

## СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОСЕДАНИЯ СУДНА

*А.С. Васьков, доктор технических наук, профессор*

*А.А. Мироненко, доктор технических наук, доцент*

Сравниваются методы определения динамического проседания судна при движении на мелководье и в каналах, полученные из отечественных и зарубежных исследований. Анализируемые подходы приведены к линейным, квадратичным, кубическим и сложным функциональным зависимостям от числа Фруда по глубине коэффициентами, зависящими от путевых условий и размеров судна. Дан сравнительный анализ выражений, коэффициентов и численных значений динамического проседания при изменении путевых условий и размеров судна.

**Ключевые слова:** Скорость, динамическое проседание, размеры судна, характеристики канала, глубина, число Фруда.

## THE COMPARISON OF THE METHODS USED FOR THE VESSEL'S DYNAMIC SQUAT ASSESSMENT

*A.S. Vaskov, A.A. Mironenko*

Various methods used for determining the vessel's dynamic squat in shallow waters and in channels from domestic and foreign researches are compared. The analyzed approaches are converted into Froude number functional dependences: linear, quadratic, cubic, complex depending on environmental conditions and the vessel's dimensions. A comparative analysis of the equations, coefficients and numerical values of the dynamic squat under variation of the environmental conditions and the vessel's dimensions is given.

**Key words:** vessel's speed, dynamic squat, vessel's and channel dimensions, depth, Froude number.

В исследованиях [3, 4] дается подробный анализ методов определения динамического проседания через различные параметры судна и функциональные зависимости режимов движения, на основе материалов, полученных из различных источников [1-40 и др.]. Предлагаемые подходы затрудняют осуществлять структурный, качественный и количественный анализ, произвести сравнение расчетных выражений и численных значений динамического проседания судна.

Целью настоящего исследования является приведение расчетных методик, полученных по результатам анализа более чем 160 источников к единообразным структурным выражениям для последующего количественного сравнения значений динамического проседания судна и формирования практических рекомендаций по их применению.

Для оценки степени влияния мелководья и канала на параметры движения судна обычно используют безразмерные величины. Это отношение глубины к осадке или длине судна, отношение площади мидель – шпангоута судна к площади сечения канала, их комбинированные отношения; критерии динамического подобия потоков в виде числа Фруда или числа Фруда по глубине [3, 4]:

$$k_H = H/d; k_B = B_c/B; \quad (1)$$

$$k_r = HB_c/Bd = k_H k_B; \quad (2)$$

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

где  $v$  – скорость судна, м/с;

$H, d, L, B$  – глубина, осадка, длина, ширина судна, м;

$k_H, k_B, k_r$  – коэффициенты стеснения потока жидкости судном по глубине и каналом;

$F_r, F_{rH}$  – число Фруда и число Фруда по глубине;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Анализ исследований [1, 3, 6, 10, 14, 15, 20] показывает, что в зависимости от глубины и скорости хода судна выделяются следующие особенности, проявляющиеся при движении. Для морских условий и судов волнообразование остается аналогичным глубокой воде при числах Фруда меньше 0,3 - 0,5. При числах Фруда 0,6 ÷ 0,9 (докритические скорости на мелководье) увеличивается угол, составляемый гранями расходящихся волн с направлением движения судна, в движение вовлекается дополнительные массы жидкости и волновое сопротивление возрастает по сравнению с движением на глубокой воде с той же скоростью. Вблизи бортов судна наблюдается понижение уровня свободной поверхности жидкости, вследствие чего увеличивается средняя осадка и возникает дифферент на корму. Данное явление называется динамической просадкой судна на мелководье.

В работах [1 – 3, 6, 10, 19, 40] оценка глубин, при которых сказывается влияние мелководья на судно, определяется в зависимости от его геометрических характеристик и режима движения выражениями:

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

$$H \leq 4d + 3V^2/g; \quad (5)$$

$$H \leq 2,82dV/\sqrt{L}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – 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 анализируемых методов проседания судна при движении табл. 1, оценки глубин, рассчитанные по выражениям (4) - (6) дают значительный разброс значений: 152 м, 106 м, 27 м, соответственно.

Таблица 1

| Название                              | Обозначение, единицы измерения | Значение                                  |
|---------------------------------------|--------------------------------|---|
| Длина судна                           | $L, м$                         | 319                                       |
| Ширина судна                          | $B, м$                         | 60  |
| Осадка судна:<br>Носом-средняя-кормой | $d_b - d_m - d_s, м$           | 21,5 - 21,5 - 21,5<br>8,37-9,97-<br>11,57 |
| Коэффициент общей полноты судна       | $C_B$                          | 0,816                                     |
| Скорость движения                     | $V, уз$                        | 1+15,6                                    |
| Глубина                               | $H, м$                         | 22+140                                    |
| Ширина канала                         | $B_c, м$                       | 70+450                                    |
| Коэффициенты стеснения потока         | $k_H$                          | 1÷7                                       |
|                                       | $k_B$                          | 1÷7                                       |
|                                       | $k_r$                          | 1÷10                                      |

Особенно заметно влияние мелководья при отношении глубины к осадке меньше 1,5 и достижении судном, так называемой критической скорости, которая определяется на мелководье и в ка-

налепо исследованиям А.М. Басина, Г.И. Сухомела, М.Л. Briggs, К. Römisch и др. [1 – 3, 20, 26, 27, 30] и приводится для соответствующих расчетных выражений проседания в табл. 2. Анализируемые выражения динамического проседания [3], для удобства сравнения, представлены в виде линейных, квадратичных и сложных функциональных зависимостей от числа Фруда по глубине с коэффициентами, зависящими от характеристик судна и водного пути, аналогично методологии, предложенной в работе [3], в виде табл. 2:

$$\Delta d = K_{Fr} Fr_H; \Delta d = K_{Fr} Fr_H^2; \Delta d = K_{Fr} f(Fr_H^n), \quad (7)$$

где  $\Delta d$  – динамическое проседание судна ( $\Delta d_b$  – носом,  $\Delta d_m$  – на миделе,  $\Delta d_s$  – кормой, когда указано в публикации), м;

$K_{Fr}$  – коэффициенты, зависящие от характеристик судна и водного пути;

$f(Fr_H^n)$  – сложные функциональные зависимости от числа Фруда.

Расчетные выражения динамического проседания и коэффициентов типа (7) расположены в табл. 2 в порядке увеличения их сложности, с указанием ограничений на исходные параметры, если они указаны в проанализированных источниках, включая приведенную библиографию. Диапазон изменения исходных параметров, представленных в табл. 1, соответствует этим ограничениям.

Таблица 2

| №   | Источник                 | Формула коэффициента и проседания судна  |
|---|--------------------------|--|
| <i>Линейные зависимости проседания от числа Фруда по глубине: <math>\Delta d = K_{Fr} Fr_H</math></i>             |                          |  |
| 1   | Божич П.К. [3]           | $K_{Fr} = (0,00034L + 0,045)\sqrt{gH}$   |
| 2   | Плакида М. [3]           | $K_{Fr} = 0,154\sqrt{gH}$  |
| 3   | Нормы [3]                | $K_{Fr} = 0,185\sqrt{gH}$  |
| <i>Квадратичные зависимости проседания судна от числа Фруда по глубине: <math>\Delta d = K_{Fr} Fr_H^2</math></i> |                          |  |
| 4   | Сухомел Г.И. [3, 17, 18] | $K_{Fr} = 0,5(2,48B/L + 0,77)[(1,32B/L + 1)^2 - 1]H; k_H \leq 1,4;$<br>$k = (1,32B/L + 1); k_{tr} = (2,48B/L + 0,77)$                                    |
| 5   | Ковалев А.П. [3, 5]      | $K_{Fr} = 0,0378gH(6,4B/L - 0,26); k_H \leq 1,4;$<br>$k_1 = (6,4B/L - 0,26)$   |
| 6   | Varres [3, 20, 21]       | $K_{Fr} = 0,0378gHC_B$   |
| 7   | Сухомел Г.И. [24]        | $K_{Fr} = 0,185gH(L/B)^{-1,11};$<br>$K_{Fr} = 0,185gH(L/B)^{-1,11}/\sqrt{H/d};$  |
| 8   | Сухомел Г.И. [3, 17, 18] | $K_{Fr} = 0,5(2,48B/L + 0,77)[(1,32B/L + 1)^2 - 1]H/\sqrt{H/d}; 1,4 \leq k_H \leq 4$   |
| 9   | Ковалев А.П. [3, 5]      | $K_{Fr} = 0,0378gH(6,4B/L - 0,26)/\sqrt{H/d}; 1,4 \leq k_H \leq 4$   |
| 10  | Yoshimura [23]           | $K_{Fr} = C_B B [0,7H + 1,5d + 15d(C_B B/L)^2]/L$<br>$0,55 < C_B < 0,8; 2,5 < B/d < 5,5; 3,7 < L/B < 6,0; k_H > 1,2$                                     |
| 11  | Смирнов В.П. [3, 15]     | $3,785g(0,0319d + 0,0016H)k_L k_{tr};$<br>$k_L = 0,0032L + 0,68; k_{tr} = 0,66(d_s - d_b)/L + 0,264$   |
| 12  | Сухомел Г.И. [18]        | $K_{Fr} = 0,45H(8H/d - 1)/(4H/d - 1)^2; \text{при } B_c = 4B$  |
| 13  | Полунин [2, 3, 6]        | $K_{Fr} = H[0,04 + 0,35(d/H)^2]; 1,1 \leq k_H \leq 2,4$  |
| 14  | Шанчуров П.Н.            | $K_{Fr} = H(0,04 + 0,17d/H); 1,1 \leq k_H \leq 2,4$  |
| 15  | Павленко В.Г. [11]       | $K_{Fr} = 0,05H + 0,2d/k_{cc};$ грузовые суда<br>$k_{cc} = 1 - \text{без течения}; k_{cc} = [1 \pm 0,08(V_c/Fr_H\sqrt{gH})^{0,4}]^2 - \text{на течении}$ |
| 16  | Павленко В.Г. [11]       | $K_{Fr} = 0,02(16,5 - L/B)\sqrt{Hd}/\sqrt{k_{cc}};$ суда крупнотоннажные   |
| 17  |                          | $K_{Fr} = 0,0197H[16,43 - L/B]/\sqrt{H/d};$  |

| №  | Источник                                     | Формула коэффициента и проседания судна   |
|--|--|---|
| 18   | Шанчуров П.Н. [2, 3, 19]                     | при $k_H \leq 1,6$ ; $5 < L/B < 7$<br>$K_{Fr} = 0,0159H(16,43 - L/B)/\sqrt{H/d}$ ; при $k_H \geq 1,6$ ; $7 < L/B < 9$   |
| 19   | Norrbín [21]                                 | $K_{Fr} = 0,2446gC_B B d/L$ ; $Fr_H < 0,4$  |
| 20   | Сухомел Г.И. Павленко Г.Е. [3, 12, 17] канал | $K_{Fr} = 0,5H(HB_c/Bd - 0,5)/(HB_c/Bd - 1)^2$ ;<br>при $k_r = 4K_{Fr} = 0,0061gH$  |
| 21   |  | $K_{Fr} = 0,0378gH(3,26 Bd/HB_c - 0,166)$ ; $k_H \leq 1,4$ ; канал  |
| 22   | Ковалев А.П. [5]                             | $K_{Fr} = 0,0378gH(3,26 Bd/HB_c - 0,166)/\sqrt{H/d}$ ; $1,4 \leq k_H \leq 4$ ; канал  |
| 23   | Вагес [3, 20, 23]                            | $K_{Fr} = 0,01gHC_B(6Bd/HB_c + 0,4)$ ; канал  |
| 24   | Павленко В.Г. [3, 11]                        | $K_{Fr} = 0,005H[(1 + HB_c/Bd)^2 - 1]$  |
| 25   | Вагес2004 Канал [20-23]                      | $\Delta d_b$ при $C_B \leq 0,7$ ; $\Delta d_s$ при $C_B > 0,7$ ;<br>$K_{Fr} = 0,217gHC_B[1 - 40(0,7 - C_B)^2](Bd/HB_c)^{0,76}$ ;<br>$0,5 < C_B < 0,85$ ; $1,1 \leq k_H \leq 1,4$  |
| 26   | Сухомел Г.И. Павленко Г.Е. [18]              | $K_{Fr} = 0,5H(2HB_c/Bd - 1)/(HB_c/Bd - 1)^2$   |
| 27   | Yoshimura-Ohtsu Канал [21-23]                | $K_{Fr} = 3,785C_B B[(0,7H + 1,5d) + 15d(C_B B/L)^2]/[L(1 - HB_c/Bd)^2]$  |
| 28   | Simard [3, 21-23] Kurgan G.J.                | $K_{Fr} = 0,5H\{[1,01/(1 - Bd/HB_c)]^2 - 0,8\}$   |
| 29   | Фомин В.Г. [3]                               | $K_{Fr} = 0,87d\sqrt{Bd/(LH)}$  |
| 30   | Чурин М.Ю. [19]                              | $\Delta d_m = K_{Fr m} Fr_H^2$ ; $\Delta d_s = K_{Fr s} Fr_H^2$ ;<br>$K_{Fr m} = C_B B H / (C_s L \sqrt{H/d})$ ; $K_{Fr s} = 1,2K_{Fr m}$ ;   |
| 31   | Мастушкин Ю.М. [7]                           | $K_{Fr} = (22C_B - 12,3)k_{tr} Bd/B_c$ ; $k_{tr} = 1,05 \pm 1,1$  |
| <i>Различные функции числа Фруда по глубине проседания судна: <math>\Delta d = K_{Fr} f(Fr_H^n)</math></i> |  |   |
| 32   | Вагес [3, 20-23] мелководье                  | $\Delta d = K_{Fr} Fr_H^{2,08}$ ;<br>$K_{Fr} = 0,2C_B(gH)^{1,04} \left\{ \frac{d}{[7,7 + 20(1 - C_B)^2]H} \right\}^{0,81}$  |
| 33   |  | $K_{Fr} = 0,038(gH)^{1,04} [Bd/(HB_c - Bd)]^{\frac{2}{3}}$ ;<br>$0,5 < C_B < 0,9$ ; $1,1 < k_H < 1,5$ ;   |
| 34   | Вагес [3, 20-23] канал                       | $K_{Fr} = 0,038C_B(gH)^{1,04} [(Bd/HB_c) + 0,4]$  |
| 35   |  | $K_{Fr} = 0,0039(gH)^{1,04} (15Bd/(HB_c) + C_B)$ ;  |
| 36   |  | $K_{Fr} = 0,047C_B(gH)^{1,04} (Bd/HB_c)^{0,81}$ ;   |
| 37   | Шанчурова В.К. [2]                           | $\Delta d = K_{Fr} Fr_H^3$ ; $K_{Fr} = k_s dB/B_c$ ;<br>суда: грузовые $k_s = 6,4$ ; пассажирские $k_s = 2,3$ ; $k_{scr} = 3,3$   |
| 38   | Ваганов Г.И. Бондарчик В.М.                  | $\Delta d = K_{Fr} Fr_H^3$ ;<br>$K_{Fr} = 0,0052(gH)^{1,5} (d/H)^{5/6}$   |
| 39   |  | $\Delta d = K_{Fr} Fr_H^{2,7} + 0,012V_c$ — по течению, м/с<br>$K_{Fr} = 0,0052(gH)^{1,35} (d/H)^{5/6}$ ;   |
| 40   | Ваганов Г.И. [2]                             | $\Delta d = K_{Fr} Fr_H^{3,65}$ ;<br>$K_{Fr} = 0,0000075(gH)^{1,825} e^{40Bd/HB_c}$ ; канал   |
| 41   | Dand [21]                                    | $\Delta d = L[0,027 - 0,152Fr_H(1 - 2,046Fr_H)]$  |
| 42   | Kazerooni M.F. Seif S. [25]                  | $\Delta d = K_{Fr} Fr_H + 0,04(H - 4,29d)$ ;<br>$K_{Fr} = 0,66(4,32d - H)$ ; $k_H \leq 4,32$  |
| 43   | Eryuzlu 1 [21-24]                            | $\Delta d = K_{Fr} Fr_H^{2,269}$ ;<br>$K_{Fr} = 0,181B^{0,5} d^{0,3595} H^{0,1405}$   |
| 44   | Eryuzlu 2 [21-24]                            | $\Delta d = K_{Fr} Fr_H^{2,289}$ ;<br>$K_{Fr} = 0,298d^{0,8275} H^{0,1725}$   |
| 45   | Eryuzlu 3 [21-24]                            | $\Delta d = K_{Fr} Fr_H^{2,289}$ ; $1,1 < k_H < 2,5$<br>$K_{Fr} = 0,298k_B d^{0,8275} H^{0,1725}$ ; $k_B = \begin{cases} 3,1/\sqrt{B_c/B}, & B_c/B < 9,61; \\ 1, & B_c/B \geq 9,61; \end{cases}$                                |
| 46   | Eryuzlu 4 Hausser [21-24]                    | $\Delta d = K_{Fr} Fr_H^{1,8}$ ; $C_B \geq 0,8$ ; $1,08 < k_H < 2,5$<br>$K_{Fr} = 0,113B(d/H)^{0,27}$   |
| 47   | Kazerooni M.F. Seif S. [25]                  | $\Delta d = K_{Fr} \exp(4,875Fr_H)$ ;<br>$K_{Fr} = 0,03018C_B B d/L$  |
| 48   | Sierra M.A.H                                 | $\Delta d = 3,923Fr_H(1 - 2,227Fr_H) + 21,339C_B + 0,635H/d - 0,0099H - 0,027\lambda - 17,664$ ;<br>$\Delta d = 1,511Fr_H(1,805Fr_H + 1) + 16,414C_B + 0,564H/d + 0,0004086H + 11,077H_{ola}/d_{ola} - 0,027\lambda - 15,203$ ; |
| 49   | Huuska/Guliev [21-24]                        | $\Delta d = K_{Fr} Fr_H / \sqrt{1 - Fr_H^2}$ ; $K_{Fr} = 2,4K_r C_B B d/L$ ;  |

| №  | Источник  | Формула коэффициента и проседания судна  |
|----|---|--|
|    |   | $K_r = \begin{cases} 0,76 + 7,45Bd/(k_d HB_c), & (k_H k_B k_d)^{-1} > 0,03; \\ 1, & (k_H k_B k_d)^{-1} \leq 0,03; \end{cases}$ $k_d = 5,2855(Bd/HB_c)^{0,7098} + 3,4559 Bd/H_d B_c + 0,2856(H/H_d)^{0,2801};$ $0,6 < C_B \leq 0,8; \quad 1,1 < k_H \leq 2,0; \quad 0,22 < H_d/H \leq 0,81$   |
| 50 | Hooft [21-24]                                   | $\Delta d = K_{Fr} Fr_H / \sqrt{1 - Fr_H^2}; \quad K_{Fr} = 1,96 C_B Bd/L$   |
| 51 |   | $\Delta d = K_{Fr} Fr_H^2 / \sqrt{1 - Fr_H^2}; K_{Fr} = 1,96 C_B Bd/L$   |
| 52 | Constantine T. bul.51                           | $\Delta d = K_{Fr} Fr_H^2 / \sqrt{1 - Fr_H^2}; \quad K_{Fr} = Bd/B_c$  |
| 53 | ICORELS<br>Tuck (1967)<br>Gourlay T.<br>[21-24] | $\Delta d = K_{Fr} Fr_H^2 / \sqrt{1 - Fr_H^2}; K_{Fr} = k_s C_B Bd/L;$ $k_s = \begin{cases} 1,7 & C_B < 0,7; \\ 2,0 & 0,7 < C_B < 0,8; \\ 2,4 & C_B \geq 0,8. \end{cases}$   |
| 54 | Tuck<br>[21-24]                                 | $\Delta d_m = K_{Fr m} Fr_H^2 / \sqrt{1 - Fr_H^2}; \quad K_{Fr m} = 0,38 C_B d;$ $\Delta d_b = K_{Fr b} Fr_H^2 / \sqrt{1 - Fr_H^2};$ $K_{Fr b} = 0,617 C_B d - 0,006/L; \quad k_H < 2$   |
| 55 | Milward 2<br>[21-24, 28]                        | $\Delta d = K_{Fr} Fr_H^2 / \sqrt{1 - Fr_H^2}; \quad 6 < L/H < 12;$ $K_{Fr} = 0,617 C_B d - 0,006L;$   |
| 56 | VLCC [21]<br>мелководье                         | $\Delta d = K_{Fr} Fr_H^2 / \sqrt{1 - Fr_H^2};$ $K_{Fr} = 0,28d,$  |
| 57 | Tuck[21-24]                                     | $\Delta d = 1,46 K_{Fr} \frac{Fr_H^2}{\sqrt{1 - Fr_H^2}} + 0,5L \sin\left(\frac{K_{Fr}}{L^2} \frac{Fr_H^2}{\sqrt{1 - Fr_H^2}}\right)$ $K_{Fr} = K_r C_B Bd/L; k_H < 2$   |
| 58 | Milward 1<br>[21-24, 28]                        | $\Delta d_m = K_{Fr m} Fr_H^2 / (1 - 0,9 Fr_H); K_{Fr m} = 0,1222 C_B B - 0,0046L;$ $\Delta d_b = K_{Fr b} Fr_H^2 / (1 - 0,9 Fr_H); \quad K_{Fr b} = 0,15 C_B B - 0,0055L;$ $0,44 < C_B \leq 0,83; 6 < L/H < 12; \quad 1,25 < k_H < 6$   |
| 59 | VLCC<br>Канал [21]                              | $\Delta d = K_{Fr} Fr_H^2 / [(1 - Bd/HB_c)^3 - 1,16 Fr_H^2];$ $K_{Fr} = 1,06 Bd(1 - Bd/HB_c)(1 - 0,5 Bd/HB_c)/B_c;$  |
| 60 | Коротков С.Н.<br>[8]                            | $\Delta d = K_{Fr} Fr_H / [(1,05 + 0,0287 \lg Re) Fr_{H1} - Fr_H];$ $K_{Fr} = [8,428 \cdot 10^{-4} H L \delta (0,25 + Bd/HB_c) (42,85/B + 1/d)] / k_b;$ $Fr_{H1} = \sqrt{\{6 \cos[(\pi + \arccos(1 - Bd/HB_c))/3] - 2[1 - Bd/HB_c]\} / k_b};$ $k_b = 1 + (B_c - B_{cg}) / (B_c + B_{cg});$ $\delta = 0,45 \div 0,90; Re = 6 - 9; \quad k_r = 0,05 \div 0,32$ |
| 61 | Полунин А.М.<br>[3, 6, 14]<br>пассажир          | $\Delta d = K_{Fr} Fr_H^b; \quad 1,1 \leq k_H \leq 2,5$ $K_{Fr} = d[0,265 - 3,6 d/H + 11,3(d/H)^2 - 8,5(d/H)^3](H/d)^{b/2};$ $b = 0,526 - 18,6 d/H + 19,3(d/H)^2 - 0,8(d/H)^3$   |
| 62 | Карпов А.Б.<br>[3, 6, 11]                       | $\Delta d_m = K_{Fr2} Fr_H^2 + K_{Fr3} Fr_H^3 - K_f Fr_H^2 \lg Fr_H;$ $K_{Fr2} = H\{0,675 - 0,1 \lg[\sqrt{gH}(H - d)/\gamma]\};$ $K_{Fr3} = H\sqrt{H/L}; \quad K_f = 0,1H; \gamma = 10^{-6}(1,654 + K_y - 0,0312t^\circ);$ $K_y = 0 - \text{пресная}; \quad K_y = 0,047 - \text{соленая}$  |
| 63 | Бондарчик В.М.                                  | $\Delta d = K_{Fr2} Fr_H^2 - K_{Fr3} Fr_H^3 + K_{Fr4} Fr_H^4;$ $K_{Fr2} = 0,55[0,114 + (d/H)^{3,26}] + K_{Fr4}[1,04 + 2,08(1 - 1,04d/H)d/H]^2;$ $K_{Fr3} = 2,08 K_{Fr4}[1 + 2(1 - 1,04d/H)d/H];$ $K_{Fr4} = 0,112 + 1,04(d/H)^2$   |
| 64 | SLS Trial                                       | $\Delta d = \{K_{Fr1} + K_{Fr2}[1 - \exp[2,5(1 - H/d)/Fr_H]]\} Fr_H^{(1,8+0,4Fr_H)};$ $K_{Fr1} = L[1 + 0,35(d/H)^2] k_b k_k; \quad K_{Fr2} = 1,25 k_b [C_b^2 - 0,3 k_k];$ $k_b = 1,5 C_b d B / L^2 + 0,044 C_b^2;$ $k_k = 1 + 10(d/H)^2 B/B_c - 1,5[1 + B/B_c (d/H)^2] [B/B_c (d/H)^2]^{0,5}$  |
| 65 | Römisch<br>[3, 20-23]                           | $\Delta d_s = K_{Fr} (Fr_H/k_c)^2 [(Fr_H/k_c - 0,5)^4 + 0,0625]; \quad 1,19 < k_H < 2,25;$ $K_{Fr} = 1,24d\sqrt{H/d}; \quad V_{cr} = k_c\sqrt{gH}; \quad \Delta d_b = k_b \Delta d_s;$ $k_b = (10 C_B B/L)^2; \quad k_c = (HL/Bd)^{0,125}; \text{мелководье}$  |
| 66 |   | $\Delta d_s = K_{Fr} (Fr_H/k_c)^2 [(Fr_H/k_c - 0,5)^4 + 0,0625]; \Delta d_b = k_b \Delta d_s;$ $k_c = 0,2472 \ln(HB_c/Bd) + 0,0241; 1,19 < k_H < 2,25; \text{канал}$   |
| 67 | Römisch<br>Briggs M.J.,<br>Kopp P.J.            | $\Delta d_s = K_{Fr} (Fr_H \sqrt{gH}/V_{cr})^2 [(Fr_H \sqrt{gH}/V_{cr} - 0,5)^4 + 0,0625];$ $\Delta d_b = k_b \Delta d_s;$ $V_{cr} = (g HB_c / (B_c + 2nH))^{0,5} [2 \cos((\pi + \arccos(1 - Bd/HB_c))/3)]^{1,5}$  |

| №  | Источник  | Формула коэффициента и проседания судна   |
|----|---|---|
| 68 | Römisch[3, 20-23]<br>универсальный<br>мелководье<br>канал | $\Delta d_s = K_{Fr} (F_{rH} \sqrt{gH} / V_{cr})^2 [(F_{rH} \sqrt{gH} / V_{cr} - 0,5)^4 + 0,0625];$ $K_{Fr} = 4,4(H-d)(H/d - 0,4)^{-2}; \quad \Delta d_b = k_b \Delta d_s;$ $V_{cr} = 1,28H^{0,625}(L/(Bd))^{0,125};$ $V_{cr} = 0,266\sqrt{gH(HB_c/Bd - 1)}$  |
| 69 | Römisch<br>по типам каналов<br>[3, 20-23]                 | $\Delta d_s = K_{Fr} (F_{rH} \sqrt{gH} / V_{cr})^2 [(F_{rH} \sqrt{gH} / V_{cr} - 0,5)^4 + 0,0625];$ $K_{Fr} = 4,4(H-d)(H/d - 0,4)^{-2}; \Delta d_b = k_b \Delta d_s;$ $k_U = 0,58[HL/Bd]^{0,125};$ $k_V = \{2\text{Sin}[\arcsin(1 - Bd/HB_c)/3]\}^{1,5};$ $k_r = k_U(1 - H_a/H) + k_V H_a/H;$ $V_{cr} = \begin{cases} k_U \sqrt{gH}; \\ k_V \sqrt{gH_m}, & H_m = HB_c/(B_c + 2nH); \\ k_r \sqrt{gH_{md}}, & H_{md} = H - H_d(H - H_m)/H; \end{cases}$   |
| 70 | Römisch<br>Д-Б-Лиман<br>[3, 4]                            | $\Delta d_s = K_{Fr} (F_{rH}/k_c)^2 [(F_{rH}/k_c - 0,5)^4 + 0,0625];$ $K_{Fr} = 4,4(H-d)[d/(H - 0,4d)]^2; \quad \Delta d_b = k_b \Delta d_s;$ $k_c = [H^2/(80d)]^M; \quad M = 0,25B_c^{-0,55};$ $k_b = 90(C_B B/L)^2$   |
| 71 | Ankudinov<br>[22, 23]                                     | $\Delta d_b = \Delta d_m + Tr; \quad \Delta d_s = \Delta d_m - Tr;$ $\Delta d_m = K_{Fr} F_{rH}^{(1,8+0,4FrH)};$ $K_{Fr} = (1 + k_p) P_s P_{H/d} P_c; \quad P_{H/d} = 1 + 0,35(H/d)^2;$ $P_s = 1,7C_b Bd/L^2 + 0,004C_b^2;$ $P_c = 1 + 10k_c - 1,5(1 + k_c)\sqrt{k_c} - \text{канал}; \quad P_c = 1;$ $k_c = C_b(BH_T/HB_c)(d/H)^2;$ $T_{Tr} = K_{Tr} \{1 - \exp[2,5(1 - H/d)/Fr_H]\} Fr_H^{(1,8+0,4FrH)};$ $K_{Tr} = -1,7P_s k_{Tr} P_{c2};$ $P_{c2} = 1 - 5k_c - \text{канал}; \quad P_{c2} = 1;$ $k_{Tr} = C_b^{n_{Tr}} - (0,15k_p + k_{p2}) - (k_b + k_{st} + k_{tr});$ $n_{Tr} = 2 + 0,8P_c/C_B; \quad k_{tr} = (d_s - d_b)/(d_s + d_b);$ $k_p = \begin{cases} 0,15 & \text{singlepropeller}; \\ 0,13 & \text{twinpropellers}; \end{cases}; \quad k_{p2} = \begin{cases} 0,15 & \text{singlepropeller}; \\ 0,20 & \text{twinpropellers}; \end{cases};$ $k_b = \begin{cases} 0,1 & \text{bulbousbow}; \\ 0,0 & \text{nobulbousbow}; \end{cases}; \quad k_{st} = \begin{cases} 0,1(B_{Tr}/B) = 0,4 & \text{sternttransom}; \\ 0,0 & \text{nosternttransom}. \end{cases}$ |

Анализ структур выражений и численных значений коэффициентов методов определения проседания судна, приведенных в табл.2, в виде функций числа Фруда по глубине, позволяет сделать следующие выводы.

Для линейных зависимостей проседания судна от числа Фруда по глубине (см. табл. 2 пп. 1-3) коэффициенты имеют практически одинаковые постоянные значения, соответственно расчетно-проседание судна.

Для квадратичных зависимостей проседания судна от числа Фруда по глубине коэффициенты представляются различными структурными выражениями. А их значения, по результатам расчетов, можно разделить по степени стеснения мелководьем и каналом на три диапазона: 2÷11; 11÷30; 30÷60, среднее арифметическое значение по которым изменяется в пределах 5÷18 с изменением отношения глубины к осадке в пределах 1÷7. При этом естественно расходятся и соответствующие значения динамического проседания судна в пределах 0,2÷2,5 м.

Из-за разнообразия сложных функциональных зависимостей проседания судна от числа

Фруда (см. табл. 2 пп. 32-71) сравнение коэффициентов по структуре параметров и значения является нецелесообразным.

Для сопоставления методов оценки динамического проседания судна произведены расчеты по всем представленным в табл.2 выражениям в зависимости от значений глубины, характеристик канала, осадки судна, скорости движения.

Максимальный разброс абсолютных значений динамического проседания судна по представленным методам (см. табл.2) с изменением  $H/d = 1 \div 7$  составляет: 1,5 м при  $H/d = 7$  и 2,5 м при  $H/d = 1,1$ ; с изменением скорости - 3,0 м при скорости 15 уз  $H/d = 1,1$ .

Методы (пп. 22, 27, 29, 40, 48-50, 57, 63, 65, 68-70, см. табл.2) дают значительно заниженные или завышенные значения динамического проседания судна по сравнению с практическими и нормативными данными (10-15% от осадки максимальной), приводимыми в лощих, и средними арифметическими (СА) значениями и квадратическими отклонениями (СКО), приведенным ниже. Это указывает на то, что не все расчетные методы могут быть рекомендованы для всех су-

дов и условий плавания, требуются дополнительные указания по применению методов, их ограничению, которые часто отсутствуют в анализируемых источниках.

Учитывая сложности представления, для сравнения, на одном рисунке 71 графика методов динамического проседания судна (см. табл.2), вычисления были разделены на две группы: квадратичных и сложных функциональных зависимостей

проседания от числа Фруда по глубине. В каждой группе вычислялись их СА значения, которые практически совпадают между собой для обеих групп выражений и с расчетами по методам п.15, п.17, п.19 (см. табл. 2). Результаты представлены на рис. 1, 2, которые можно рекомендовать в качестве основных методов для применения. Эти методы содержат, в качестве исходных параметров, путевые условия, размеры судна и режим движения.

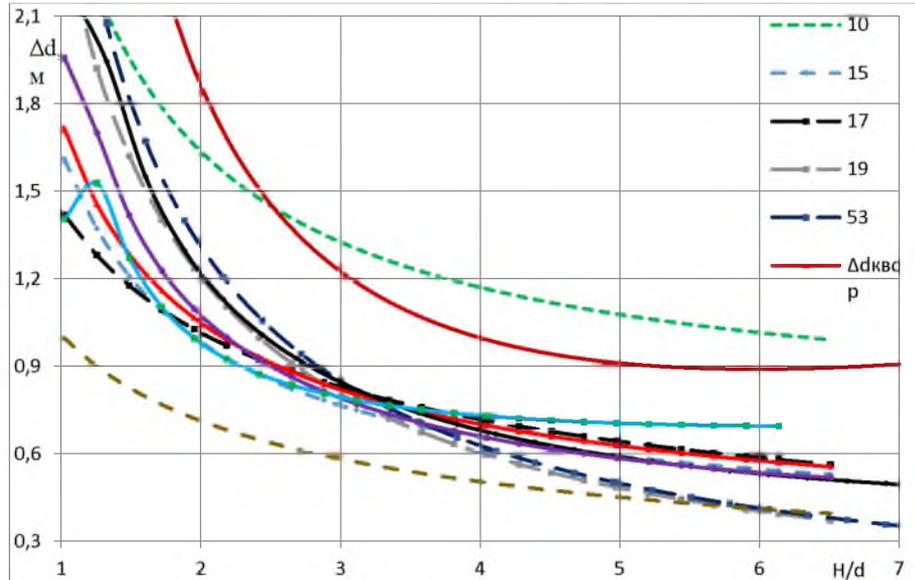


Рисунок 1 – Динамическое проседание, в зависимости от отношения глубины и осадки судна:

10, 15, 17, 19, 30, 53 – номера расчетных выражений табл.2;  $\Delta d_{kвср}$  – СА значение динамического проседания для квадратичных зависимостей числа Фруда;  $\Delta d_{мср}, \Delta d_{бср}$  – СА значение динамического проседания на миделе и носом, соответственно, для сложных зависимостей числа Фруда;  $\Delta d_{ср}$  – общее СА значение динамического проседания по всем методам;  $\Delta d_{чср}$  – СА значение динамического проседания в канале

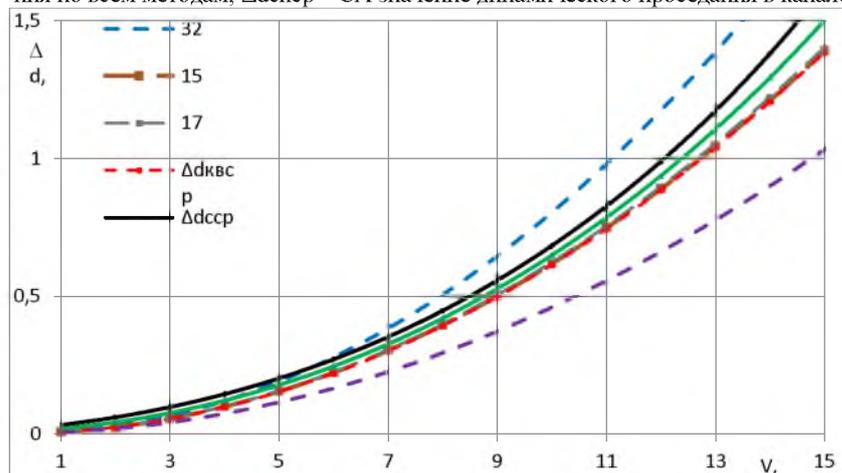


Рисунок 2 - Динамическое проседание в зависимости от скорости хода судна:

15, 17, 19, 25, 32 – номера расчетных выражений табл.2;  $\Delta d_{квср}$  – СА значение динамического проседания для квадратичных зависимостей числа Фруда;  $\Delta d_{ср}$  – СА значение динамического проседания для сложных зависимостей числа Фруда;  $\Delta d_o$  – общее СА значение динамического проседания по всем методам

СКО от СА значений, при изменении отношения глубины к осадке, практически совпадают с расчетами по методам п.10, п.30 (см. табл. 2), а при изменении скорости с расчетами по методам п.25, п.32 (см. табл. 2).

При изменении отношения глубины к

осадке судна в диапазон СКО входят значения динамического проседания судна (см.рис.1), полученные по расчетным методам пп. 7, 14, 17, 18, 19, 32, 37, 38, 43, 44, 45,46, 47, 51, 52, 53, 54, 55, 58, 66 (см. табл. 2).

При изменении скорости хода судна в диапазон СКО входят значения динамического проседания судна (см.рис. 2), полученные по расчетным методам пп. 6, 7, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 28, 30, 34, 38, 39, 43, 44, 46, 51, 54, 56, 58, 59, 60, 67 (см. табл. 2).

Некоторые методы определения проседания судна представляют значительные вычислительные трудности для практического применения (см. табл. 2 пп. 48, 49, 60-71), а полученные значения практически совпадают с расчетами по квадратичным зависимостям от числа Фруда.

Результаты представленного исследования дают основания рекомендовать, при дальнейшем совершенствовании методов оценки динамического проседания судна, представлять расчетные выражения квадратичными зависимостями от числа Фруда по глубине или скорости хода, как при аппроксимации рассмотренных методов, так и на основе экспериментальных данных. При этом в качестве базовых выражений динамического проседания судна, целесообразно выбирать группу выражений, расчеты по которым совпадают со средними арифметическими значениями и находятся в диапазонах СКО (пп.6, 7, 12, 14 – 19, 28, 30, см. табл. 2, рис.1, 2).

#### Литература

1. Басин, А.М. Гидродинамика судов на мелководье [Текст]/ А.М. Басин, И.О. Веледницкий, А.Г. Ляховицкий. – Л.: Судостроение, 1976. – 320 с.
2. 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.
3. 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.– Деп. в Мортехинформреклама, №959–мф.
4. Васьков, А.С. Анализ методов расчета динамического проседания судна [Текст]/ А.С. Васьков, А.А. Мироненко// Эксплуатация морского транспорта. – 2020. – №4. – С.24 – 31.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Коротков, С.Н. Определение безопасных скоростей при движении судна в каналах [Текст]// Совершенствование гидродинамических качеств судов и составов на внутренних водных путях. Сб. тр. НИИВТ. – 1986. – С.62 – 66.
9. 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.
10. Мастушкин, Ю.М. Гидродинамическое взаимодействие судов при встречах и обгонах [Текст]. – Л.: Судостроение, 1987. – 124 с.
11. Миронов, Г.П. Исследование условий безопасности движения крупных пассажирских судов на каналах [Текст]: автореф. дисс. к.т.н. – Горький: ГИИВТ, 1973.
12. Нормы технологического проектирования морских портов: РД 31.3.05 [Текст]. – М.: МТ РФ. – 1997. – 104 с.
13. Нормы проектирования морских каналов: РД 31.31.47–88 [Текст]. – М.: ММФ СССР. – 1988. – 25 с.
14. Павленко, В.Г. Грузовые транспортные средства для малых рек [Текст]/ В.Г.Павленко, Б.М.Сахновский, Л.Н.Врублевская. – Л.: Судостроение, 1985. – 288 с.
15. Павленко, Г.Е. Методика определения допустимого режима движения судов на реках и каналах [Текст]. – Киев: АН УССР, 1959. – 28 с.
16. Поданев, Ф.И. Обеспечение безопасной проводки судов с предельными осадками [Текст]/ Ф.И.Поданев, В.П.Шувалов// Мор. трансп. Сер.: Безопасность мореплавания. ЭИ. «Мортехинформреклама». – 1983. – Вып.6 (156). – С.11 – 18.
17. Полунин, А.М. Исследования безопасности движения речных судов на ограниченных глубинах [Текст]: Автореф. дисс. к.т.н. – Горький: ГИИВТ, 1964. – 24 с.
18. Смирнов, В.П. Экспериментальные исследования некоторых вопросов безопасности мореплавания морских судов на мелководье [Текст]: Автореф. дисс. к.т.н. – Л.: ЛВИМУ, 1978. – 26 с.
19. Снопков, В.И. Управление судном [Текст].– СПб.: АНО НПО «Профессионал».– 2004. – 536 с.
20. 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.
21. Чурин, М.Ю. Уточнение способа определения динамической просадки судов в условиях мелководья на течении [Текст]// Вестник ВГАВТ. – 2017. – Вып. 52. – С.205 – 210.
22. Хлебников, Л.Л. Допустимые осадка и скорость крупнотоннажных судов на лимитирующих участках Бурско-Днепровского-Лиманского канала [Текст]/ Л.Л. Хлебников, Л.А. Козарь, О.И.Бабич// Мор. трансп. Сер. «Судовождение и связь». ЭИ В/О «Мортехинформреклама». – 1984.

- Вып. 3 (168). – С. 1 – 6.
23. Ankudinov, V. Squat predictions for manoeuvring applications [Текст]/L.Dagget, G.Huval, C.Hewlett// Marine Simulation and Manoeuvrability. –Balkema-Rotterdam, 1996. – P.467 – 483.
  24. Barras, B.C. Ship design and performance for master and mates [Text]. – Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann. – 2004. – 252 p.
  25. 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.
  26. 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.army.mil/chetn/>
  27. 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.army.mil/chetn/>
  28. 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.
  29. Demirbilek, Z. Deep-draft coastal navigation entrance channel practice [Text]/ Z.Demirbilek, F.Sargent// Coastal Engineering Technical Note CETN I-63, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. – 1999. <http://chl.erd.c.usace.army.mil/>
  30. Eloit, K. An overview of squat measurements for container ships in restricted water [Text]/ SOCW 15-16.09.2008. – Glasgow, UK. – 2008. – P.106 – 116.
  31. International Commission for the reception of large ships [Text]/ Report of a working group IV of Permanent International Association of Navigation Congresses. – Brussels, 1985.– Bul.35.– 36 p.
  32. 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.
  33. Kimmon, P.M. Required underkeel clearance in ports [Text]/ Transport Systems and their operators in times of change. – Rotterdam, 1982. – P. 113 – 195.
  34. 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.
  35. 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.
  36. Morse, B. Ship squat in shallow and confined channels – The Canadian experience [Text]/ B.Morse, S.Michaud, A.Taschereau, R.Santerre// 2nd Squat Workshop. – 2004, Elsfleth/Oldenburg, Germany. – 9 p.
  37. Sommet, J. Maneuvering in shallow waters. The problem of squat and sinkage [Text]/ The 1-st Int. Symp. on ships approach and berthing maneuvers. – Grenobll, 1977. – P.19 – 23.
  38. Tuck E.O. Sea wave pattern evaluation. Part 5. Speed-up and Squat [Text]/ E.O.Tuck, D.C.Scullen, L.Lazauskas// Applied Mathematics Department The University of Adelaide. – 2001. – 21 p.
  39. Underkeel clearance for large ships in maritime fairways with hard bottom [Text]/ Report of a working group of the Permanent Technical Committee II of International Association of Navigation Congresses. – 1985. – Bul.51. – 24 p.
  40. 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. Hidrodinamika sudov na melkovod'e [Tekst]/ A.M. Basin, I.O. Veleznickij, 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. – Novorossiysk: NVIMU, 1989. – 61 s. – Rus. – Dep. v Morteckhinformreklama, №959-mf.
4. Vas'kov, A.S. Analiz metodov rascheta dinamicheskogo prozedaniya sudna [Tekst]/ A.S. Vas'kov, A.A. Mironenko// Ekspluatatsiyamorskogotransporta. – 2020. – №4. – S.24 – 31.
5. Vorob'ev, YU.L. [i dr.] K voprosu o navigacionnyh zapasah glubiny pod kilem sudna pr iplavanii v kanalah i na melkovod'e [Tekst]/ Mor. trans. Ser. «Sudovozhdenie i svyaz». EI. V/O «Morteckhinformreklama», 1986.–Vyp. 9(194). – S.1 – 18.
6. 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. vodnogotransporta. – 2020. – Vyp.62. – S.145 – 154.
7. Kovalev, A.P. K voprosu o «prosedanii» sudnanamelkovodei v kanale [Tekst]/ Mor. trans. Ser. «Bezopasnost' moreplavaniya». EI. V/O «Morteckhinformreklama», 1984. – Vyp. 5(165). – S. 19 – 22.
8. Korotkov, S.N. Opredelenie bezopasnyh skorostej pri dvizhenii sudna v kanalah [Tekst]/ Sovershenstvovanie gidrodinamicheskikh kachestv sudov i sostavov na vnutrennih vodnyh putyah. Sb. tr. NIIVT. – 1986. – S.62 – 66.
9. 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.

10. Mastushkin, YU.M. Gidrodinamicheskoe vzaimodejstvie sudov pri vstrechah i obgonah [Tekst]. – L.: Sudostroenie, 1987. – 124 s.
11. Mironov, G.P. Issledovanie uslovij bezopasnosti dvizheniya krupnyh passazhirskih sudov na kanalakh [Tekst]: Avtoref. diss. k.t.n. – Gor'kij: GIIVT, 1973.
12. Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya morskikh portov: RD 31.3.05 [Tekst]. – M.: MT RF. – 1997. – 104 s.
13. Normy proektirovaniya morskikh kanalov: RD 31.31.47–88 [Tekst]. – M.: MMF SSSR. – 1988. – 25 s.
14. Pavlenko, V.G. Gruzovye transportnye sredstva dlya malyh rek [Tekst]/ V.G. Pavlenko, B.M. Sahnovskij, L.N. Vrublevskaia. – L.: Sudostroenie, 1985. – 288 s.
15. Pavlenko, G.E. Metodika opredeleniya dopustimogo rezhima dvizheniya sudov na rekah i kanalakh [Tekst]. – Kiev: AN USSR, 1959. – 28 s.
16. Podanev, F.I. Obespechenie bezopasnoj provodki sudov s predel'nymi osadkami [Tekst]/ F.I. Podanev, V.P. SHuvalov// Mor. transp. Ser.: Bezopasnost' moreplavaniya. EI. «Mortekhinformreklama». – 1983. – Vyp.6 (156). – S.11 – 18.
17. Polunin, A.M. Issledovaniya bezopasnosti dvizheniya rechnyh sudov na ogranichennykh glubinah [Tekst]: Avtoref. diss. k.t.n. – Gor'kij: GIIVT, 1964. – 24 s.
18. Smirnov, V.P. Eksperimental'nye issledovaniya nekotorykh voprosov bezopasnosti moreplavaniya morskikh sudov na melkovod'e [Tekst]: Avtore. diss. k.t.n. – L.: LVIMU, 1978. – 26 s.
19. Snopkov, V.I. Upravlenie sudnom [Tekst]. – SPb.: ANO NPO «Professional». – 2004. – 536 s.
20. 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.
21. CHurin, M.YU. Utochnenie sposoba opredeleniya dinamicheskoy prosadki sudov v usloviyah melkovod'ya na techenii [Tekst]/ Vestnik VGAVT. – 2017. – Vyp. 52. – S.205 – 210.
22. Hlebnikov, L.L. Dopustimye osadka i skorost' krupnotonnazhnykh sudov na limitiruyushchih uchastkah Bursko-Dneprovskogo-Limanskogo kanala [Tekst]/ L.L. Hlebnikov, L.A. Kozar', O.I. Babich// Mor. transp. Ser. «Sudovozhdeniesvyaz'». EI V/O «Mortekhinformreklama». – 1984. – Vyp. 3 (168). – S. 1 – 6.
23. Ankudinov, V. Squat predictions for manoeuvring applications [Tekst]/ L. Dagget, G. Huval, C. Hewlett// Marine Simulation and Manoeuvrability. – Balkema-Rotterdam, 1996. – P.467 – 483.
24. Barras, B.C. Ship design and performance for master and mates [Text]. – Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann. – 2004. – 252 p.
25. Beaulieu, C. Modélisation du surenforcement des naviresmarchands qui transitent par le fleuve Saint-Laurent [Text]/ C. Beaulieu, Taha B.M.J. Ouarda, O. Seidou//Rapport de recherche №R-974.– Québec: Géniehydraulique. – 2008. – 76 p.
26. 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.usace.army.mil/chetn/>
27. 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.usace.army.mil/chetn/>
28. Debaillon, P. Modelisationnumerique du surenforcement 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.
29. Demirbilek, Z. Deep-draft coastal navigation entrance channel practice [Text]/ Z.Demirbilek, F. Sargent// Coastal Engineering Technical Note CETN I-63, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. – 1999. <http://chl.erd.usace.army.mil/>
30. Eloit, K. An overview of squat measurements for container ships in restricted water [Text]/ SOCW 15-16.09.2008. – Glasgow, UK. – 2008. – P.106 – 116.
31. International Commission for the reception of large ships [Text]/ Report of a working group IV of Permanent International Association of Navigation Congresses. – Brussels, 1985. – Bul.35. – 36 p.
32. 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.
33. Kimmon, P.M. Required underkeel clearance in ports [Text]/ Transport Systems and their operators in times of change. – Rotterdam, 1982. – P. 113 – 195.
34. 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.
35. 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.
36. Morse, B. Ship squat in shallow and confined channels – The Canadian experience [Text]/ B. Morse, S. Michaud, A. Taschereau, R. Santerre// 2nd Squat Workshop. – 2004, Elsfleth/Oldenburg, Germany. – 9 p.
37. Sommet, J. Maneuvering in shallow waters. The problem of squat and sinkage [Text]/ The 1-st Int. Symp. on ships approach and berthing maneuvers. – Grenobll, 1977. – P.19 – 23.
38. Tuck E.O. Sea wave pattern evaluation. Part 5. Speed-up and Squat [Text]/ E.O. Tuck, D.C. Scullen, L.Lazauskas// Applied Mathematics Department The University of Adelaide. – 2001. – 21 p.
39. Underkeel clearance for large ships in maritime fairways with hard bottom [Text]/ Report of a working group of the Permanent Technical Committee II of International Association of Navigation Congresses. – 1985. – Bul.51. – 24 p.
40. Vermer, Jr.H. The behavior a ship in Restricted waters [Text]/ Int. ship build. progr., 1977. – V.24. – №280. – P. 323 – 336.