

**ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ
УСИЛИЙ В СИСТЕМЕ
ТРОС - ЗОНД
БУКСИРУЕМОГО КОМПЛЕКСА
КОНТРОЛЯ ВОДНОЙ СРЕДЫ**

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

*Институт гидромеханики
НАН Украины
г. Киев, ул. Желябова, 8/4
E-mail: saltanov@ukpost.net

** Морской гидрофизический
институт НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

Проведена оценка динамических усилий в системе трос-зонд контроля водной среды при внезапном торможении судовой лебедки на основе равенства суммы работ по преодолению силы натяжения и сил гидродинамического сопротивления кинетической энергии системы в момент остановки. Получена приближенная формула, позволяющая проанализировать влияние параметров системы на динамические усилия. Рассмотрена возможность уменьшения динамических усилий с помощью упругого демпфера.

Введение. Повышение оперативности экологического контроля водной среды может быть получено при использовании буксируемых комплексов.

Вертикальные и горизонтальные профили параметров экологических полей могут быть получены при сопутствующих измерениях как со специализированных экспедиционных, так и транспортных судов. Динамика системы буксировки-зондирования определяет пространственное разрешение профилей по вертикали и горизонтали. Анализ этой динамики и посвящена данная работа.

Данная статья 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 выбиранием троса.

Данные исследования посвящены оценке на основе подходов теоретической механики динамических нагрузок в системе трос-зонд при внезапной остановке лебедки в процессе опускания зонда, т.е. при осуществлении первого режима. Такое явление может иметь место в результате неисправностей в механических элементах лебедки, в системе управления ее работой, в случае нарушения электропитания, а также других возможных причин. Полученные результаты позволяют получить представление о величине вероятных динамических нагрузок при различных скоростях движения носителя, характеристиках троса, глубинах зондирования, и тем самым получить дополнительную информацию, касающуюся принятия расчетного режима для определения необходимых прочностных характеристик троса и элементов лебедки, крепления ее к корпусу судна. Также рассмотрена возможность включения в систему трос-зонд демфирующего элемента с целью уменьшения динамических нагрузок.

Данная работа выполнена в рамках раздела 6 концепции [9].

Основные соотношения. Пусть в некоторый момент времени вытравливание системы трос-зонд прекратилось из-за внезапной остановки 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. 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 конечного 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

$$v_* \Big|_{t=t_p} = 0$$

В результате получаем

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

Связь ускорения торможения с величиной растяжения троса ΔL определяем из условия

$$\int_0^{t_p} v_* dt = \Delta L \quad (4)$$

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

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

$$ds = (v_H - at) dt$$

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, будем иметь выражение

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

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

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

$$ds_c = \frac{s_0}{L_H} (v_H - at) dt$$

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 остановки лебедки имеем

$$E_k = \frac{mL_H + M_*}{2} (U_0 + v_H)^2 \quad (13)$$

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_c , A_f и A_e кинетической энергии троса и зонда в момент остановки лебедки.

$$A_c + A_f + A_e = E_k \quad (14)$$

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

$$\left(\frac{\Delta L}{L_H}\right)^2 + 2\gamma_1 v_H^2 \frac{\Delta L}{L_H} - \gamma_0 (U_0 + v_H)^2 = 0$$

$$\gamma_0 = \frac{1}{ES_d} \left(m + \frac{M_e}{L_H} \right),$$

$$\gamma_1 = \frac{P}{4ES_d} \left(K_s \Sigma_s + \frac{\pi}{4} K_f d L_H \right) \quad (15)$$

Решая полученное квадратное уравнение, получаем

$$\frac{\Delta L}{L_H} = \frac{\gamma_0 (U_0 + v_H)^2}{\sqrt{\gamma_0 (U_0 + v_H)^2 + \gamma_1^2 v_H^4} + \gamma_1 v_H^2} \quad (16)$$

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

$$\frac{\gamma_1^2 v_H^4}{\gamma_0 (U_0 + v_H)^2} \ll 1 \quad (17)$$

Тогда выражение (16) упрощается и принимает вид:

$$\frac{\Delta L}{L_H} = \sqrt{\gamma_0 (U_0 + v_H)^2} \quad (18)$$

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

$$F_e^{\max} = \sqrt{\left(m + \frac{M_e}{L_H} \right) ES_d (U_0 + v_H)} \quad (20)$$

Представляет несомненный интерес рассмотреть влияние параметров упругого демпфера, включенного в систему между тросом и зондом, на величину максимальной силы растяжения в системе. В пренебрежении силой гидродинамического сопротивления по той же схеме, что была изложена выше, получаем следующее выражение для максимального значения силы растяжения, учитывающее наличие упругого демпфера:

$$F_e^{\max} = \sqrt{\left(m + \varepsilon_D m_D + \frac{M_e}{L_H} \right) \frac{ES_d}{1 + \gamma_D} (U_0 + v_H)}$$

$$\varepsilon_D = \frac{L_D}{L_H}, \quad \gamma_D = \varepsilon_D \frac{ES_d}{E_D S_D} \quad (21)$$

Здесь L_D , S_D и E_D — длина, площадь поперечного сечения и модуль Юнга упругого демпфера.

В рамках принятой модели по полученным окончательным формулам были произведены оценочные расчеты по определению величины динамических нагрузок при внезапной остановке лебедки. В расчетах были приняты следующие характеристики элементов системы трос-зонд.

Трос — коэффициент, характеризующий превышение плотности материала троса над плотностью воды, $\varepsilon = 0,25; 1,0; 3,0; 5,0; 7,0$, диаметр, $d = 0,004$ м, коэффициент сопротивления трения, $K_f = 0,003$; модуль Юнга, $E = 2 \cdot 10^{11}$ н/м², вытравленная длина, $L_H = 25, 50, \dots, 125, 150, \dots, 2000$ м.

Зонд – диаметр, $D_z = 0,075$ м, масса, $M_z = 20$ кг, вес в воде, $W_z = 100$ н, коэффициент сопротивления для продольного обтекания, $K_z = 0,25$.

Скорость движения носителя принималась равной $U_0 = 0; 2,5; 5,0; 7,5$ и 10 м/с.

Анализ результатов, полученных на основании расчетов позволяет говорить о следующем.

1. Величина динамических нагрузок при одном и том же диаметре возрастает с увеличением массы троса и увеличением скорости движения носителя.

2. Величина динамических нагрузок при одном и том же диаметре падает с увеличением длины вытравленного троса.

3. Включение в систему трос-зонд упругого элемента позволяет существенно (в несколько раз) уменьшить величину динамических нагрузок.

4. Характер изменения величины динамических нагрузок с изменением длины вытравленного троса зависит от его массы. Падение динамических нагрузок с увеличением длины вытравленного троса для троса с меньшей массой происходит быстрее.

5. Величины динамических нагрузок, действующие на трос при внезапной остановке лебедки, могут быть значительными (при малой длине вытравленного троса могут превышать стационарное натяжение троса у барабана лебедки при его выборке) и с ними необходимо считаться в выборе прочностных упругих характеристик троса, его массы, и, в общем, при проектировании системы зондирования в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Салтанов Н.В. Гибкие нити в потоках. Киев, Наукова думка, 1974. - 140 с.
2. 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.
3. Салтанов Н.В., Авраменко П.Г., Вовк В.Н., Ефремова Н.С., Салтанов В.Н. Параметрический анализ динамики системы зондирования с движущегося носителя // В кн.: «Управление в системах мониторинга окружающей среды». Сборник трудов секции 14 3-й Украинской конференции по автоматическому управлению «Автоматика-96», Севастополь, МГИ НАН Украины, 1996, С. 75-76.
4. Салтанов Н.В. Динамика выборки системы трос-зонд на ходу носителя при постоянном моменте количества движения барабана лебедки с выбранной частью троса // Там же, С. 77-78.
5. Салтанов Н.В., Авраменко П.Г., Ефремова Н.С. Кинематика системы мониторинга на прямом курсе и на циркуляции // В кн.: «Диагноз состояния экосистемы Черного моря и зоны сопряжения суши и моря». Сборник трудов научной конференции, Севастополь, МГИ НАН Украины, 1997, С. 179-180.
6. Салтанов Н.В., Авраменко П.Г., Ефремова Н.С. Определение 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.
7. Салтанов Н.В., Авраменко П.Г., Ефремова Н.С. К определению основных параметров системы зондирования с движущегося носителя // В кн.: «Системы контроля окружающей среды». Сборник трудов Международного научно-технического семинара, Севастополь, МГИ НАН Украины, 1999, С. 46-47.
8. 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.
9. 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.