ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ЗОНДИРОВАНИЯ С ДВИЖУЩЕГОСЯ НОСИТЕЛЯ

Н.В. Салтанов, П.Г. Авраменко, Н.С. Ефремова

Институт Гидромеханики Национальной Академии Наук Украины
252057,Киев, Желябова, 8/4

1. Введение. Процесс зондирования зондом, связанным с носителем тросом (кабель-тросом), состоит из двух основных режимов. А именно,режима опускания зонда с вытравливанием троса и режима его подъёма с выбиранием троса. В случае движущегося носителя этот процесс достаточно сложен (особенно в автоматическом режиме). Основными параметрами, которые необходимо определить для режима опускания зонда, являются усилия в тросе в конце торможения лебедки, длина вытравленной части троса, а также путь,который пройдет носитель до момента достижения зондом заданной глубины. В свою очередь , полученная длина вытравленной части троса позволяет определить вес троса, а также размеры барабана для его намотки. Величина усилий, действующих на трос у барабана, позволяет сделать оценку соответствия прочностных характеристик троса заданным глубине зондирования и скорости хода носителя. Второй основной режим процесса зондирования начинается с момента выбирания троса и заканчивается приходом зонда в первоначальное положение, соответствующее началу следующего цикла. Самым важным параметром, который необходимо определить для этого режима, является нагрузка на трос у барабана в начале выбирания. Как и для случая первого режима, связанные с этим расчеты важны для правильного подбора троса, позволяющего осуществить зондирование до заданной глубины и при заданной скорости носителя. Для оценки производительности работ по зондированию необходимо знать минимальный путь, который проходит носитель за один полный цикл, или время, которое он для этого затрачивает. Определению указанных выше основных параметров посвящена данная работа.

2. Приближенное решение уравнения погружения системы "трос–зонд". При исследовании процесса погружения системы "трос–зонд" с движущегося носителя, как и в работах [1,2], будем предполагать, что скорость разматывания троса с лебедки равна сумме абсолютных значений скоростей носителя и зонда, так что натяжение троса у лебедки близко к нулю и трос кинематически отслеживает траекторию зонда. Использование того допущения, что кинематически трос приближенно отслеживает траекторию зонда, сводит задачу к решению системы обыкновенных дифферинциальных уравнений [1,2]. При сделанных допущениях в пренебрежении силой инерции элементов системы для безразмерной глубины ζ погружения зонда в функции безразмерного времени τ в одномерном случае получается следующая задача:

$$\frac{d\zeta}{d\tau} = \frac{\sqrt{1+\gamma_w\zeta}}{\sqrt{\gamma_K + \gamma_k(\zeta + \bar{U}_0\tau)}}$$

$$\tau = 0, \quad \zeta = 0 \quad (0 \le \zeta \le 1),$$

$$\tau = \frac{U_* t}{H}; \quad \zeta = \frac{Z}{H}; \quad \bar{U}_0 = \frac{U}{U_*}; \quad \gamma_w = \frac{wH}{W_*};$$

$$\gamma_K = \frac{K_*\rho\Sigma_* U_*^2}{2W_*}; \quad \gamma_k = \frac{\pi K_f \rho d H U_*^2}{2W_*}. \qquad (1)$$

Здесь $t-$ время, $Z-$ текущее заглубление зонда, U_0- скорость судна, U_*- характерное значение скорости, $H-$ глубина погружения зонда, W_* и $w-$ вес в воде зонда и единицы длины троса, $\rho-$ плотность воды, K_* и $\sum_* -$ коэффициент сопротивления и максимальная площадь поперечного сечения зонда, K_f и $d-$ коэффициент сопротивления трения и диаметр троса. Если величина $\zeta(\tau)$ найдена, то соответствующая вытравленная длина S троса определится выражением

$$\sigma = \zeta + \bar{U}_0\tau, \quad \sigma = \frac{S}{H} \qquad (2)$$

Получим приближенное решение уравнения (1). Для этого в правой части (1) заменим величину ζ его средним по заглублению значением

$$\zeta \to 0,5. \qquad (3)$$

В результате получаем

$$\frac{d\zeta}{d\tau} = \frac{\sqrt{1+0,5\gamma_w}}{\sqrt{\gamma_K + 0,5\gamma_k + \gamma_k\bar{U}_0\tau}} \qquad (4)$$

Интегрируя уравнение (4) и удовлетворяя затем условию $\tau = 0, \zeta = 0$, будем иметь

$$\zeta = \frac{2\sqrt{1+0,5\gamma_w}\sqrt{\gamma_K + 0,5\gamma_k}}{\gamma_k\bar{U}_0} \times$$

$$\times \left(\sqrt{1 + \frac{\gamma_k\bar{U}_0\tau}{\gamma_K + 0,5\gamma_k}} - 1\right) \qquad (5)$$

Время τ_H достижение зондом глубины H находится из условия

$$\tau = \tau_H, \quad \zeta = 1. \qquad (6)$$

В результате для величины τ_H получаем следующее выражение

$$\tau_H = \sqrt{\frac{\gamma_K + 0,5\gamma_k}{1 + 0,5\gamma_w}} + \frac{\gamma_k \bar{U}_0}{4(1 + 0,5\gamma_w)} \qquad (7)$$

Для соответствующих вытравленной длины и скорости разматывания троса согласно (2) и (4) имеем

$$\sigma_H(H) = 1 + \bar{U}_0 \tau_H, \quad \sigma_H \equiv \frac{S_H}{H} \qquad (8)$$

$$\bar{U}_p^H \equiv \frac{d\sigma}{d\tau}\Big|_H = \bar{U}_0 + \frac{\sqrt{1 + 0,5\gamma_w}}{\sqrt{\gamma_K + \gamma_k(0,5 + \bar{U}_0\tau_H)}} \qquad (9)$$

Для натяжения троса у лебедки после окончания ее торможения в принятых допущениях справедливо следующие выражение

$$T_0 = \frac{\rho U_0^2}{20}\Big(\pi K_f d H \sigma_H + K_* \Sigma_*\Big) + \frac{wH}{10} \qquad (10)$$

Здесь натяжение T_0 выражено в килограммах, все величины справа в (10) взяты в системе СИ. Для минимального времени одного цикла зондирования и минимального пути, пройденного кораблем за один цикл зондирования имеем следующие приближенные выражения:

$$\tau_{min} = \tau_H + \frac{1 + \bar{U}_0\tau_H}{\bar{U}_{см}}, \quad \tau_{min} = \frac{U_* \tau_{min}}{H}$$

$$\xi_{min} = \bar{U}_0\Big(\tau_H + \frac{1 + \bar{U}_0\tau_H}{\bar{U}_{см}}\Big), \quad \xi_{min} = \frac{x_{min}}{H}$$

$$\bar{U}_{см} = \frac{U_{см}}{U_*} \qquad (11)$$

Здесь $U_{см}$ – скорость наматывания троса на лебедку. Изменение натяжения в коренной точке троса со временем с момента начала наматывания троса на барабан лебедки при сделанных допущениях такова:

$$T_0 = \frac{\rho \bar{U}_0^2}{20}\Big\{\pi K_f d H\Big[1 + \bar{U}_0\tau_H - \bar{U}_{см}(\tau - \tau_H)\Big] +$$

$$+ K_* \Sigma_*\Big\}\Big(1 + \frac{\bar{U}_{см}}{\bar{U}_0}\Big)^2 +$$

$$+ \frac{\kappa_0 w H}{10}\Big[1 - (\bar{U}_{см} + \bar{U}_0)(\tau - \tau_H)\Big], \qquad (12)$$

$$\Big[1 - (\bar{U}_{см} + \bar{U}_0)(\tau - \tau_H)\Big] > 0 \to \kappa_0 = 1,$$

$$\Big[1 - (\bar{U}_{см} + \bar{U}_0)(\tau - \tau_H)\Big] < 0 \to \kappa_0 = 0. \qquad (13)$$

Для равновесного угла $\alpha_{0см}$ между тросом и горизонтом при наматывании троса на барабан лебедки при выполнении условия

$$\tau \geq \tau_H + \frac{1}{\bar{U}_0 + \bar{U}_{см}}$$

справедлива оценка

$$\alpha_{0см} = (2\gamma_w)\Big/\Big(\gamma_k(\bar{U}_0 + \bar{U}_{см})^2 +$$

$$+ \sqrt{\gamma_k^2(\bar{U}_0 + \bar{U}_{см})^4 + 2\gamma_w(2\gamma_n \bar{U}_0^2 + \gamma_w)}\Big)$$

$$\gamma_n = \frac{K_n}{\pi K_f}\gamma_k \qquad (14)$$

Здесь K_n – коэффициент сопротивления троса при нормальном обтекании. Отметим, что величина $\alpha_{0см}$ от H не зависит, поскольку величины γ_w, γ_k и γ_n зависят от H линейно.

3. Анализ результатов расчета. На основе соотношений (7)–(11) были выполнены расчеты зависимостей $\tau_H(H)$, $\sigma_H(H)$, $U_p^H(H)$, $T_0(H)$, $\tau_{min}(H)$ и $\xi_{min}(H)$ для следующих значений параметров:

$$U_* = 1(\text{м/сек});\ K_f = 0,003;\ \rho = 10^3(\text{кг/м}^3);$$

$$g = 9,8(\text{м/сек}^2);\ K_* = 0.25;\ D_* = 0.075(\text{м})$$

$$(\Sigma_* = 0.25\pi D_*^2);$$

$$W_* = 100(\text{н});\ \epsilon = 0.25; 7\ (w = 0.25\epsilon\pi d^2\rho g);$$

$$d = 0,002; 0.003; 0,004(\text{м})\ U_0 = 5; 7,5; 10(\text{м/сек});$$

$$H = (500 + 100 \cdot m)(\text{м}), \quad m = 0, 1, 2, \ldots, 10 \quad (15)$$

Здесь ϵ – коэффициент,характеризующий превышение плотности материала над плотностью воды, D_* – наибольший диаметр сечения зонда. На основе соотношений (12) и (13) были выполнены расчеты зависимостей $T_0(\tau)$ для

$$H = 500; 1000; 1500(\text{м});\ \tau = \tau_H + \frac{1 + \bar{U}_0\tau_H}{\bar{U}_{см}}\frac{m}{20},$$

$$m = 0, 1, 2, \ldots, 20 \qquad (16)$$

При этом значения остальных параметров задавались согласно (15). На основе соотношения (14) были выполнены расчеты зависимостей $\alpha_{0см}(\bar{U}_0)$ для

$$K_n = 1,2;\ U_0 = 5 + 0,5 \cdot m(\text{м/сек}),$$

$$m = 0, 1, 2, \ldots, 10 \qquad (17)$$

При этом значения остальных параметров задавались согласно (15). Результаты расчетов представлены в виде таблиц и графиков.

Анализ данных таблиц и графиков позволяет сделать ряд принципиальных выводов, относящихся к созданию рассматриваемой системы зондирования. Прежде всего это то, что предложенную схему расчета можно рассматривать как одну из составляющих всего комплекса расчетов, которые необходимо проводить при проектировании всей системы и ее элементов

(электро–механическая часть, электроника, автоматика, система "трос–зонд"). Для конкретизации выводов, касающихся веса троса, рассматривался стальной трос ГОСТ 3069–66 диаметром 2,2;2,9 и 4,0 мм и для сравнения кевларовый трос такого же диаметра. Для решения вопроса возможностей обеспечения работы системы на заданных глубинах и скоростях хода носителя с точки зрения прочностных характеристик троса был принят стальной трос ГОСТ 3069–66 диаметром 2,2 мм (максимальное разрывное усилие 367 кгс), стальной трос ГОСТ 3067–66 диаметром 3,1 мм (максимальное разрывное усилие 821 кгс) и диаметром 4,0 мм (максимальное разрывное усилие 1385 кгс), а также кевларовый трос, имеющий те же диаметры и прочностные характеристики. При оценке допустимых нагрузок на трос принимался четырехкратный запас прочности. По отдельным рассматриваемым параметрам можно отметить следущее.

I. Время достижения зондом заданной глубины зависит от удельного веса материала троса, диаметра троса и скорости носителя. Стальной трос обеспечивает меньшее время достижения заданной глубины. При этом для него характерно относительное уменьшение этого времени с увеличением глубины зондирования. В случае кевларового троса с увеличением глубины зондирования наблюдается некоторое относительное уменьшение времени достижения заданной глубины с последующим относительным его увеличением.

Для иллюстрации влияния материала троса на время достижения заданной глубины можно отметить, что на глубину $H = 1500$ м (при $V_0 = 10$м/с) зонд со стальным тросом диаметром $d = 0,003$ м проходит почти в два раза быстрее, чем зонд с кивларовым тросом.

II. Длина вытравливаемого троса для достижения заданной глубины зондирования зависит от материала троса, диаметра троса, глубины зондирования и скорости носителя. При этом характер относительного изменения вытравленной длины троса с изменением глубины зондирования тот же, что и для времени достижения зондом заданной глубины зондирования.

Как иллюстрация– длина вытравленного кевларового троса диаметром 4,0 мм при глубине зондирования $H = 1500$ м и скорости хода носителя $V_0 = 10$м/с равна 9435 м. При этом вес троса равен 84,92 кг. В случае стального троса при тех же условиях длина вытравленного троса и его вес соответственно равны 5133 м и 277,18 кг.

III. Скорость разматывания троса по достижении зондом глубины H зависит от скорости движения носителя, диаметра и материала троса, а также глубины зондирования.

IV. Натяжения троса у лебедки после окончания торможения зависит от материала и диаметра троса, глубины зондирования, а также скорости движения носителя. При прочих равных условиях величина этого натяжения для кевларового троса больше, чем для стального. Зависимость величины натяжения для стального троса от глубины зондирования имеет практически линейный характер. Для кевларового троса линейность нарушается.

V. Минимальное время одного цикла зондирования и минимальный путь, пройденный при этом носителем зависят от материала и диаметра троса, глубины зондирования, а также скорости хода носителя. При прочих равных условиях рассматриваемые параметры для кевларового троса больше по сравнении с этими же параметрами для стального троса. При этом в случае стального троса с ростом глубины зондирования наблюдается относительное их уменьшение, а в случае кевларового троса, наоборот, наблюдается их относительный рост.

VI. Величина равновесного угла между тросом и горизонталью при выбирании зависит, главным образом, от скорости хода носителя и выбирания троса, диаметра и материала троса.

Данная работа выполнена в рамках раздела 6 концепции [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Saltanov N.V.* Contour Dynamic Model of Line in Fluids// Международный научно–технический семинар"Морское и экологическое приборостроение". сборник трудов.–Севастополь, Морск. гидрофиз. ин–т НАН Украины, 1995.– С. 49–50.

2. *Салтанов Н.В., Авраменко П.Г., Вовк В.Н., Ефремова Н.С., Салтанов В.Н.* Параметрический анализ динамики системы с движущегося носителя// Управление в системах мониторинга окружающей среды. Сб. трудов секции 14 3–й Украинской конференции по автоматическому управлению "Автоматика–96", Севастополь, 9–14 сент. 1996.– Севастополь, Морск. гидрофиз. ин–т НАН Украины, 1996.– С. 75–76.

3. Концепция построения автоматизированной системы экологического контроля вод Украины. Под общей редакцией В.А. Гайского и В.Н.Еремеева.– Севастополь, Морск.гидрофиз.ин–т НАН Украины, 1997.– 232 с.