

**О ДВУХ СХЕМАХ  
БУКСИРОВАНИЯ  
ПРИ ПОВЕРХНОСТНОГО  
НОСИТЕЛЯ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА**

*П. Г. Авраменко\**, *В. С. Блинцов\*\*\**,  
*Ж. Ю. Бурунина\*\*\**, *В. А. Горбань\**,  
*Н.С. Ефремова\**, *В. И. Королев\**,  
*В. В. Крамской\*\**, *И. Н. Никула\*\**,  
*С. Н. Нужный\*\*\**, *Н. В. Салтанов\**

\*Институт гидромеханики

НАН Украины, Киев

\*\*ЦНИИ навигации и управления  
Минпромполитики Украины, Киев

\*\*\*Украинский государственный  
морской технических университет,  
Николаев

03057, г. Киев, ул. Желябова, 8/4

E-mail: saltanov@mail.ru

*Определены максимальные усилия в связях и другие параметры буксируемой системы применительно к двум схемам буксирования приповерхностного носителя измерительного комплекса (в дальнейшем: ПНИК). При анализе использованы как аналитические, так и численные решения исходной системы уравнений.*

Постановка задачи. Первая схема буксирования ПНИК приведена на рис. 1:

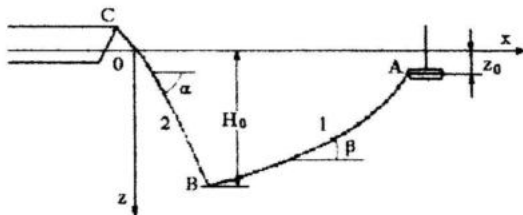


Рис. 1. Схема системы буксирования.

Точка 0 пересечения кабель-буксира 2, связывающего носитель С и заглубитель В, с поверхностью воды, принята за начало системы координат  $zOx$ , движущейся вместе с носителем. Величина  $\alpha$  - текущий угол, который

составляет кабель-буксир 2 с осью  $x$ . Кабель-буксир 1 связывает заглубитель В с ПНИК А. Величина  $z_0$  - отстояние ПНИК от поверхности воды, величина  $\beta$  - текущий угол, который составляет с осью  $x$  кабель-буксир 1.

Предполагаются заданными:

- скорость буксирования системы  $U_0$ ;
- горизонт заглубителя  $z = H_0$ ;
- диаметр  $d$  и коэффициенты сопротивления формы  $K_n$  и трения  $K_f$  кабель-буксиров;
- топящая сила  $W_*$  и сила гидродинамического сопротивления  $P_*$ , действующие на заглубитель;
- подъемная сила  $W_m$  и сила гидродинамического сопротивления  $P_m$ , действующие на ПНИК.

Необходимо определить:

- длины  $L_m$  и  $L_H$  кабель-буксиров 1 и 2, соответственно;
- натяжение  $T_0$  в кабель-буксире 2 в точке его крепления к носителю;
- другие кинематические и динамические величины, характеризующие рассматриваемую схему буксирования системы.

Исходная система уравнений и ее точное решение. В пренебрежении растяжимостью и плавучестью кабель-буксиров уравнения их равновесия в потоке имеют вид [1, 2]:  
для кабель-буксира 2

$$\frac{d\tau}{d\zeta} + \kappa_f \operatorname{ctg} \alpha = 0, \quad (1)$$

$$\tau \frac{d\alpha}{d\zeta} - \kappa_n \sin \alpha - \kappa_f = 0, \quad (2)$$

$$\frac{d\xi}{d\zeta} = \operatorname{ctg} \alpha, \quad (3)$$

$$\frac{d\sigma}{d\zeta} = \frac{1}{\sin \alpha}; \quad (4)$$

для кабель-буксира 1

$$\frac{d\tau}{d\zeta} - \kappa_f \operatorname{ctg} \beta = 0, \quad (5)$$

$$\tau \frac{d\beta}{d\zeta} + \kappa_n \sin \beta + \kappa_f = 0, \quad (6)$$

$$\frac{d\xi}{d\zeta} = -\operatorname{ctg} \beta, \quad (7)$$

$$\frac{d\sigma}{d\zeta} = -\frac{1}{\sin \beta}. \quad (8)$$

В соотношениях (1)-(8) безразмерные величины  $\zeta, \xi, \sigma, \tau, \kappa_n$  и  $\kappa_f$  определяются следующими выражениями:

$$\zeta = \frac{z}{H_0}, \quad \xi = \frac{x}{H_0}, \quad \sigma = \frac{s}{H_0},$$

$$\tau = \frac{T}{T_*}, \quad T_* = \sqrt{W_*^2 + P_*^2},$$

$$\kappa_n = \frac{K_n d \rho U_0^2 H_0}{2 T_*}, \quad \kappa_f = \frac{\pi K_f}{K_n} \kappa_n. \quad (9)$$

Здесь  $s$  - текущая длина кабель-буксира,  $T$  - натяжение в кабель-буксире,  $\rho$  - плотность воды. Уравнения (1) и (5) определяют изменение натяжений в кабель-буксирах при изменении координаты  $\zeta$ , а соотношения (2) и (6) - изменение углов наклона кабель-буксиров к оси  $x$ . Соотношения (3), (4), (7) и (8) имеют геометрический смысл.

Точное решение системы уравнений (1)-(4) имеет следующий вид [1-3]:

$$\tau = \tau_0 \frac{\kappa_n + \frac{\kappa_f}{\sin \alpha}}{\kappa_n + \frac{\kappa_f}{\sin \alpha_0}}, \quad (10)$$

$$\alpha = 2 \operatorname{arctg} \left( \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} e^{\gamma \zeta} \right), \quad (11)$$

$$\xi = \frac{1}{\gamma \sin \alpha_0} -$$

$$- \frac{1}{2\gamma} \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2}} e^{-\gamma \zeta} + \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} e^{\gamma \zeta} \right) \quad (12)$$

$$\sigma = \frac{1}{2\gamma} \left[ \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} (e^{\gamma \zeta} - 1) + \frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2}} (1 - e^{-\gamma \zeta}) \right] \quad (13)$$

$$\gamma = \frac{1}{\tau_0} \left( \kappa_n + \frac{\kappa_f}{\sin \alpha_0} \right) \quad (14)$$

Здесь  $\tau_0$  и  $\alpha_0$  есть, соответственно, натяжение и угол наклона кабель-буксира 2 к оси  $x$  в точке  $z = 0, x = 0$ .

Решение системы уравнений (5)-(8), имеет вид, аналогичный решению (10)-(14):

$$\tau = \tau_{1H} \frac{\kappa_n + \frac{\kappa_f}{\sin \beta}}{\kappa_n + \frac{\kappa_f}{\sin \beta_H}}, \quad (15)$$

$$\beta = 2 \operatorname{arctg} \left[ \operatorname{tg} \frac{\beta_H}{2} e^{\gamma_1 (1-\zeta)} \right], \quad (16)$$

$$\xi = \frac{1}{\gamma_1 \sin \beta_H} + \frac{1}{\gamma \sin \alpha_0} -$$

$$- \frac{1}{2\gamma} \left( \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} e^{\gamma} + \frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2}} e^{-\gamma} \right) -$$

$$- \frac{1}{2\gamma_1} \left[ \operatorname{tg} \frac{\beta_H}{2} e^{\gamma_1 (1-\zeta)} + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\beta_H}{2}} e^{\gamma_1(\zeta-1)} \right], \quad (17)$$

$$\sigma = \frac{1}{2\gamma_1} \left\{ \operatorname{tg} \frac{\beta_H}{2} \left[ e^{\gamma_1(1-\zeta)} - 1 \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\beta_H}{2}} \left[ 1 - e^{\gamma_1(\zeta-1)} \right] \right\}, \quad (18)$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{\tau_{1H}} \left( \kappa_n + \frac{\kappa_f}{\sin \beta_H} \right). \quad (19)$$

Здесь  $\tau_{1H}$  и  $\beta_H$  - натяжение и угол наклона кабель-буксира 1 к оси  $x$  в точке его крепления к заглубителю  $B$ .

Далее для натяжения и угла наклона кабель-буксира 2 к оси  $x$  в точке его крепления к заглубителю будут использованы обозначения  $\tau_H$  и  $\alpha_H$ , соответственно.

Красвые условия. Краевое условие на ПНИК  $A$  имеет следующий вид:

$$T_m \bar{m}_m = W_m \bar{e}_z + P_m \bar{e}_x,$$

$$\bar{m}_m = \sin \beta_m \bar{e}_z + \cos \beta_m \bar{e}_x,$$

$$\sin \beta_m = \frac{W_m}{T_m}, \quad \cos \beta_m = \frac{P_m}{T_m},$$

$$T_m = \sqrt{W_m^2 + P_m^2} \quad (20)$$

Здесь  $T_m$  и  $\beta_m$  - натяжение в кабель-буксире 1 и угол кабель-буксира 1 с горизонтом в точке его крепления к ПНИК.

Условия равновесия сил на заглубителе  $B$  таково:

$$-\tau_H \bar{m}_H + \bar{e}_* + \tau_{1H} \bar{m}_{1H} = 0,$$

$$\bar{m}_H = \cos \alpha_H \bar{e}_x + \sin \alpha_H \bar{e}_z,$$

$$\bar{m}_{1H} = \cos \beta_H \bar{e}_x + \sin \beta_H \bar{e}_z,$$

$$\bar{e}_* = \cos \alpha_* \bar{e}_x + \sin \alpha_* \bar{e}_z,$$

$$\cos \alpha_* = \frac{P_*}{N_*}, \quad \sin \alpha_* = \frac{W_*}{T_*}. \quad (21)$$

Здесь  $\tau_H$  и  $\alpha_H$  - натяжение в кабель-буксире 2 и угол кабель-буксира 2 с горизонтом в точке его крепления к заглубителю  $B$ ,  $\tau_{1H}$  и  $\beta_H$  - натяжение в кабель-буксире 1 и угол кабель-буксира 1 с горизонтом в точке его закрепления к заглубителю  $B$ .

Расчетные соотношения. Удовлетворяя с помощью решений (10)-(14) и (15)-(19) крайевым условиям (20) и (21), приходим к расчетным соотношениям. Для кабель-буксира 1 они имеют следующий вид:

$$\tau_m = \frac{T_m}{T_*}, \quad \beta_m = \arcsin \frac{W_m}{T_m},$$

$$\beta_H = 2 \operatorname{arctg} \left[ \operatorname{tg} \frac{\beta_m}{2} e^{-\gamma_1(1-\zeta_0)} \right]$$

$$\tau_{1H} = \tau_m \frac{\kappa_n + \frac{\kappa_f}{\sin \beta_H}}{\kappa_n + \frac{\kappa_f}{\sin \beta_m}},$$

$$\sigma_m = \frac{1}{2\gamma_1} \left\{ \operatorname{tg} \frac{\beta_m}{2} \left[ 1 - e^{-\gamma_1(1-\zeta_0)} \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\beta_m}{2}} \left[ e^{\gamma_1(1-\zeta_0)} - 1 \right] \right\},$$

$$\zeta_0 = \frac{z_0}{H_0}, \quad \gamma_1 = \frac{1}{\tau_m} \left( \kappa_n + \kappa_f \frac{T_m}{W_m} \right)$$

$$\tau_{1H} = \frac{T_{1H}}{T_*}, \quad \sigma_m = \frac{L_m}{H_0}. \quad (22)$$

Здесь  $T_{1H}$  - натяжение в кабель-буксире 1 в точке его крепления к заглубителю  $B$ .

Расчетные соотношения для кабель-буксира 2 таковы:

$$\tau_H = \sqrt{1 + 2\tau_{1H} \cos(\alpha_* - \beta_H) + \tau_{1H}^2},$$

$$\alpha_H = \arcsin \left[ \frac{1}{\tau_H} (\sin \alpha_* + \tau_{1H} \sin \beta_H) \right],$$

$$\alpha_0 = 2 \operatorname{arctg} \left[ \operatorname{tg} \frac{\alpha_H}{2} \exp(-\gamma) \right],$$

$$\tau_0 = \frac{1}{\gamma} \left( \kappa_n + \frac{\kappa_f}{\sin \alpha_0} \right),$$

$$\sigma_H = \frac{1}{2\gamma} \left[ \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} (e^\gamma - 1) + \frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2}} (1 - e^{-\gamma}) \right],$$

$$\gamma = \frac{1}{\tau_H} \left( \kappa_n + \frac{\kappa_f}{\sin \alpha_H} \right)$$

$$\tau_H = \frac{T_H}{T_*}, \quad \tau_0 = \frac{T_0}{T_*}, \quad \sigma_H = \frac{L_H}{H_0} \quad (23)$$

Здесь  $T_H$  - натяжение в кабель-буксире 2 в точке его крепления к заглубителю В.

Катенарная кривая  $\xi = \xi(\zeta)$  для кабель-буксира 2 имеет следующий вид:

$$\xi = \frac{1}{\gamma \sin \alpha_0} - \frac{1}{2\gamma} \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2}} e^{-\gamma \zeta} + \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} e^{\gamma \zeta} \right) \quad 0 \leq \zeta \leq 1 \quad (24)$$

Катенарная кривая  $\xi = \xi(\zeta)$  для кабель-буксира 1 такова:

$$\xi = \frac{1}{\gamma \sin \alpha_0} - \frac{1}{2\gamma} \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2}} e^{-\gamma} + \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} e^\gamma \right) +$$

$$+ \frac{1}{2\gamma_1} \left\{ \operatorname{tg} \frac{\beta_m}{2} e^{\gamma_1(\zeta_0-1)} [1 - e^{\gamma_1(1-\zeta)}] + \right. \\ \left. + \frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\beta_m}{2}} e^{\gamma_1(1-\zeta_0)} [1 - e^{\gamma_1(\zeta-1)}] \right\},$$

$$1 \geq \zeta \geq \zeta_0. \quad (25)$$

Примеры расчетов. На основе соотношений (22)- (25) были выполнены расчеты величин  $\tau_m$ ,  $\beta_m$ ;  $\tau_{1H}$ ,  $\beta_H$ ;  $\tau_H$ ,  $\alpha_H$ ,  $\sigma_H$ ;  $\tau_0$ ,  $\alpha_0$  и  $T_0$ , а также катенарных кривых при следующих значениях параметров:

$$K_f = 0,005, \rho = 1020 \text{ (кг/м}^3\text{)},$$

$$d = 0,0132 \text{ (м)}$$

$$U_0 = 2 \text{ (м/сек)},$$

$$H_0 = 100 \text{ (м)}, z_0 = 1 \text{ (м)}; \quad (26)$$

$$(a) W_* = 10043,168 \text{ (н)}, P_* = 33,0 \text{ (н)}$$

$$W_m = 1564,33 \text{ (н)}, P_m = 457,61 \text{ (н)}; \quad (27)$$

$$(б) W_* = 27558,45 \text{ (н)}, P_* = 64,68 \text{ (н)};$$

$$W_m = 1764,65 \text{ (н)}, P_m = 508,68 \text{ (н)}; \quad (28)$$

$$K_n = 0,2; 0,5; 0,8; 1,2; 2,0. \quad (29)$$

Результаты расчетов представлены на рисунках 2(а) и 3(б). Можно видеть что наличие обтекателей у кабель-буксиров весьма существенно влияет на форму катенарных кривых и длины кабель-буксиров, а также усилия в их характерных точках.

Выше на основе точного решения получены характеристики системы буксирования ПНИК по первой схеме. В случае второй схемы ПНИК буксирует исследовательский подводный аппарат, находящийся на заданной глубине  $H_0$ . Кинематические и силовые характеристики в этом случае описывают соотношения (22). Если выполнено

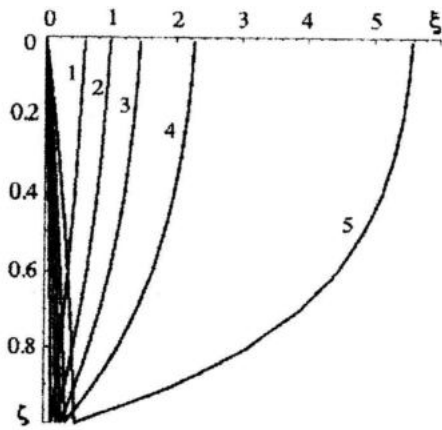


Рис. 2. Катенарные кривые буксируемой системы с заглубителем.

а)

$$K_f = 0.005; \rho = 1020 \text{ (кг/м}^3\text{)}; z_0 = 1 \text{ (м)};$$

$$d = 0.0132 \text{ (м)}; U_0 = 2 \text{ (м/сек)}; H_0 = 100 \text{ (м)};$$

$$P_* = 33.0 \text{ (н)}; W_* = 10043.168 \text{ (н)};$$

$$P_m = 457.612 \text{ (н)}; W_m = 1564.326 \text{ (н)};$$

$$\tau_m = 0.162; \beta_m = 1.286;$$

$$1 - K_n = 0.2; \sigma_m = 1.105; \tau_{1H} = 0.164;$$

$$\beta_H = 0.969; \tau_H = 1.139; \alpha_H = 1.486;$$

$$\sigma_H = 1.006; \tau_0 = 1.140; \alpha_0 = 1.436;$$

$$T_0 = 1165.852 \text{ (кГс)}.$$

$$2 - K_n = 0.5; \sigma_m = 1.288; \tau_{1H} = 0.166;$$

$$\beta_H = 0.623; \tau_H = 1.105; \alpha_H = 1.446;$$

$$\sigma_H = 1.018; \tau_0 = 1.106; \alpha_0 = 1.323;$$

$$T_0 = 1131.192 \text{ (кГс)}.$$

$$3 - K_n = 0.8; \sigma_m = 1.590; \tau_{1H} = 0.167;$$

$$\beta_H = 0.389; \tau_H = 1.075; \alpha_H = 1.423;$$

$$\sigma_H = 1.033; \tau_0 = 1.076; \alpha_0 = 1.226;$$

$$T_0 = 1100.685 \text{ (кГс)}.$$

$$4 - K_n = 1.2; \sigma_m = 2.257; \tau_{1H} = 0.170;$$

$$\beta_H = 0.204; \tau_H = 1.048; \alpha_H = 1.408;$$

$$\sigma_H = 1.056; \tau_0 = 1.050; \alpha_0 = 1.113;$$

$$T_0 = 1073.707 \text{ (кГс)}.$$

$$5 - K_n = 2.0; \sigma_m = 5.328; \tau_{1H} = 0.184;$$

$$\beta_H = 0.055; \tau_H = 1.027; \alpha_H = 1.388;$$

$$\sigma_H = 1.114; \tau_0 = 1.029; \alpha_0 = 0.914;$$

$$T_0 = 1052.662 \text{ (кГс)}.$$

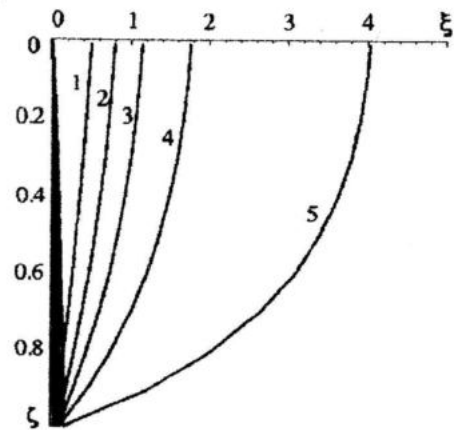


Рис. 3. Катенарные кривые буксируемой системы с заглубителем.

б)

$$K_f = 0.005; \rho = 1020 \text{ (кг/м}^3\text{)}; z_0 = 1 \text{ (м)};$$

$$d = 0.0132 \text{ (м)}; U_0 = 2 \text{ (м/сек)}; H_0 = 100 \text{ (м)};$$

$$P_* = 64.68 \text{ (н)}; W_* = 27558.451 \text{ (н)};$$

$$P_m = 508.676 \text{ (н)}; W_m = 1764.654 \text{ (н)};$$

$$\tau_m = 0.067; \beta_m = 1.290;$$

$$1 - K_n = 0.2; \sigma_m = 1.093; \tau_{1H} = 0.067;$$

$$\beta_H = 1.005; \tau_H = 1.058; \alpha_H = 1.534;$$

$$\sigma_H = 1.001; \tau_0 = 1.058; \alpha_0 = 1.515;$$

$$T_0 = 2968.057 \text{ (кГс)}.$$

$$2 - K_n = 0.5; \sigma_m = 1.242; \tau_{1H} = 0.068;$$

$$\beta_H = 0.683; \tau_H = 1.044; \alpha_H = 1.518;$$

$$\sigma_H = 1.003; \tau_0 = 1.044; \alpha_0 = 1.470;$$

$$T_0 = 2930.768 \text{ (кГс)}.$$

$$3 - K_n = 0.8; \sigma_m = 1.479; \tau_{1H} = 0.068;$$

$$\beta_H = 0.452; \tau_H = 1.032; \alpha_H = 1.509;$$

$$\sigma_H = 1.005; \tau_0 = 1.032; \alpha_0 = 1.432;$$

$$T_0 = 2896.008 \text{ (кГс)}.$$

$$4 - K_n = 1.2; \sigma_m = 1.980; \tau_{1H} = 0.069;$$

$$\beta_H = 0.256; \tau_H = 1.020; \alpha_H = 1.503;$$

$$\sigma_H = 1.009; \tau_0 = 1.020; \alpha_0 = 1.387;$$

$$T_0 = 2862.650 \text{ (кГс)}.$$

$$5 - K_n = 2.0; \sigma_m = 4.092; \tau_{1H} = 0.073;$$

$$\beta_H = 0.081; \tau_H = 1.009; \alpha_H = 1.497;$$

$$\sigma_H = 1.016; \tau_0 = 1.009; \alpha_0 = 1.305;$$

$$T_0 = 2831.256 \text{ (кГс)}.$$

условие  $\xi / \zeta=0 = 0$ , то катенарная кривая для кабель-буксира в этом случае такова:

$$\xi = \frac{1}{2\gamma_1} \left\{ \operatorname{tg} \frac{\beta_m}{2} e^{\gamma_1(\zeta_0-1)} [1 - e^{\gamma_1(1-\zeta)}] + \frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\beta_m}{2}} e^{\gamma_1(1-\zeta_0)} [1 - e^{\gamma_1(\zeta-1)}] \right\} \quad (30)$$

Напомним, что здесь величина  $\gamma_1$  определяется согласно соотношения (19).

В случае первой схемы буксирования поставленная задача решалась также на основе дискретной модели [1, 4]. Результаты, полученные на основе решения уравнений дискретной модели, удовлетворительно согласуются с результатами, полученными на основе точного решения.

В случае второй схемы буксирования при анализе, наряду с точным решением, использовались численные решения уравнений как дискретной, так и непрерывной моделей. Результаты, полученные на основе всех трех подходов, также выявили их удовлетворительное согласие.

Упрощенная модель. Смоделируем кабель-буксиры  $AB$  и  $BO$  жесткими прямолинейными стержнями. Исходными в этой модели являются условия равенства нулю действующих на эти стержни моментов сил относительно точек  $B$  и  $O$ , соответственно. В результате в пренебрежении силой сопротивления трения ( $K_0$ ) получаем следующие расчетные соотношения

$$\beta_m = \operatorname{arctg} \frac{\gamma_m^* \sin \beta_0}{1 - \zeta_0 + \gamma_m^* \cos \beta_0},$$

$$\alpha_0 = \operatorname{arctg} \left\{ \left[ \gamma_0 \sin \alpha_0 - \gamma_m^* \sin \beta_m \cos(\beta_0 - \beta_m) \right] / \right.$$

$$\left. / \left[ 1 + \gamma_0 \cos \alpha_0 + \gamma_m^* \cos \beta_m \cos(\beta_0 - \beta_m) \right] \right\},$$

$$\sigma_m = \frac{1 - \zeta_0}{\sin \beta_m}, \quad \sigma_H = \frac{1}{\sin \alpha_0},$$

$$\tau_0 = \cos(\alpha_0 - \alpha_m) +$$

$$+ \kappa_m^* \cos(\beta_0 - \beta_m) \cos(\alpha_0 + \beta_m) \quad (31)$$

Здесь величины  $\beta_m, \alpha_0, \alpha_m, \sigma_m, \sigma_H, \tau_0$  и  $\zeta_0$  имеют тот же смысл, что и выше.

Безразмерные параметры  $\gamma_0, \gamma_m^*, \kappa_m^*$  и  $\beta_0$  являются заданными функциями параметров  $\rho, d, K_n, U_0, H_0, W_0, P_0, W_m$  и  $P_m$ .

Расчеты, выполненные на основе соотношений (31), приближенно соответствуют результатам расчетов, приведенным выше.

В заключение отметим, что в расчетах использовались, в частности, данные экспериментальных измерений гидродинамических характеристик

( $C_x, C_y$ ) конкретного образца обтекателя ПНИК, полученные в Опытном бассейне Института гидромеханики НАН Украины.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Салтанов Н.В. Гибкие нити в потоках. - Киев: Наук. думка, 1974. - 140 с.
2. Егоров В. И. Подводные буксируемые системы. - Л.: Судостроение, 1981. - 304 с.
3. Горшков А. С. Обобщение формул А. Н. Крылова для расчета натяжения и формы гибкой нити в потоке // Океанология. - 1969. - 9, вып. 6. - С. 75-81.
4. Королев В.И., Семененко В.Н. Метод расчета положения равновесия тела, удерживаемого нитью в потоке с произвольной скоростью // Гидромеханика. - 1975. - вып. 32. - С. 83-86.