина точка

$$\delta^0 = \begin{bmatrix} -\frac{a}{3n} \\ \frac{2n+a}{3n} \\ 1/3 \end{bmatrix}.$$

Відповідно, максимум двоїстої функції $\upsilon(\delta_1^0, \delta_2^0, \delta_3^0)$ буде дорівнювати її значенню в цій точці, тобто

$$\upsilon_{opt} = \max\left[\left(\frac{c_1}{\delta_1^0}\right)^{\delta_1^0}\left(\frac{c_2}{\delta_2^0}\right)^{\delta_2^0}\left(\frac{c_3}{\delta_3^0}\right)^{\delta_3^0}\right]$$

Останнє, враховуючи умову нормалізації, перетворюється як (7)

$$\upsilon_{opt} = \left(\frac{k_1}{\delta_1^0}\right)^{\delta_1^0}\left(\frac{k_2}{\delta_2^0}\right)^{\delta_2^0}\left(\frac{k_3}{\delta_3^0}\right)^{\delta_3^0}\left(\frac{S}{ND_1\left(1-\alpha\right)^{N-1}}\right)^{2/3}\left(NL\right)^{1/3}.$$

Відповідно до теореми двоїстості [4], оптимальні значення швидкості та вантажопідйомність T знайдуться як рішення системи рівнянь: (8)

$$\begin{cases} c_1 T^n \nu^{-1} = \delta_1^0 \upsilon_{opt} \\ c_2 \nu^{-1} = \delta_2^0 \upsilon_{opt} \\ c_3 T^a \nu^2 = \delta_3^0 \upsilon_{opt} \end{cases} \quad (9)$$

Рішення (8) після відповідних перетворень запишемо

$$T^n = \left(\frac{\delta_1^0}{\delta_2^0}\frac{c_2}{c_1}\right) = \frac{a}{2n+a}\frac{k_2}{k_1}$$

або

$$T = \sqrt[n]{\frac{a}{2n+a}\frac{k_2}{k_1}} \quad . \quad (10)$$

$$v = \frac{k_2 3n\left(\frac{S}{N D_1(1-\alpha)^{N-1}}\right)^{1/3}}{(2n+a)\left(\frac{k_1}{\delta_1^0}\right)^{\delta_1^0}\left(\frac{k_2}{\delta_2^0}\right)^{\delta_2^0}\left(\frac{k_3}{\delta_3^0}\right)^{\delta_3^0}(NL)^{1/3}}$$

Таким чином, не складно переконатись, що при значеннях вантажопідйомності, визначених по (9), а швидкості – по виразу (10), витрати набувають мінімуму. Слід зауважити, що на ці параметри впливають обсяги поверхні, що підлягає обстеженню S, а також вони визначаються гідродинамічними та економічними параметрами, що визначаються конструкцією як корпусів підводних апаратів, так і, економічними характеристиками рушіїв.

На другому кроці складова – витрати пального I_3 – пропорційна гідродинамічному опору, який тепер можна визначити як

$$R = C_{RX}^{v} V^{\frac{2}{3}} \frac{\rho v^2}{2}$$

де V – повний підводний об'єм, ρ – густина води, C_{RX}^{v} – коефіцієнт опору, віднесений до характерної площі, що визначена по повному підводному об'єму апарата за виразом $V^{\frac{2}{3}}$;

Тепер, враховуючи, що загальний підводний об'єм пропорційний вантажопідйомності підводного апарата:

$$V = k_4 T^m \quad ,$$

а коефіцієнт опору визначається по величині числа Рейнольда:

$$C_{RX}^{v} = k_5 \mathrm{Re}^b = k_5\left(\frac{\nu D}{\nu}\right)^b = k_5 \frac{\nu^b V^{\frac{b}{3}}}{\nu^b} \quad . \quad (11)$$

де k_4, k_5, m, b – відповідні коефіцієнти апроксимації, D – характерний розмір апарата, ν – вязкість води, та подамо третю складову витрат

$$I_3 = k_6 NLT^{\frac{m(b+2)}{3}} \nu^{b+2}$$

Після алгебраїчних перетворень виразимо значення коефіцієнта k_6 через коефіцієнти апроксимації та q_V – величину теплотворної спроможності одиниці маси пального, η_P – ККД. перетворень енергії, C_V – вартість одиниці маси пального:

$$k_6 = \frac{C_v \rho k_5 k_4^{\frac{b+2}{3}}}{2\eta_p q_v \nu^b} \quad . \quad (12)$$

Підсумувавши всі витрати, представлені співвідношеннями (3), (5), (11), подамо загальні витрати як позіном вантажопідйомності та швидкості апарату:

$$g(T,V) = c_1 T^n \nu^{-1} + c_2 \nu^{-1} + c_4 T^{\frac{(b+2)m}{3}} \nu^{b+2}$$

де для зручності викладу позначено нову константу

$$C_4 = k_6\, NL.$$

Поставимо задачу визначення оптимальної швидкості та вантажопідйомності устаткування для забезпечення перевезень як задачу геометричного програмування без обмежень. Остання зводиться до визначення оптимальних коефіцієнтів ваги δ_i та знаходження двоїстої функції.

Подамо для позінома (12) двоїсту функцію

$$\upsilon(\delta) = \left(\frac{c_1}{\delta_1}\right)^{\delta_1}\left(\frac{c_2}{\delta_2}\right)^{\delta_2}\left(\frac{c_4}{\delta_3}\right)^{\delta_3}$$

Запишемо систему, скориставшись умовами ортогональності та нормалізації:

$$\begin{cases} n\delta_1 + \dfrac{(b+2)m}{3}\delta_3 = 0 \\ -\delta_1 - \delta_2 + (b+2)\delta_3 = 0 \\ \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 1 \\ \delta_1 > 0,\quad \delta_2 > 0,\quad \delta_3 > 0,\quad \delta_4 > 0. \end{cases}$$

Три доданки цільової функції за умов двох змінних у кожному з позіномів утворюють повну систему, тобто зводять її до задач з алгебраїчними параметрами – коефіцієнтами апроксимації. Розв'язок останньої отримаємо, якщо введемо параметр δ_4. Не складно переконатись, що цим вимогам задовольняє єдина точка

$$\upsilon_{opt} = \left(\frac{k_1}{\delta_1^0}\right)^{\delta_1^0}\left(\frac{k_2}{\delta_2^0}\right)^{\delta_2^0}\left(\frac{k_3}{\delta_3^0}\right)^{\delta_3^0}\left(\frac{S}{ND_1\left(1-\alpha\right)^{N-1}}\right)^{\frac{2+b}{3+b}}\left(NL\right)^{1/(b+3)}. \qquad (13)$$

$$\delta^0 = \begin{bmatrix} \dfrac{m}{3n}\dfrac{(2+b)}{(3+b)} \\[2ex] \dfrac{2+b}{3+b} - \dfrac{m}{3n}\dfrac{(2+b)}{(3+b)} \\[2ex] \dfrac{1}{3+b} \end{bmatrix} \qquad (14)$$

Відповідно, максимум двоїстої функції $\upsilon(\delta_1^0, \delta_2^0, \delta_3^0)$ буде дорівнювати її значенню в цій точці, тобто

$$\upsilon_{opt} = \max\left[\left(\frac{c_1}{\delta_1^0}\right)^{\delta_1^0}\left(\frac{c_2}{\delta_2^0}\right)^{\delta_2^0}\left(\frac{c_4}{\delta_3^0}\right)^{\delta_3^0}\right], \qquad (15)$$

Останнє, враховуючи умову нормалізації, перетворюється:

$$\nu = \frac{c_2}{\delta_2^0\upsilon_{opt}} = \frac{3nk_2(3+b)\left(\dfrac{S}{N\,D_1(1-\alpha)^{N-1}}\right)^{1/3}(NL)^{-1/3}}{(2+b)(3n-m)\left(\dfrac{k_1}{\delta_1^0}\right)^{\delta_1^0}\left(\dfrac{k_2}{\delta_2^0}\right)^{\delta_2^0}\left(\dfrac{k_6}{\delta_3^0}\right)^{\delta_3^0}}. \qquad (16)$$

Таким чином, не складно переконатись, що при значеннях вантажопідйомності, визначеної по (15), а швидкості – по виразу (16), витрати набувають мінімуму. Слід зауважити, що на такий параметр, як вантажопідйомність впливає відношення експлуатаційних витрат та раціональний підбір розташування устаткування у міцному корпусі апарата. Граничну швидкість сканування підводної поверхні визначають обсяги площі, що обстежується, а спроможність здійснення цих операцій визначається тільки гідродинамічними та економічними параметрами, що регламентується конструкцією як корпусів підводних апаратів, так і економічними характеристиками рушіїв, головної енергетичної установки та акумуляторних батарей підводного апарата, а також допоміжного бортового дизель-генераторного устаткування судна.

На третьому кроці покладемо, що підводний апарат має циліндричну форму зі сферичними кормовою та носовою переборкою. На подальше визначимо, що всередині легкого корпуса знаходиться міцний корпус, а також обладнання, що розташовано поза межами міцного корпуса, та джерела живлення, енергетичні установки та елементи плавучості і корисне обладнання для експрес-аналізу підводної поверхні.

Маса легкого корпуса обраховується як

$$m_{лк} = \left(1+\varphi_{лк}\right)\delta\, \rho_{лк}\, \Omega_{лк}\,,$$

де позначено $\varphi_{лк}$ – коефіцієнт, що враховує збільшення маси легкого корпуса за рахунок місцевих підкріплень, горловин, розгинів, ребер жорсткості, δ – товща обшивок, $\rho_{лк}$ – густина матеріалу, $\Omega_{лк}$ – змочена поверхня легкого корпуса.

Для обраної форми легкого корпуса величина площі змоченої поверхні дорівнює

$$\Omega_{лк} = \pi D\left(L-D\right) + \pi\, D^2 = \pi\, D^2\,\lambda\,,$$

де D, L – відповідно діаметр та довжина корпуса ПА, а $\lambda = L/D$ коефіцієнт відносного подовження апарата.

Повний підводний об’єм, обмежений відводами легкого корпусу, подамо:

$$V = \frac{1}{6}\pi D^3 + \frac{\pi D^2}{4}(L-D) = \frac{\pi D^3}{12}(3\lambda - 1).$$

Оскільки раніше у якості характерної площі ми використовували величину $V^{2/3}$, то подамо змочену поверхню у вигляді

$$\Omega_{лк} = \sqrt[3]{144\pi\frac{\lambda^3}{(3\lambda-1)^2}}\cdot V^{2/3}.$$

Таким чином, масу легкого корпуса обрахуємо як

$$m_{лк} = (1+\varphi_{лк})\sqrt[3]{144\pi\frac{\lambda^3}{(3\lambda-1)^2}}\cdot V^{2/3}\cdot\delta\rho_{лк}\,,$$

а об’єм елементів плавучості, що компенсує від’ємну плавучість легкого корпусу з урахуванням ваги устаткування експрес-аналізу, подамо

$$V_{пллк} = (1+\varphi_{лк})\left(1+\varphi_{ку}\right)\sqrt[3]{144\pi\frac{\lambda^3}{(3\lambda-1)^2}}\cdot V^{2/3}\cdot\delta\,\frac{\rho_{лк}-\rho_0}{\rho_0-\rho_{лк}}\,,$$

де $\varphi_{ку}$ – відносна маса корисного устаткування.

Тепер витрати на закупівлю матеріалу легкого корпуса та матеріалу блоків плавучості для компенсації ваги легкого корпуса обрахуємо:

$$I_4 = C_{лк} m_{лк} = (1+\varphi_{лк})\sqrt[3]{144\pi\frac{\lambda^3}{(3\lambda-1)^2}}\cdot\delta\rho_{лк}\, C_{лк} V^{2/3}, \tag{17}$$

$$I_5 = C_n V_{плк} = (1+\varphi_{лк})(1+\varphi_{ку})\sqrt[3]{144\pi\frac{\lambda^3}{(3\lambda-1)^2}}\cdot\delta\,\frac{\rho_{лк}-\rho_0}{\rho_0-\rho_{лк}} C_n\cdot V^{2/3}, \tag{18}$$

де $C_{лк}$, C_n – позначено вартість одиниці маси матеріалу легкого корпуса та одиниці об’єму матеріалу блоків плавучості відповідно.

Обрахуємо значення коефіцієнта опору як суму окремих доданків відповідно до [6, 7, 8] у вигляді

$$C_x = K_\lambda \left(C_{fnn} + \Delta C_{fm} \right) + C_\omega + \sum_{i=1}^{p} C_{xввч}, \qquad (19)$$

де K_λ – коефіцієнт впливу лінійного повздовження апарата на загальний опір; $C_{fпл}$ – коефіцієнт опору тертя плоскої пластини із відповідно равними довжиною та площею змоченої поверхні параметрам апарата, що проектується; ΔC_{fm} – надбавки на шорсткість зовнішньої поверхні апарата; C_ω – коефіцієнт вихрового опору, $C_{хввч}$ – коефіцієнти опору виступаючих частин.

Коефіцієнт K_λ враховує вплив лінійного повздовження апарата на загальний опір. Його значення за даними [6, 7, 8] добре апроксимується виразом

$$K_\lambda = a + k_7 \cdot \lambda^{-1}$$

або виразом більш придатним до постановки задачі проектування як задачі геометричного програмування у діапазоні значень λ від 6 до 12:

$$K_\lambda = a_1 \cdot (\lambda)^{d_1}, \quad a_1 = 1{,}121742535,$$

$$d_1 = -0{,}0422281.$$

Коефіцієнт опору тертя плоскої пластини прийнято [6, 7, 8] визначати за виразом

,

$$C_{fпл} = 0{,}075 / (\ell g \,\mathrm{Re} - 2)^2 - 1700 / \mathrm{Re}$$

за умов коли рух у пограничному прошарку носить перехідний ламінарно-турбулентний характер, тобто числа Рейнольда лежать у межах $5 \cdot 10^5 < \mathrm{Re} < 10^7$, а ,

$$C_{fпл} = 0{,}075 / (\ell g \,\mathrm{Re} - 2)^2$$

за умов турбулентного характеру руху, коли $\mathrm{Re} > 10^7$.

Коефіцієнт вихрового опору поданий за формулою Пампеля ,

$$C_\omega = 0{,}09 \frac{S^{3/2}}{\Omega_{лк}} \sqrt{\frac{\sqrt{2}}{2 L_k}}$$

де S площа міделевого перерізу, L_k – довжина кормової частини апарата, що складає частку $\alpha = \frac{L_k}{L}$, останій відповідно до попередніх позначок доцільно представити

$$C_\omega = 0{,}09 \frac{\pi^{7/6} D^{5/2}}{2^{53/12} \alpha^{1/2} \quad x \quad V^{2/3}} \sqrt{\frac{\sqrt{2}}{2 L_k}}$$

Врахувавши всі додаткові витрати, що представлені співвідношеннями (17), (18), а також

$$g(T, V) = c_1 T^n \, v^{-1} + c_2 \, v^{-1} + c_4 T^{\frac{(b+2)m}{3}} v^{b+2} a_1 \cdot (\lambda)^{d_1} + c_5 T^{\frac{2m}{3}} x, \qquad (20)$$

де для зручності викладу позначено нову константу:

$$c_5 = (1 + \varphi_{лк}) \sqrt[3]{144\pi} \cdot \delta \, k_4^{2/3} \left(\rho_{лк} \, C_{лк} + \frac{\rho_{лк} - \rho_0}{\rho_0 - \rho_{лк}} C_n (1 + \varphi_{ку}) \right)$$

та змінну

$$x = \frac{\lambda}{(3\lambda - 1)^{2/3}},$$

що також апроксимується виразом у діапазні значень λ від 6 до 12:

$$x = a_2 (\lambda)^{d_2}, \quad a_2 = 0{,}5250401361,$$

$$d_2 = 0{,}3054263081.$$

Тепер задача про граничні значення швидкості та вантажопідйомності та лінійного повздовження легкого корпуса зводиться до визначення оптимальних коефіцієнтів ваги δ_i як розв'язок системи алгебраїчних рівнянь та знаходження двоїстої функції

$$\upsilon(\delta) = \left(\frac{c_1}{\delta_1} \right)^{\delta_1} \left(\frac{c_2}{\delta_2} \right)^{\delta_2} \left(\frac{a_1 c_4}{\delta_3} \right)^{\delta_3} \left(\frac{a_2 c_5}{\delta_4} \right)^{\delta_4}.$$

Запишемо систему, скориставшись умовами

ортогональності та нормалізації:

$$\begin{cases} n\delta_1 + \dfrac{в+2}{3} m\delta_3 + \dfrac{2m}{3}\delta_4 = 0 \\ \delta_3 d_1 + \delta_4 d_2 = 0 \\ -\delta_1 - \delta_2 + (в+2)\delta_3 = 0 \\ \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 = 1 \end{cases}$$

Не складно переконатись, що цим вимогам задовольняє єдина точка

$$\delta^0 = \begin{bmatrix} \dfrac{m}{3n} \cdot \dfrac{2d_1 - (в+2)\cdot \mathrm{d}_2}{\mathrm{d}_2(в+3) - \mathrm{d}_1} \dfrac{m}{3n}\dfrac{(2+b)}{(3+b)} \\ \dfrac{d_2(в+2)(3\mathrm{n}+\mathrm{m}) - 2md_1}{3nd_2} \cdot \dfrac{d_2}{[d_2(в+3) - \mathrm{d}_1]} \\ \dfrac{\mathrm{d}_2}{\mathrm{d}_2(в+3) - \mathrm{d}_1} \\ \dfrac{\mathrm{d}_1}{\mathrm{d}_1 - \mathrm{d}_2(в+3)} \end{bmatrix}.$$

Відповідно, максимум двоїстої функції $\upsilon(\delta_1^0, \delta_2^0, \delta_3^0, \delta_4^0)$ буде дорівнювати її значенню в цій точці, тобто

$$\upsilon_{opt} = \max\left[\left(\frac{c_1}{\delta_1^0}\right)^{\delta_1^0}\left(\frac{c_2}{\delta_2^0}\right)^{\delta_2^0}\left(\frac{a_1c_4}{\delta_3^0}\right)^{\delta_3^0}\left(\frac{a_2c_5}{\delta_4^0}\right)^{\delta_4^0}\right].$$

Останнє, враховуючи умову нормалізації, перетворюється:

$$\upsilon_{opt} = \left(\frac{k_1}{\delta_1^0}\right)^{\delta_1^0}\left(\frac{k_2}{\delta_2^0}\right)^{\delta_2^0}\left(\frac{a_1k_6}{\delta_3^0}\right)^{\delta_3^0}\left(\frac{a_2c_5}{\delta_4^0}\right)^{\delta_4^0}\left(\frac{S}{ND_1(1-\alpha)^{N-1}}\right)^{\delta_1^0+\delta_2^0}(NL)^{\delta_3^0}. \tag{21}$$

Відповідно до теореми двоїстості [4], оптимальні значення швидкості та вантажопідйомності знайдуться як рішення системи рівнянь:

(22)

$$\begin{cases} c_1 T^n v^{-1} = \delta_1^0 \upsilon_{opt} \\ c_2 v^{-1} = \delta_2^0 \upsilon_{opt} \\ c_4 T^{\frac{(b+2)m}{3}} v^{b+2} a_1(\lambda)^{d_1} = \delta_3^0 \upsilon_{opt} \\ c_5 T^{\frac{2m}{3}} v^{b+2} a_2(\lambda)^{d_2} = \dot{\delta}_4^0 \upsilon_{opt} \end{cases}, \quad (23)$$

Рішення системи (22) після відповідних перетворень запишемо:

$$T = \sqrt[n]{\frac{\delta_1^0}{\delta_2^0}\frac{c_2}{c_1}}$$

$$v = \frac{c_2}{\delta_2^0 \upsilon_{opt}} \quad (24)$$

Таким чином, не складно переконатись, що на цьому кроці при значеннях вантажопідйомності, визначеної по (23), а швидкості – по виразу (24), витрати набувають мінімуму. Слід зауважити, що на такий параметр, як вантажопідйомність, впливає відношення експлуатаційних витрат та раціональний підбір розташування устаткування у міцному корпусі апарата, а також конструктивні параметри – діаметр та лінійне повздовження. Граничну швидкість сканування підводної поверхні визначають обсяги площі, що обстежується, а спроможність здійснення цих операцій визначається тільки гідродинамічними та економічними параметрами, що регламентується конструкцією як корпусів підводних апаратів, так і економічними характеристиками рушіїв, головної енергетичної

Література

1. Вашедченко А.Н. Пересчет элементов аппарата-прототипа в условиях неопределенности. Проектирование подводных аппаратов // Сб. научных трудов. – Николаев, 1990. – С. 31-35.
2. Вашедченко А.Н. Теория проектирования судов: Учебное пособие. Часть II. – Николаев: НКИ, 1979. – С. 10-27.
3. Войлошников М.В., Ишназаров Т.С. Перспективы развития много корпусных подводных аппаратов. Проектирование подводных аппаратов // Сб.научных трудов. – Николаев, 1990. – С. 24-30.
4. Зайченко Ю.П. Дослідження операцій: Підручник. – К., 2000. – 688 с.
5. Бекишев Г.А., Кратко М.И. Элементарное введение в геометрическое программирование. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – С. 144.
6. Букалов В.М.,Нарусбаев А.А. Проектирование атомных подводных лодок. – 2-е изд. – Л., Судостроение, 1968.
7. Лаврентьев В.М. Судовые движители. – Л.; М.: Морской транспорт, 1949.
8. Пантов Е.Н., Махин Н.Н., Шереметов Б.Б. Основы теории движения подводных аппаратов. – Л.: Судостроение, 1973.