

АНАЛИЗ ВРЕМЕНИ ТОРМОЖЕНИЯ И УСИЛИЙ БУКСИРУЮЩИХ СИСТЕМ, КОНТРОЛИРУЮЩИХ ВОДНУЮ СРЕДУ

Н.А. Греков, Н.В. Салтанов,
П.Г. Авраменко

Морской гидрофизический институт
НАН Украины

г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net
Институт гидромеханики НАН
Украины

г. Киев, ул. Желябова, 8/4
E-mail: saltanov@mail.ru

На основе подходов теоретической механики получена оценка времени торможения и нагрузок в системе трос-зонд при вынужденной остановке лебедки в процессе опускания зонда, используемого для контроля водной среды. Результаты исследований позволяют получить представление о времени торможения и возникающих при этом усилиях в системе при различных скоростях движения носителя, характеристиках троса и глубинах зондирования.

Введение. Настоящая работа является логическим продолжением цикла исследований [1-4], посвященных созданию системы зондирования с движущегося носителя (судна).

Процесс зондирования с движущегося носителя при использовании зонда, связанного с носителем тросом (кабель-тросом), состоит из двух основных режимов. Первый - это режим опускания зонда с вытравливанием троса и второй - режим подъема зонда с выбирианием троса.

Данные исследования посвящены оценке на основе подходов теоретической механики времени торможения и нагрузок в системе трос-зонд при вынужденной остановке лебедки в процессе опускания зонда, т.е. при осуществлении первого режима. В данном случае лебедка останавливается при постепенном уменьшении ее числа оборотов, или постепенном уменьшении скорости вытравливания троса. Рассмотрение этого случая обусловлено тем, что при резкой внезапной остановке лебедки могут иметь место усилия в системе, превосходящие допустимые. Результаты исследований

позволяют получить представление о времени торможения и действующих при этом усилиях в системе трос-зонд при различных скоростях движения носителя, характеристиках троса, глубинах зондирования и тем самым получить необходимую информацию, касающуюся принятия оптимального режима зондирования.

Данная работа выполнена в рамках раздела 6 концепции [5].

Основные соотношения. Пусть в некоторый момент времени вытравливание системы трос-зонд прекратилось из-за внезапного торможения лебедки. Вытравленная часть троса будет тормозиться под действием сил растяжения и сил гидродинамического сопротивления. Пусть величины E , S_d и L_H есть, соответственно, модуль Юнга, площадь поперечного сечения и длина вытравленной части троса, ΔL – величина растяжения троса после завершения растяжения. Тогда, используя закон Гука, для работы по растяжению троса получаем следующее выражение:

$$A_e = \frac{ES_d(\Delta L)^2}{2L_H}. \quad (1)$$

Будем считать, что при торможении скорость v_e концевого тела изменяется со временем по линейному закону

$$v_e = v_H - at, \quad a = \text{const}. \quad (2)$$

Здесь a – ускорение торможения. Время растяжения находим из условия

$$v_e|_{t=t_p} = 0.$$

В результате получаем

$$t_p = \frac{v_H}{a}. \quad (3)$$

Связь ускорения торможения с величиной растяжения троса ΔL определяем из условия

$$\int_0^{t_p} v_e dt = \Delta L. \quad (4)$$

Подставляя в (4) выражения (2) и (3) и проводя интегрирование, получаем

$$a = \frac{v_H^2}{2\Delta L}. \quad (5)$$

Подставляя выражение (5) в соотношение (3), будем иметь

$$t_p = \frac{2\Delta L}{v_H} . \quad (6)$$

Элемент работы A_* по преодолению силы сопротивления, действующей на зонд при растяжении троса, имеет вид

$$dA_* = \frac{K_* \rho \Sigma_* (v_H - at)^2}{2} ds, \\ ds = (v_H - at) dt . \quad (7)$$

Здесь ρ – плотность воды, K_* и Σ_* – коэффициент сопротивления и площадь миделева сечения зонда. Для всей работы A_* по преодолению силы сопротивления, действующей на зонд, имеем выражение:

$$A_* = \int_0^{l_p} dA_* . \quad (8)$$

Подставляя соотношения (7) в выражение (8) и выполняя интегрирование, запишем

$$A_* = \frac{1}{4} K_* \rho \Sigma_* \Delta L v_H^2 . \quad (9)$$

Оценим работу по преодолению силы сопротивления трения, действующей на трос при растяжении. Принимаем, что при растяжении скорость элементов троса v является линейно нарастающей функцией продольной координаты s_0 :

$$v = \frac{s_0}{L_H} (v_H - at), \quad 0 \leq s_0 \leq L_H . \quad (10)$$

Принимается также, что со временем скорость элементов троса меняется по линейному закону (2). Элемент работы A_f по преодолению силы сопротивления трения, действующей на элемент ds_0 троса, имеет вид

$$dA_f = \frac{\pi K_f \rho d}{2} \frac{s_0^2}{L_H^2} (v_H - at)^2 ds_0 ds_c, \\ ds_c = \frac{s_0}{L_H} (v_H - at) dt . \quad (11)$$

Здесь K_f и d – коэффициент сопротивления и диаметр троса. Выполняя в (11) интегрирование по s_0 от 0 до L_H , а по времени от 0 до t_p , будем иметь

$$A_f = \frac{1}{16} \pi K_f \rho d L_H \Delta L v_H^2 . \quad (12)$$

Для кинетической энергии троса и зонда в момент стопорения лебедки имеем следующее выражение:

$$E_k = \frac{m L_H + M_*}{2} v_H^2 . \quad (13)$$

Здесь m – масса единицы длины троса, M_* – масса зонда. Величину относительного удлинения троса после завершения растяжения ($\Delta L / L_H$) определим из условия равенства суммы работ A_e, A_f и A_* кинетической энергии троса и зонда в момент стопорения лебедки.

$$A_e + A_f + A_* = E_k . \quad (14)$$

Подставляя выражения (1), (9), (12) и (13) в соотношение (14), будем иметь

$$\left(\frac{\Delta L}{L_H} \right)^2 + 2\gamma_1 v_H^2 \frac{\Delta L}{L_H} - \gamma_0 v_H^2 = 0, \\ \gamma_0 = \frac{1}{ES_d} \left(m + \frac{M_*}{L_H} \right), \\ \gamma_1 = \frac{\rho}{4ES_d} \left(K_* \Sigma_* + \frac{\pi}{4} K_f d L_H \right) . \quad (15)$$

Решая полученное квадратное уравнение, получаем

$$\frac{\Delta L}{L_H} = \frac{\gamma_0 v_H^2}{\sqrt{\gamma_0 v_H^2 + \gamma_1^2 v_H^4} + \gamma_1 v_H^2} . \quad (16)$$

Пусть вклад сил гидродинамического сопротивления в баланс (14) мал,

$$\frac{\gamma_1^2 v_H^2}{\gamma_0} \ll 1 . \quad (17)$$

Тогда выражение (16) упрощается и принимает вид:

$$\frac{\Delta L}{L_H} = \sqrt{\gamma_0} v_H . \quad (18)$$

Для максимального значения силы растяжения справедливо соотношение:

$$F_e^{\max} = ES_d \frac{\Delta L}{L_H} . \quad (19)$$

Подставляя в соотношение (19) выражение (18), с учетом (15) запишем

$$F_e^{\max} = \sqrt{\left(m + \frac{M_*}{L_H}\right) E S_d v_H} . \quad (20)$$

Обратимся к соотношениям (6), (16) и (18). Введем безразмерное время торможения

$$\bar{t}_p = \frac{v_H t_p}{L_H} . \quad (21)$$

Учитывая в выражении (21) соотношение (6) и (16), будем иметь

$$\bar{t}_p = 2 \frac{\gamma_0 v_H^2}{\sqrt{\gamma_0 v_H^2 + \gamma_1^2 v_H^4 + \gamma_1 v_H^2}} . \quad (22)$$

Здесь величины γ_0 и γ_1 определяются согласно выражений (15). Если вклад гидродинамического сопротивления в баланс (14) мал, т.е. выполнено неравенство (17), то выражение для величины \bar{t}_p упрощается и принимает вид

$$\bar{t}_p = 2 \sqrt{\gamma_0} v_H . \quad (23)$$

Анализ результатов. В рамках принятой модели по полученным окончательным формулам были произведены оценочные расчеты по определению величины динамических нагрузок при внезапной остановке лебедки, а также времени растяжения кабель-троса. В расчетах были приняты следующие характеристики элементов системы трос-зонд.

Трос: коэффициент, характеризующий превышение плотности материала троса над плотностью воды – $\varepsilon = 0,25; 1,0; 3,0; 5,0$ и $7,0$, диаметр – $d = 0,003; 0,006$ м, коэффициент сопротивления трения – $K_f = 0,003$; модуль Юнга – $E = 2 \cdot 10^{11}$ н/м², вытравленная длина.

Зонд: диаметр – $D_* = 0,075$ м, масса – $M_* = 20$ кг, вес в воде – $W = 100$ н, коэф-

фициент сопротивления для продольного обтекания – $K_s = 0,25$.

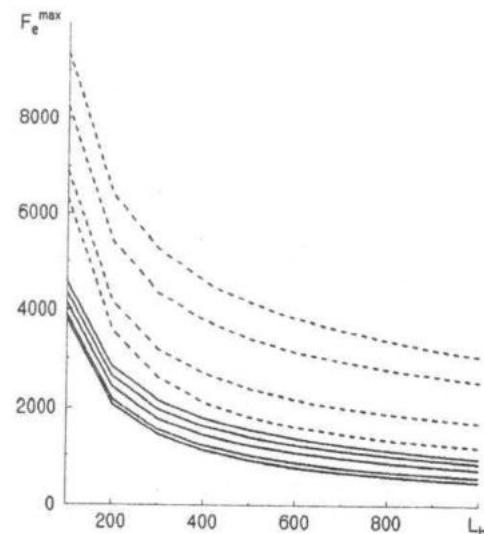


Рис. 1 – Зависимость максимальных усилий растяжения от вытравленной длины кабель-троса
— $d = 0,003$; - - - $d = 0,006$

Использовались следующие расчетные формулы для скорости зонда в начале растяжения, максимальных усилий в кабель-тросе и времени его растяжения

$$v_H = \sqrt{\frac{\frac{2W_*}{\rho} + \frac{\pi d^2}{2} L_H \varepsilon g}{K \cdot \frac{\pi D_*^2}{4} + \pi K_f d L_H}} , \quad (24)$$

$$F_e^{\max} = E \frac{\pi d^4}{4} \cdot \frac{\Delta L}{L_H} , \quad (25)$$

$$t_p = 2 \frac{L_H}{v_H} \cdot \frac{\Delta L}{L_H} , \quad (26)$$

$$L_H = 100 \text{ м} ,$$

$$n = 1, 2, \dots, 10.$$

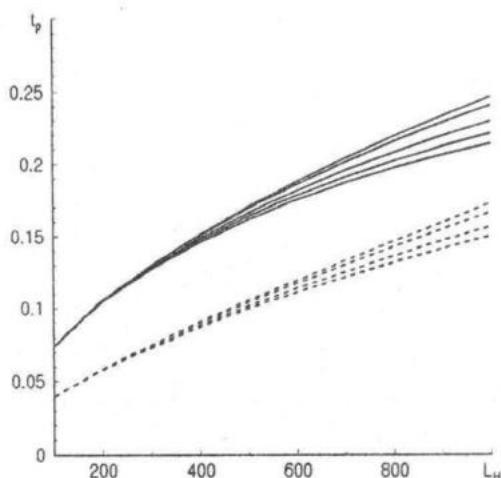


Рис. 2 – Зависимость времени растяжения кабель-троса от его вытравленной длины
— $d = 0,003$; - - - $d = 0,006$

Результаты расчетов представлены на рис. 1 и 2. При этом для сплошных кривых – $\varepsilon = 0,25; 1; 3; 5; 7$. Для пунктирных – $\varepsilon = 0,25; 1; 3; 5$. В целом можно говорить о следующем:

1. При прочих равных условиях уменьшение времени торможения приводит к увеличению нагрузок в системе.
2. Величина нагрузок при одном и том же диаметре падает с увеличением длины вытравленного троса.
3. Величина нагрузок при одном и том же диаметре возрастает с увеличением массы троса и увеличением скорости движения носителя.
4. Характер изменения величины нагрузок с изменением длины вытравленного троса зависит от его массы. Падение нагрузок с увеличением длины вытравленного троса для троса с меньшей массой происходит быстрее.
5. В случае выполнения неравенства (17) из соотношения (23) с учетом выражения (15) для γ_0 следует, что безразмерное время торможения системы при внезапной

остановке лебедки обратно пропорционально корню квадратному из произведения модуля Юнга на площадь поперечного сечения троса и прямо пропорционально произведению корня квадратного из эффективной распределенной массы $(m + M_s/L_H)$ на сумму скоростей U_0 и v_H .

ЛИТЕРАТУРА

1. Saltanov N.V. Contour Dynamic Model Line in Fluids // В кн.: “Морское и экологическое приборостроение”. Сборник трудов Международного научно-технического семинара, Севастополь, МГИ НАН Украины, 1995. - С. 49-50.
2. Салтанов Н.В., Авраменко П.Г., Ефремова Н.С. Определению основных параметров системы зондирования с движущегося носителя // В кн.: “Системы контроля окружающей среды”. Сборник трудов Международного научно-технического семинара, Севастополь, МГИ НАН Украины, 1998. - С. 74-76.
3. Греков Н.А., Салтанов Н.В. Измерение вертикальных распределений параметров водной среды с движущегося судна // В кн.: “Системы контроля окружающей среды”. Сборник научных трудов, Севастополь, МГИ НАН Украины, 2001.- С. 71-80.
4. Салтанов Н.В., Авраменко П.Г., Греков Н.А. Оценка динамических усилий в системе трос-зонд буксируемого комплекса контроля водной среды // В кн.: “Системы контроля окружающей среды”. Сборник научных трудов, Севастополь, МГИ НАН Украины, 2002. - С. 90-93.
5. Концепция построения автоматизированной системы экологического контроля вод Украины. Под общей редакцией В.А. Гайского и В.Н. Еремеева. - Севастополь, МГИ НАН Украины, 1997. - 232 с.