

- dvizheniya morskikh sudov [Tekst]: Avtoref. diss. na soisk. uch. st. d.t.n. (05.13.18). – Vladivostok: IAPU DVO RAN, 2016. – 36 s.
8. Zaharov, K.V. Obnaruzhenie manyovrov nadvodnykh sudov s uchyotom kosvennykh priznakov [Tekst]: Avtoref. diss. na soisk. uch. st. k.t.n.-Ul'yanovsk: FGBOU VPO UGTU, 2014. – 22 s.
 9. Logvinov, M.A. Algoritm soprovozhdeniya manevriruyushchih celej [Tekst]/ M.A.Logvinov, A.S.Burov, S.N.Barcevic// Nauka i obrazovanie (elektronnoe izdanie).- 2012.- №01.- S.1-15. (77-30569/293090, <http://technomag.edu.ru>).
 10. Merkulov, V.I. Uchet manevra v algoritmah avtomaticheskogo soprovozhdeniya [Tekst]/V.I.Merkulov, S.B.Gusarov//Zhurnal radioelektroniki [elektronnyj zhurnal]. – 2018.– №11.– S.1-14. (<http://jre.cplire.ru/jre/nov18/7/text.pdf>).
 11. Mironenko, A.A. Principy nastrojki i ispytaniy sistem sudna-robota [Tekst]/Ekspluatatsiya morskogo transporta.- 2018.- №3.- S.71-80.
 12. Rybas, V.N. Algoritm obrabotki radiolokacionnykh dannykh o manevriruyushchih ob"ektakh [Tekst]/Nauchnyj vestnik MGTU GA. Prikladnaya matematika. Informatika.- 2006.- № 105.- S.69-75.
 13. Semushin, I.V. dr. Modelirovanie i ocenivanie traektorii dvizhushchegosya ob"ekta [Tekst]/ Vestnik YUUrGU. Ser. MPP.- 2017.- T.10.- №3.- S.108-119.

УДК 656.61.052.4: 629.12.014.6

DOI: 10.34046/aumsuomt97/5

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОСЕДАНИЯ СУДНА

A.C. Васьков, доктор технических наук, профессор

A.A. Мироненко, доктор технических наук, доцент

Сравниваются методы определения динамического проседания судна при движении на мелководье и в каналах, полученные из отечественных и зарубежных исследований. Все формулы разделены на группы линейной, квадратичной, кубической и более сложной функциональной зависимости от скорости движения судна с коэффициентами, зависящими от путевых условий и размеров судна. Дан анализ выражений коэффициентов и значений динамического проседания судна.

Ключевые слова: Скорость, динамическое проседание судна, мелководье, канал, глубина, число Фруда.

ANALYSIS OF THE VESSEL'S DYNAMIC SQUAT CALCULATION METHODS

A.S. Vaskov, A.A. Mironenko

The various methods used for determining the vessel's squat while she steamed in the shallow water, in channels presented in numerous foreign and domestic research are compared. All the equations are subdivided into groups by linear, quadratic, cubic and more complex functional dependence on the ship's speed with the coefficients correlated with the navigation conditions and the vessel's dimensions. The analysis of the equation representing calculation of the coefficients and values of the vessel's squat is given.

Key words: vessel's speed, dynamic squat, shallow waters, channel, depth, Froude number.

Из курса гидромеханики известно, что при движении судна, вблизи его бортов, происходит перераспределение давлений и наблюдается понижение уровня свободной поверхности жидкости, вследствие чего увеличивается осадка судна, т.е. возникает его проседание (squat). Этот эффект усиливается в условиях мелководья и в каналах, что приводит к возрастанию скоростей обтекания корпуса и всех составляющих сопротивления воды [1-9, 12-20]. На основании формулы Бернулли это проседание определяется выражением [3]

$$\Delta d = \frac{v_1^2 - v^2}{2g}, \quad (1)$$

где Δd - понижение уровня поверхности воды вблизи судна (динамическое проседание - увеличение осадки судна), м;

V_1, V - скорость стесненного потока вблизи судна и впереди его, соответственно, м/с;

g - ускорение свободного падения, м/с².

Цель данного исследования заключается в

анализе конечных выражений, содержащих различные параметры, которые позволяют рассчитать проседание при движении судна. Эти выражения в различных источниках получены на основе теоретических положений по определению скорости стесненного потока в выражении (1) или путем аппроксимации экспериментальных и модельных данных движения судна в различных путевых условиях [1-32].

Для количественной оценки степени влияния мелководья и канала на движение судна обычно используют безразмерные величины: отношение глубины к осадке или длине судна, отношение площадей мидель - шпангоута судна и площади сечения канала; критерии динамического подобия потоков, которые представляются в виде числа Фруда или числа Фруда по глубине:

$$k_H = H/d; \quad k_r = S_\phi/S_c; \quad (2)$$

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gL}}; \quad F_{rH} = \frac{v}{\sqrt{gH}} = F_r \sqrt{\frac{L}{H}}, \quad (3)$$

где k_H, k_r - коэффициенты стеснения потока

жидкости судном по глубине и каналом;
 H, d, L – глубина, осадка и длина судна, м;
 S_{ϕ}, S_c – площади миделя судна и поперечного сечения канала, м²;
 F_r, F_{rH} – число Фруда и число Фруда по глубине.

В работах [1-3, 6, 10, 32] оценка глубин, при которых сказывается влияние мелководья на судно, определяется выражениями

$$H = d[4,96 + 52,68(1-\alpha)^2]; \quad (4)$$

$$H \leq 4d + \frac{3V^2}{g}, \quad (5)$$

где α – коэффициент полноты фактической ватерлинии (0,800 ÷ 0,806 – для танкеров; 0,75 – для пассажирских лайнеров; 0,7 – для контейнеровозов).

Для параметров судна и путевых условий, взятых для сравнения рассматриваемых методов определения проседания судна при его движении табл. 1, оценки глубин по выражениям (4), (5) будут: 152 м, 106 м, соответственно.

Как правило, расчетные выражения динамического проседания судна, представляются в форме функциональных зависимостей от размеров судна, режимов его движения и характеристик водного пути. Поэтому, для удобства сравнения, целесообразно воспользоваться ранее предложенной авторами методологией [3] и представить расчетные выражения проседания судна в виде линейных, квадратичных и более сложных степенных зависимостей от скорости хода или числа Фруда с постоянными коэффициентами:

$$\Delta d = K_{V_1} V; \quad (6)$$

Таблица 2

№	Источник	Формула коэффициента и проседания	Значения $K_{V_i} / \Delta d$
Линейные зависимости проседания судна от скорости (6): $\Delta d = K_{V_1} V$			
1	Божич П.К. [3]	$K_{V_1} = 0,514(0,00034L + 0,045)$	0,079/1,23
2	Глакида М. [3]	$K_{V_1} = 0,079$	0,079/1,23
3	Нормы [3]	$K_{V_1} = 0,095$	0,095/1,48
Квадратичные зависимости проседания судна от скорости (7): $\Delta d = K_{V_2} V^2$			
4	Сухомел Г.И. [3, 17, 18]	$K_{V_2} = 0,132k_{tr}(k^2 - 1)/g; \quad k_H \leq 1,4;$ $k = 1,32B/L + 1; \quad k_{tr} = 2,48B/L + 0,77$	0,0093/2,26
5	Ковалев А.П. [3, 5]	$K_{V_2} = 0,01k_1; \quad k_H \leq 1,4;$ $k_1 = 6,4B/L - 0,26$	0,0094/2,30
6	Barres [3, 20, 21]	$K_{V_2} = 0,01C_B$	0,0082/1,98
7	Г.И.Сухомел [24]	$K_{V_2} = 0,185(L/B)^{-1,11};$ $K_{V_2} = 0,185(L/B)^{-1,11}/\sqrt{k_H};$	0,0074/1,80 0,0049/1,19
8	Сухомел Г.И. [3, 17, 18]	$K_{V_2} = 0,132k_{tr}(k^2 - 1)/(g\sqrt{k_H}); \quad 1,4 \leq k_H \leq 4$	0,0061/1,48
9	Ковалев А.П. [3, 5]	$K_{V_2} = 0,01k_1/\sqrt{k_H}; \quad 1,4 \leq k_H \leq 4$	0,0062/1,51
10	Yoshimura [23]	$K_{V_2} = C_B B [(0,7 + 1,5/k_H) + 15(C_B B/L)^2/k_H]/(gL)$ $0,55 < C_B < 0,8; \quad 2,5 < B/d < 5,5; \quad 3,7 < L/B < 6,0; \quad H/d > 1,2$	0,0062/1,51
11	Смирнов В.П. [3, 15]	$K_{V_2} = \alpha_n k_L k_{tr}$ $\alpha_n = 0,0319/k_H + 0,0016; \quad k_L = 0,0032L + 0,68;$ $k_{tr} = 0,66(d_s - d_b)/L + 0,264$	0,0066/1,61
12	Сухомел Г.И. [18]	$K_{V_2} = 0,132(8k_H - 1)/[g(4k_H - 1)^2]; \quad \text{при } B_c = 4B$	0,0034/0,82

$$\Delta d = K_{V_2} V^2; \quad (7)$$

$$\Delta d = K_{V_f} V^b; \quad (8)$$

$$\Delta d = K_{Fr} Fr_H; \quad (9)$$

где $K_{V_1}, K_{V_2}, K_{V_f}, K_{Fr}$ – постоянные коэффициенты, зависящие от характеристик судна и водного пути.

Таблица 1

Название	Обозначение, единицы измерения	Значение
Длина судна	$L, м$	319
Ширина судна	$B, м$	60
Осадка судна: Носом-кормой-средняя	$d_b, d_s, d_m, м$	21,5 - 21,5 - 21,5
Коэффициент общей полноты судна	C_B	0,816
Скорость движения	$V, уз$	15,6
Глубина	$H, м$	50
Ширина канала	$B_c, м$	100
Коэффициенты стеснения потока	k_H, k_r	2,32 0,13

Выражения для этих постоянных коэффициентов, заимствованные из различных источников, представлены в табл.2. Они предварительно преобразованы для структурного и количественного сравнения и упрощения при последующих вычислениях. Кроме того, их значения приведены к размерности, позволяющей непосредственное использование в выражениях (6)-(9) при скорости хода судна в узлах. Все табличные данные, используемые в приведенных исходных расчетных формулах, были аппроксимированы аналитическими выражениями, полученными в работе [3].

№	Источник	Формула коэффициента и проседания	Значения $K_{V_2} / \Delta d$
13	Полунин [2, 3, 6] Шанчуров П.Н.	$K_{V_2} = 0,264[0,04 + 0,35/k_H^2]/g$	0,0027/0,66
14	Полунин [2, 3, 6] Павленко В.Г.	$K_{V_2} = 0,128[0,08 + 0,34/k_H]/g$	0,0030/0,73
15	Павленко В.Г. [11] грузовые суда	$K_{V_2} = 0,128[0,1 + 0,4 d/H_3]/g$; $H_3 = H[1 \pm 0,08(V_c/V)^{-0,6}(V_c/V)]^2$	0,0035/0,85
16	Павленко В.Г. [11] суда крупнотоннажные	$K_{V_2} = 0,00512[(16,5 - L/B)\sqrt{d/H_3}]/g$	0,0038/0,92
17	Шанчуров П.Н. [2, 3, 19]	$K_{V_2} = 0,0052(16,43 - L/B)/(g\sqrt{k_H})$; при $k_H \leq 1,6$; $5 < L/B < 7$	0,0039/0,95
18	Шанчуров П.Н. [2, 3, 19]	$K_{V_2} = 0,0042(16,43 - L/B)/(g\sqrt{k_H})$; при $k_H \geq 1,6$; $7 < L/B < 9$	0,0033/0,80
19	Notrbn [21]	$K_{V_2} = 0,2125C_B B d / (LH)$; $Fr_H < 0,4$	0,0023/0,56
20	Сухомел Г.И. Павленко Г.Е. [3, 12, 17] канал	$K_{V_2} = 0,132(1/k_r - 0,5)/[g(1/k_r - 1)^2]$; при $k_r = 0,25$ $K_{V_2} = 0,0061$	0,0055/1,34 0,0061
21	Канал [5] Ковалев А.П.	$K_{V_2} = 0,01k_c$; $k_H \leq 1,4$; $k_c = 3,26k_r - 0,166$	0,0067/1,63
22	Канал [5] Ковалев А.П.	$K_{V_2} = 0,01k_c/\sqrt{k_H}$; $1,4 \leq k_H \leq 4$	0,0044/1,07
23	Вагес канал [3, 20, 23]	$K_{V_2} = 0,00264C_B(6Bd/S_c + 0,4)$	0,0042/1,02
24	Павленко В.Г. [3, 11]	$K_{V_2} = 0,00132[(1 + 1/k_r)^2 - 1]/g$	0,0031/0,75
25	Вагес 2004 Канал [20-23]	$\Delta d = K_{V_2} V^2 = \begin{cases} \Delta d_b & C_B \leq 0,7; \\ \Delta d_s & C_B > 0,7; \end{cases}$ $K_{V_2} = 0,0574C_B[1 - 40(0,7 - C_B)^2]k_r^{0,76}$; $0,5 < C_B < 0,85$; $1,1 \leq k_H \leq 1,4$	1,90 0,0078
26	Сухомел Г.И. Павленко Г.Е. [18]	$K_{V_2} = 0,132(2/k_r - 1)/[g(1/k_r - 1)^2]$	0,0110/2,68
27	Yoshimura-Ohtsu Канал [21-23]	$K_{V_2} = C_B B [(0,7 + 1,5k_H^{-1}) + 15k_H^{-1}(C_B B/L)^2]/[gL(1 - k_r^{-1})^2]$	0,0112/2,72
28	Simard [3, 21-23] Kurgan G.J.	$K_{V_2} = 0,132\{[1,01S_c/(S_c - S_\phi)]^2 - 0,8\}/g$	0,0136/3,31
Различные степенные функции от скорости для проседания судна (8):			
29	Ваганов Г.И. [2]	$\Delta d = K_{V_f} V^{2,7} + 0,0062V_c$; $K_{V_f} = 0,0086(k_H^{-1})^{5/6}$ +0,0062V _c - по течению	0,81 0,00043
30	Полунин А.М. [3, 6, 14]	$\Delta d = K_{V_f} V^b$; $K_{V_f} = d\{0,236 - [3,6 - (11,3 - 8,5/k_H)/k_H]/k_H\}/(gd)^{b/2}$ $b = 0,526 + [18,6 - (19,3 + 0,8/k_H)/k_H]/k_H$	0,61 0,000001 4,8548
31	Карпов [3, 6, 11]	$\Delta d_m = [K_{V_2} - K_{V_f} l g (0,514V) + K_{V_3}] V^2$ $K_{V_2} = 0,132[1,35 - 0,2lg \frac{H-d}{\gamma}]/g$; $K_{V_f} = 0,0264/g$; $K_{V_3} = 0,264Fr_H/g$; $\gamma = 10^{-6}(1,654 + K_\gamma - 0,0312t^\circ)$; $K_\gamma = 0$ - пресная; $K_\gamma = 0,047$ - соленая	0,76 -0,0021 0,0027 0,0077 1,1863E-06
32	Eryuzlu 1 [21-24]	$\Delta d = K_{V_f} V^{2,269}$; $K_{V_f} = 0,04\sqrt{Bd}(gd)^{-1,1345}(d/H)^{0,994}$	0,73 0,0014
33	Eryuzlu 2 [21-24]	$\Delta d = K_{V_f} V^{2,289}$; $K_{V_f} = 0,0651d(gd)^{-1,1345}(k_H)^{-0,972}$	1,74 0,0032
34	Eryuzlu 3 [21-24]	$\Delta d = K_{V_f} V^{2,289}$; $K_{V_f} = 0,0651d(gd)^{-1,1345}(k_H)^{-0,972}k_B$; $k_B = \begin{cases} 3,1/\sqrt{B_c/B} & B_c/B < 9,61; \\ 1 & B_c/B \geq 9,61; \end{cases}$ $1,1 < k_H < 2,5$	1,74 0,0032 0,0013

№	Источник	Формула коэффициента и проседания	Значения $K_{V_f} / \Delta d$
35	Eryuzlu [21-24]	$\Delta d_b = K_{V_f} V^{2,289};$ $K_{V_f} = 0,0651 k_H H (gd)^{-1,1345} (k_H)^{-2,972} k_B;$ $C_B \geq 0,8; \quad 1,08 < k_H < 2,5$	1,85 0,0034
36	Römisch [3, 20-23] мелководье	$\Delta d_s = K_{V_f} C_V; \quad \Delta d_b = k_b \Delta d_s;$ $C_V = 8(V/V_{cr})^2 [(V/V_{cr} - 0,5)^4 + 0,0625];$ $K_{V_f} = 0,155 \sqrt{k_H}; \quad 1,19 < k_H < 2,25;$ $V_{cr} = k_c \sqrt{gH};$ $k_b = (10 C_B B/L)^2;$ $k_c = (k_H L/B)^{0,125}$	0,89 1,89 1,0492 5,082 7,96 м/с 2,3532 1,3694
37	Römisch универсальный [3, 20-23] мелководье канал	$\Delta d_s = K_{V_f} C_V; \quad \Delta d_b = k_b \Delta d_s;$ $C_V = 8(V/V_{cr})^2 [(V/V_{cr} - 0,5)^4 + 0,0625];$ $K_{V_f} = 0,55(H-d) \sqrt{k_H - 0,4};$ $V_{cr} = 1,28 H^{0,625} (L/(Bd))^{0,125};$ $k_b = 90(C_B B/L)^2;$ $k_c = 0,266 \sqrt{1/k_r - 1};$	0,89 1,89 4,2275 12,39 м/с 2,118 0,4517
38	Römisch [3, 20-23] канал	$\Delta d_s = K_{V_f} C_V; \quad \Delta d_b = k_b \Delta d_s;$ $C_V = 8(V/V_{cr})^2 [(V/V_{cr} - 0,5)^4 + 0,0625];$ $K_{V_f} = 0,155 \sqrt{k_H}; \quad 1,19 < k_H < 2,25;$ $V_{cr} = k_c \sqrt{gH};$ $k_b = (10 C_B B/L)^2;$ $k_c = 0,2472 \ln(1/k_r) + 0,0241;$	0,25 0,52 1,0492 0,2363 7,96 м/с 2,3532 0,3595
39	Römisch типы каналов [3, 20-23]	$k_U = 0,58 [k_H L/B]^{0,125};$ $k_V = \{2 \sin[\arcsin(1 - k_r)/3]\}^{1,5};$ $k_r = k_U (1 - H_d/H) + k_V H_d/H;$ $V_{cr} = \begin{cases} k_U \sqrt{gH}; \\ k_V \sqrt{gH_m}, & H_m = S_c / (B_c + 2nH); \\ k_r \sqrt{gH_{md}}, & H_{md} = H - H_d(H - H_m)/H; \end{cases}$	0,7942 0,4087 0,7788 17,58 м/с 9,05 м/с 17,24 м/с
40	Römisch Д-Б-Лиман [3, 4]	$K_{V_f} = 4,4(H-d)[d/(H-0,4d)]^2;$ $C_V = (V/V_{cr})[(V/V_{cr} - 0,5)^4 + 0,0625];$ $V_{cr} = k_c \sqrt{gH};$ $k_c = [H^2/(80d)]^M; \quad M = 0,25 B_c^{-0,55};$ $k_b = 90(C_B B/L)^2$	22,309 м/с
41	Ваганов Г.И. [2] канал	$\Delta d = K_{V_f} V^{3,65}$ $K_{V_f} = 0,0000066 e^{4k_r}$	0,43 0,00002
42	Varres [3, 20-23] мелководье	$\Delta d = K_{V_f} V^{2,08};$ $K_{V_f} = 0,0125 C_B \left\{ \frac{d}{[7,7 + 20(1 - C_B)^2]H} \right\}^{0,81}$	1,81 0,0060
43	Varres [3, 20-23] канал	$\Delta d = K_{V_f} V^{2,08};$ $K_{V_f} = 0,0084 [S_\phi / (S_c - S_\phi)]^{\frac{2}{3}};$ $0,5 < C_B < 0,9; \quad 1,1 < H/d < 1,5$	1,00 0,0034
44	Varres канал [3, 20-23]	$K_{V_f} = 0,0084 C_B [Bd / (S_c - Bd)]^{\frac{2}{3}};$	0,0034/1,00
45	Varres канал [3, 20-23]	$K_{V_f} = 0,001056 (15k_r + C_B);$	0,0042/1,81
46	Varres канал [3, 20-23]	$K_{V_f} = 0,0125 C_B [Bd/S_c]^{0,81};$	0,0034/1,02
Зависимости от числа Фруда (9)			
47	Шанчурова В.К. [2]	$\Delta d = K_{Fr} Fr_H;$ $K_{Fr} = k_s dB (\sqrt{gH})^{-3} / B_c$ суда: грузовые $k_s = 6,4;$ пассажирские $k_s = 2,3$	1,41 0,00103
49	Eryuzlu-Hausser	$\Delta d = K_{Fr} Fr_H^{1,8};$ $K_{Fr} = 0,113 B (d/H)^{0,27}$	0,71 5,40
50	Фомин В.Г. [3]	$\Delta d = K_{Fr} Fr_H^2;$ $K_{Fr} = 0,87 d \sqrt{Bd/LH}$	0,70 5,32
51	Чурин М.Ю. [19]	$\Delta d_m = K_{Fr} Fr^2; \quad \Delta d_s = K_{Fr} Fr^2;$ $K_{Fr} = (C_B B/C_s) \sqrt{d/H};$	0,66 0,79 32,089

№	Источник	Формула коэффициента и проседания	Значения $K_{V_r} / \Delta d$
		$K_{Fr_s} = 1,2K_{Fr_m};$	38,507
52	Воробьев Ю.Л. [3, 4]	$\Delta d = \begin{cases} K_{Fr} Fr_H^{1,74}, & 0 \leq Fr \leq 0,11; \\ K_{Fr} Fr_H^{3,06}, & 0,11 < Fr \leq 0,2; \end{cases}$ $K_{Fr} = \begin{cases} 22,9(H-d)(k_H)^{-4,3}, & 0 \leq Fr \leq 0,11; \\ 589(H-d)(k_H)^{-5,7}, & 0,11 < Fr \leq 0,2; \end{cases}$	0,59 0,34 17,32 136,69
53	Мастушкин Ю.М. [7]	$\Delta d = K_{Fr_H} Fr_H^2;$ $K_{Fr} = (22C_B - 12,3)k_{Tr} Bd/B_c; \quad k_{Tr} = 1,05 \pm 1,1$	
54	Hooft [21-24]	$\Delta d = K_{Fr} Fr_H^2 / \sqrt{1 - Fr_H^2};$ $K_{Fr} = 1,96 C_B Bd/L$	2,51 6,4645
55	Hooft [21-24]	$\Delta d = K_{Fr} Fr_H^2 / \sqrt{1 - Fr_H^2};$ $K_{Fr} = 1,96 C_B Bd/L$	0,91 6,4645
56	ICORELS Tuck (1967) [21-24]	$\Delta d = K_{Fr} Fr_H^2 / \sqrt{1 - Fr_H^2};$ $K_{Fr} = k_s C_B Bd/L;$ $k_s = \begin{cases} 1,7 & C_B < 0,7; \\ 2,0 & 0,7 < C_B < 0,8; \\ 2,4 & C_B \geq 0,8. \end{cases}$	1,11 7,9157
57	Huuska/Guliev [21-24]	$\Delta d = K_{Fr} Fr_H / \sqrt{1 - Fr_H^2};$ $K_{Fr} = 2,4K_r C_B Bd/L;$ $K_r = \begin{cases} 0,76 + 7,45 k_r / k_d, & k_r / k_d > 0,03; \\ 1, & k_r / k_d \leq 0,03; \end{cases}$ $k_d = 5,2855 k_r^{0,7098} + 3,4559 k_r H/H_d + 0,2856 (H/H_d)^{0,2801}$ $0,6 < C_B \leq 0,8; \quad 1,1 < H/d \leq 2,0; \quad 0,22 < H_d/H \leq 0,81$	2,57 6,624 0,8368 1,0 2,1690
58	Tuck [21-24]	$\Delta d = 1,46 K_{Fr} \frac{Fr_H^2}{\sqrt{1 - Fr_H^2}} + 0,5 L \sin \left(\frac{K_{Fr} Fr_H^2}{L \sqrt{1 - Fr_H^2}} \right)$ $K_{Fr} = k_r C_B Bd/L; \quad H/d < 2$	1,54 21,8475
59	Tuck [21-24]	$\Delta d_m = K_{Fr_m} Fr_H^2 / \sqrt{1 - Fr_H^2};$ $K_{Fr_m} = 38,0 C_B d;$ $\Delta d_b = K_{Fr_b} Fr_H^2 / \sqrt{1 - Fr_H^2};$ $K_{Fr_b} = 61,7 C_B d - 0,6/L; \quad H/d < 2$	0,94 6,6635 1,52 10,8193
60	Milward 1 [21-24, 28]	$\Delta d_m = K_{Fr_m} Fr_H^2 / (1 - 0,9 Fr_H);$ $K_{Fr_m} = 0,1222 C_B B - 0,0046 L;$ $\Delta d_b = K_{Fr_b} Fr_H^2 / (1 - 0,9 Fr_H);$ $K_{Fr_b} = 0,15 C_B B - 0,0055 L;$ $0,44 < C_B \leq 0,83; \quad 6 < L/H < 12; \quad 1,23 < H/d < 6$	0,88 4,5126 1,09 5,5859
61	Milward 2 [21-24, 28]	$\Delta d = K_{Fr} Fr_H^2 / \sqrt{1 - Fr_H^2}; \quad 6 < L/H < 12;$ $K_{Fr} = 0,617 C_B d - 0,006 L;$	1,25 8,9053
62	VLCC [21] мелководье	$\Delta d = K_{Fr} Fr_H^2 / \sqrt{1 - Fr_H^2};$ $K_{Fr} = 0,28 d;$	6,02
63	VLCC Канал [21]	$\Delta d = K_{Fr} Fr_H^2 / [(1 - k_r)^3 - 1,16 Fr_H^2];$ $K_{Fr} = 1,06 H k_r (1 - k_r) (1 - 0,5 k_r);$	0,85 8,8279
64	Dand [21]	$\Delta d = L [0,027 - 0,152 Fr_H ((1 - 2,046 Fr_H))]$	0,70
65	Kazerooni M.F. Seif S. [25]	$\Delta d = K_{Fr} \exp(4,875 Fr_H);$ $K_{Fr} = 0,03018 C_B B d/L$	0,58 0,9954
66	Kazerooni M.F. Seif S. [25]	$\Delta d = K_{Fr} Fr_H + d(0,0404538 UKC - 0,133288);$ $K_{Fr} = (2,18262 - 0,656682 UKC) d$	
67	Ankudinov [22, 23]	$\Delta d_b = \Delta d_m + Tr;$ $\Delta d_s = \Delta d_m - Tr;$ $\Delta d_m = K_{Fr_H} Fr_H^{(1,8+0,4 Fr_H)};$ $K_{Fr_H} = (1 + k_p^s) [C_B (1,7 Bd/L^2 + 0,004 C_B)] [1,0 + 0,35 (d/H)^2] [1,0 + 10k - 1,5(1,0 + k)\sqrt{k}];$ $k = C_B k_r d H_d / H^2;$ $k_p^s = \begin{cases} 0,15 & \text{single propeller;} \\ 0,13 & \text{twin propellers;} \end{cases}$ $Tr = k_{Tr} Fr_H^{(1,8+0,4 Fr_H)} \{1 - \exp[2,5(1 - H/d)/Fr_H]\};$ $k_{Tr} = -C_B (1,7 Bd/L^2 + 0,004 C_B) (1 - 5k) [C_B^{n_{Tr}} - 0,15 k_p - (k_b^T + k_p + k_{T1}^T)];$ $n_{Tr} = 2,0 + 0,8 [1,0 + 10k - 1,5(1,0 + k)\sqrt{k}] / C_B;$	

№	Источник	Формула коэффициента и проседания	Значения $K_{V_i} / \Delta d$
		$k_{T1}^T = (d_s - d_b) / (d_s + d_b);$ $k_p = \begin{cases} 0,30 & \text{single propeller;} \\ 0,33 & \text{twin propellers;} \end{cases}$ $k_b^T = \begin{cases} 0,1 & \text{bulbous bow;} \\ 0,0 & \text{no bulbous bow;} \end{cases}$ $k_{Tr}^T = \begin{cases} 0,1(B_{Tr}/B) = 0,4 & \text{stern transom;} \\ 0,0 & \text{no stern transom.} \end{cases}$	

Анализ структур выражений и значений коэффициентов для расчетных методов проседания судна, представленных в табл.2, позволяет сделать следующие выводы.

Коэффициенты линейных зависимостей проседания судна от скорости (6) (см. табл.2 пп.1 – 3) имеют практически одинаковые значения, следовательно, и значения проседания судна.

При квадратичных зависимостях проседания судна от скорости (7), их коэффициенты можно разделить по степени стеснения мелководьем или каналом на группы, с достаточно большими расхождениями значений, (см. табл.2 пп.4 – 7; пп.7 – 11; пп.12 – 24, пп.26 – 28, соответственно). При этом естественно расходятся и значения динамического проседания судна (для отдельных методов в два раза).

Для различных степенных зависимостей оценки проседания судна от скорости и числа Фруда в структуры расчетных выражений (8), (9) коэффициентов входят различные параметры судна и пути. Эти методы вычислений можно сравнивать только по значениям проседания, которые, для контрольного примера, расходятся по отдельным методам в два раза (см. табл.1, табл.2 пп.29 – 67).

Многие методы определения проседания судна представляют достаточно большие вычислительные трудности при их практическом применении (см. табл.2 пп.27, 30, 31, 36 – 40, 57, 67). При этом рассчитанные по ним значения проседания судна практически совпадают с более простыми вычислительными выражениями. Это дает основания искать более простые расчетные выражения оценки динамического проседания судна, для практических целей, например на основе аппроксимации рассмотренных методов и экспериментальных данных, учитывая, что многие расчётные выражения получены эмпирически.

Литература

- Басин, А.М. Гидродинамика судов на мелководье [Текст]/ А.М. Басин, И.О. Веледницкий, А.Г. Ляховицкий. – Л.: Судостроение, 1976. – 320 с.
- Ваганов, Г.И. Тяга судов (Методика и примеры выполнения судовых тяговых расчетов) [Текст]/ Г.И.Ваганов, В.Ф. Воронин, В.К. Шанчурова. – М.: Транспорт, 1986. – 199 с.
- Васьков, А.С. Сравнительный анализ методов определения скоростного запаса глубины при движении судна на мелководье [Текст]/ А.С.

- Васьков, К.П. Мамаев, С.В. Скороходов. – Новороссийск: НВИМУ, 1989. – 61 с. – Рус.– Деф. в Мортехинформреклама, №959–мф.
- Воробьев, Ю.Л. [и др.] К вопросу о навигационных запасах глубины под килем судна при плавании в каналах и на мелководье [Текст]/ Мор. транс. Сер. «Судовождение и связь». ЭИ. В/О «Мортехинформреклама», 1986. – Вып. 9(194). – С.1 – 18.
- Клементьев, А.Н. Динамическая просадка толкаемых составов и особенности её определения [Текст]/ А.Н. Клементьев, М.Ю. Чурин, Е.В. Зубкова// Научн. пробл. водного транспорта. – 2020. – Вып.62. – С.145 – 154.
- Ковалев, А.П. К вопросу о «проседании» судна на мелководье и в канале [Текст]// Мор. транс. Сер. «Безопасность мореплавания». ЭИ. В/О «Мортехинформреклама», 1984. – Вып. 5(165). – С. 19 – 22.
- Кубачев, Н.А. Некоторые вопросы безопасности плавания по каналам и фарватерам [Текст]/ Н.А. Кубачев, А.С. Калашников, Б.П. Смокотин// Судовождение ЛВИМУ им. адм. С.О. Макарова.– 1977. – Вып.22. – С.97 – 104.
- Мастушкин Ю.М. Гидродинамическое взаимодействие судов при встречах и обгонах [Текст]. – Л.: Судостроение, 1987. – 124 с.
- Миронов Г.П. Исследование условий безопасности движения крупных пассажирских судов на каналах [Текст]: автореф. дисс. к.т.н. – Горький: ГИИВТ, 1973.
- Нормы технологического проектирования морских портов: РД 31.3.05 [Текст]. – М.: МТ РФ. – 1997. – 104 с.
- Нормы проектирования морских каналов: РД 31.31.47–88 [Текст]. – М.: ММФ СССР. – 1988. – 25 с.
- Павленко, В.Г. Грузовые транспортные средства для малых рек [Текст]/ В.Г.Павленко, Б.М.Сахновский, Л.Н.Врублевская. – Л.: Судостроение, 1985. – 288 с.
- Павленко, Г.Е. Методика определения допустимого режима движения судов на реках и каналах [Текст]. – Киев: АН УССР, 1959. – 28 с.
- Павленко, Г.Е. Определение элементов судов для движения на каналах со сверхкритическими скоростями [Текст]/ Г.Е. Павленко, В.А. Степанов, О.Г. Дудченко.– Киев: АН УССР, 1961. – 30 с.
- Полунин, А.М. Исследования безопасности движения речных судов на ограниченных глубинах [Текст]: автореф. дисс. к.т.н. – Горький: ГИИВТ, 1964. – 24 с.
- Смирнов, В.П. Экспериментальные исследования некоторых вопросов безопасности мореплавания морских судов на мелководье [Текст]: автореф. дисс. к.т.н. – Л.: ЛВИМУ, 1978. – 26 с.

17. Снопков В.И. Управление судном [Текст]. – СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2004. – 536 с.
18. Сухомел, Г.И. Исследование движения судов по ограниченному фарватерам [Текст]/ Г.И. Сухомел, В.М. Засс, Л.И. Янковский. – Киев: АН УССР, 1956. – 163 с.
19. Сухомел, Г.И. Исследование движения судов по каналам и мелководью [Текст]. – Киев: Наукова думка, 1966. – 77 с.
20. Чуринов, М.Ю. Уточнение способа определения динамической просадки судов в условиях мелководья на течении [Текст]// Вестник ВГАВТ. – 2017. – Вып. 52. – С.205 – 210.
21. Barras, B.C. Ship design and performance for master and mates [Text]. – Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann. – 2004. – 252 p.
22. Beaulieu C. Modélisation du surenfoncement des navires marchands qui transitent par le fleuve Saint-Laurent [Text]/ C.Beaulieu, Taha B.M.J.Ouarda, O.Seidou// Rapport de recherche №R-974.– Québec: Génie hydraulique. – 2008. – 76 p.
23. Briggs, M. J. Ankudinov ship squat predictions – Part I: Theory, parameters and FORTRAN programs [Text]/ Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note ERDC/CHL CHETN-IX-19.– Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center, 2009. – 16 p. <http://chl.erd.c.usace.armv.mil/chetn/>
24. Briggs M.J. Ankudinov ship squat predictions – Part II: Laboratory and field comparisons and validations [Text]/ M.J.Briggs, L.Daggett// Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note ERDC/CHL CHETN-IX-20.– Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center. – 2009. – 20 p. <http://chl.erd.c.usace.armv.mil/chetn/>
25. Debaillon P. Modelisation numerique du surenfoncement des bateaux numerical modelling of ship squat [Text]/ P.Debaillon, P.Sergent, E.Lefrancois, G.Dhatt// 10 èmes Journées de L'hydrodynamique 7 – 9 mars 2005. – Nantes. – 13 p.
26. Kazerooni M.F. Experimental evaluation of ship squat in shallow waters [Text]/ M.F.Kazerooni, M.S.Seif// J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. – 2014. – P.559 – 569.
27. Kimmon P.M. Required underkeel clearance in ports [Text]/ Transport Systems and their operators in times of change. – Rotterdam, 1982. – P. 113 – 195.
28. Kurgan G.J. Vessels clearance criteria for great lakes channels [Text]/ Water Forum 81. Proc. Spec. Conf., San Francisco, Calif, 10 – 14 aug. – 1981. – P. 449 – 455.
29. Millward A. A comparison of the theoretical and empirical prediction of Squat in shallow water [Text]/ Int. Shipbuild. Prog. –1992. – 39. – №417. – p.69 – 78.
30. Sabit. A. S. Fundamentals of Hydrodynamic Problems Associated With Ships Operating in Shallow Waterways [Text]/ J of Arab Institute of Navigation. – 2008. – P.11 – 22.
31. Sommet J. Maneuvering in shallow waters. The problem of squat and sinkage [Text]/ The 1-st Int. Symp. on ships approach and berthing maneuvers. –Grenobl, 1977. – P.19 – 23.
32. Vermer Jr.H. The behavior a ship in Restricted waters [Text]/ Int. ship build. progr., 1977. – V.24. – №280. – P. 323 – 336.

REFERENCES

1. Basin, A.M. Gidrodinamika sudov na melkovod'e [Tekst]/ A.M.Basin, I.O.Velednickij, A.G.Lyahovickij. – L.: Sudostroenie, 1976. – 320 s.
2. Vaganov, G.I. Tyaga sudov (Metodika i primery vypolneniya sudovyh tyagovyh raschetov) [Tekst]/ G.I.Vaganov, V.F.Voronin, V.K.SHanchurova. – M.: Transport, 1986. – 199 s.
3. Vas'kov, A.S. Sravnitel'nyj analiz metodov opredeleniya skorostnogo zapasa glubiny pri dvizhenii sudna na melkovod'e [Tekst]/ A.S.Vas'kov, K.P.Mamaev, S.V.Skorohodov. – Novorossijsk: NVIMU, 1989. – 61 s. – Rus.– Dep. v Mortekhinformreklama, №959–mf.
4. Vorob'ev, YU.L. [i dr.] K voprosu o navigacionnyh zapasah glubiny pod kilem sudna pri plavanii v kanalah i na melkovod'e [Tekst]/ Mor. trans. Ser. «Sudovozhdenie i svyaz'». EI. V/O «Mortekhinformreklama», 1986.– Vyp. 9(194). – S.1 – 18.
5. Klement'ev, A.N. Dinamicheskaya prosadka tolkaemyh sostavov i osobennosti eyo opredeleniya [Tekst]/ A.N. Klement'ev, M.YU.CHurin, E.V. Zubkova// Nauchn. probl. vodnogo transporta. – 2020. – Vyp.62. – S.145 – 154.
6. Kovalev, A.P. K voprosu o «prosedanii» sudna na melkovod'e i v kanale [Tekst]/ Mor. trans. Ser. «Bezopasnost' moreplavaniya». EI. V/O «Mortekhinformreklama», 1984. – Vyp. 5(165). – S. 19 – 22.
7. Kubachev, N.A. Nekotorye voprosy bezopasnosti plavaniya po kanalam i farvateram [Tekst]/ N.A.Kubachev, A.S.Kalashnikov, B.P.Smokotin// Sudovozhdenie LVIMU im. adm. S.O.Makarova, 1977. – Vyp.22. – S.97 – 104.
8. Mastushkin YU.M. Gidrodinamicheskoe vzaimodejstvie sudov pri vstrechah i obgonah [Tekst]. – L.: Sudostroenie, 1987. – 124 s.
9. Mironov G.P. Issledovanie uslovij bezopasnosti dvizheniya krupnyh passazhirskih sudov na kanalah [Tekst]: Avtoref. diss. k.t.n. – Gor'kij: GIIVT, 1973.
10. Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya morskikh portov: RD 31.3.05 [Tekst]. – M.: MT RF. – 1997. – 104 s.
11. Normy proektirovaniya morskikh kanalov: RD 31.31.47–88 [Tekst]. – M.: MMF SSSR. – 1988. – 25 s.
12. Pavlenko, V.G. Gruzovye transportnye sredstva dlya malyh rek [Tekst]/ V.G.Pavlenko, B.M.Sahnovskij, L.N.Vrublevskaya. – L.: Sudostroenie, 1985. – 288 s.
13. Pavlenko, G.E. Metodika opredeleniya dopustimogo rezhima dvizheniya sudov na rekah i kanalah [Tekst]. – Kiev: AN USSR, 1959. – 28 s.
14. Pavlenko, G.E. Opredelenie elementov sudov dlya dvizheniya na kanalah so sverhkriticheskimi skorostyami [Tekst]/ G.E.Pavlenko, V.A.Stepanov, O.G.Dudchenko.– Kiev: AN USSR, 1961. – 30 s.
15. Polunin, A.M. Issledovaniya bezopasnosti dvizheniya rechnyh sudov na ogranichennyh glubinah [Tekst]: Avtoref. diss. k.t.n. – Gor'kij: GIIVT, 1964. – 24 s.
16. Smirnov, V.P. Eksperimental'nye issledovaniya nekotoryh voprosov bezopasnosti moreplavaniya morskikh sudov na melkovod'e [Tekst]: Avtore. diss. k.t.n. – L.: LVIMU, 1978. – 26 s.
17. Sнопков В.И. Управление судном [Текст]. – СПб.: АНО НПО «Профессионал». – 2004. – 536 с.
18. Suhomel, G.I. Issledovanie dvizheniya sudov po ogranichennym farvateram [Tekst]/ G.I.Suhomel,

- V.M.Zass, L.I.Yankovskij. – Kiev: AN USSR, 1956. – 163 s.
19. Suhomel, G.I Issledovanie dvizheniya sudov po kanalim i melkovod'yu [Tekst]. – Kiev: Naukova dumka, 1966. – 77 s.
 20. CHurin, M.YU. Utochnenie sposoba opredeleniya dinamicheskoy prosadki sudov v usloviyah melkovod'ya na techenii [Tekst]/ Vestnik VGAVT. – 2017. – Вып. 52. – S.205 – 210.
 21. Barras, B.C. Ship design and performance for master and mates [Text]. – Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann. – 2004. – 252 p.
 22. Beaulieu C. Modélisation du surenfoncement des navires marchands qui transitent par le fleuve Saint-Laurent [Text]/ C.Beaulieu,Taha B.M.J.Ouarda, O.Seidou// Rapport de recherche №R-974.– Québec: Génie hydraulique. – 2008. – 76 p.
 23. Briggs, M. J. Ankudinov ship squat predictions – Part I: Theory, parameters and FORTRAN programs [Text]/ Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note ERDC/CHL CHETN-IX-19.– Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center, 2009. – 16 p. <http://chl.erdc.usace.army.mil/chetn/>
 24. Briggs M.J. Ankudinov ship squat predictions – Part II: Laboratory and field comparisons and validations [Text]/ M.J.Briggs, L.Daggett// Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note ERDC/CHL CHETN-IX-20.– Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center. – 2009. – 20 p. <http://chl.erdc.usace.army.mil/chetn/>
 25. Debaillon P. Modelisation numerique du surenfoncement des bateaux numerical modelling of ship squat [Text]/ P.Debaillon, P.Sergent, E.Lefrancois, G.Dhatt// 10 èmes Journées de L'hydrodynamique 7 – 9 mars 2005. – Nantes. – 13 p.
 26. Kazerooni M.F. Experimental evaluation of ship squat in shallow waters [Text]/ M.F.Kazerooni, M.S.Seif// J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. – 2014. – P.559 – 569.
 27. Kimmon P.M. Required underkeel clearance in ports [Text]/ Transport Systems and their operators in times of change. – Rotterdam, 1982. – P. 113 – 195.
 28. Kurgan G.J. Vessels clearance criteria for great lakes channels [Text]/ Water Forum 81. Proc. Spec. Conf., San Francisco, Calif, 10 – 14 aug. – 1981. – P. 449 – 455.
 29. Millward A. A comparison of the theoretical and empirical prediction of Squat in shallow water [Text]/ Int. Shipbuild. Prog. –1992. – 39. – №417. – p.69 – 78.
 30. Sabit. A. S. Fundamentals of Hydrodynamic Problems Associated With Ships Operating in Shallow Waterways [Text]/ J of Arab Institute of Navigation. – 2008. – P.11 – 22.
 31. Sommet J. Maneuvering in shallow waters. The problem of squat and sinkage [Text]/ The 1-st Int. Symp. on ships approach and berthing maneuvers. –Grenobl, 1977. – P.19 – 23.
 32. Vermer Jr.H. The behavior a ship in Restricted waters [Text]/ Int. ship build. progr., 1977. – V.24. – №280. – P. 323 – 336.

УДК 656.618.1 [629.5.018.712:517.958]

DOI: 10.34046/aumsuomt97/6

СИМУЛЯЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БУКСИРУЕМОГО СУДНА РЕГУЛИРОВАНИЕМ НАТЯЖЕНИЯ БУКСИРНОГО ТРОСА

Ю.И. Юдин, доктор технических наук, профессор

При разработке систем автоматического управления процессом выполнения буксирной операции следует прежде всего выбрать управляемую координату и регулируемый параметр, посредством которой эта координата будет управляться. Не все координаты могут быть управляемы, более того, не все параметры, от которых зависит управляемость буксирной системы могут быть регулируемы в процессе выполнения буксирной операции. Тем не менее, представляется возможным регулировать такой известный параметр, как натяжение буксирного троса. Это, конечно, сопряжено с определёнными сложностями, прежде всего исходя из технических возможностей отдельных элементов буксирной системы. Например, такими как тяговая мощность буксирной лебёдки, разрывное усилие буксирного троса. За управляемую координату можно принять любой кинематический параметр движения, но при этом необходимо учитывать возможность измерения этого параметра в процессе буксирной операции. в настоящей статье предложено использовать в качестве управляемой координаты поперечное смещение крайней кормовой точки буксируемого судна. Результаты симуляции процесса движения буксируемого судна с регулируемым натяжением буксирного троса, убедительно подтверждают правомочность сделанного выбора управляемой координаты.

Ключевые слова: буксировка, буксируемое судно, управляемость, буксирный трос, натяжение, симуляция, управление.

SIMULATION OF THE TOWED VESSEL MOVEMENT CONTROL BY ADJUSTING THE TOW ROPE TENSION

Yu. I. Yudin

When developing systems for automatic control of the process of performing a towing operation, one should first of all choose a controlled coordinate and an adjustable parameter by means of which this coordinate will be controlled. Not all coordinates can be controlled, moreover, not all parameters, on which the controllability of the towing system depends, can be adjusted during the towing operation. Nevertheless, it seems possible to regulate such a known parameter as the tension of the towing cable. This, of course, is fraught with certain