

УДК 629.5.015.14

В.В. Жибодов, ст. преподаватель,**А.В. Кузьмина, ст. преподаватель,****А.И. Раков, профессор, д-р техн. наук***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: frog_ii@mail.ru***ВЛИЯНИЕ БЕЗРАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФОРМЫ КОРПУСА НА
ДИАГРАММУ СТАТИЧЕСКОЙ ОСТОЙЧИВОСТИ ПРОЕКТИРУЕМОГО СУДНА**

Рассмотрена методика повышения остойчивости судна путём малого изменения безразмерных параметров формы корпуса проектируемого судна.

Ключевые слова: малые морские суда, безразмерные параметры формы, анализ остойчивости, диаграмма статической остойчивости, плечо статической остойчивости.

Постановка задачи. Анализ остойчивости малых морских судов показывает, что вновь проектируемые малые морские суда, как правило, имеют диаграммы статической остойчивости очень близкие к предельно допустимой диаграмме установленной Правилами Регистра судоходства Украины [1]. На рисунке 1 приведены диаграммы статической остойчивости различных рыболовных судов, из которых следует, что размеры судна оказывают весьма сильное влияние на характеристики диаграммы статической остойчивости.

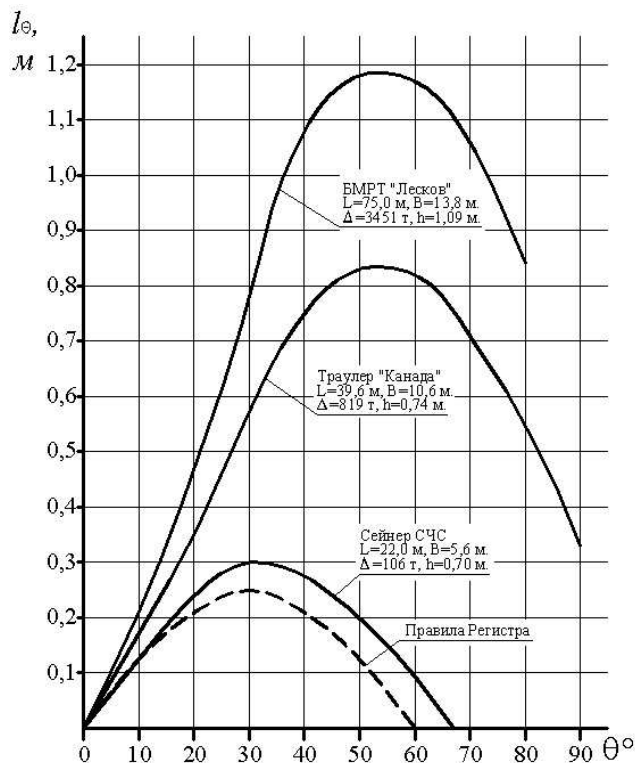


Рисунок 1 – Диаграммы статической остойчивости различных рыболовных судов

Для больших морских судов диаграмма статической остойчивости имеет громадный запас по сравнению с минимально допустимой Правилами. Для сейнера СЧС диаграмма имеет совсем малый запас остойчивости. При этом необходимо учитывать, что малые суда, как правило, эксплуатируются в прибрежных районах, где волнение, особенно на мелководье, имеет более тяжелые условия воздействия на суда, чем на глубокой воде.

Таким образом, для малых морских судов задача улучшения диаграммы статической остойчивости при проектировании является наиболее значимой. Но при этом необходимо учитывать, что судовладельцами малых морских судов обычно являются предприниматели малого и среднего бизнеса, которые не в состоянии вкладывать единовременно крупные капиталовложения при покупке новых судов. Следовательно, при попытке улучшения диаграммы статической остойчивости необходимо стремиться к тому, чтобы строительная стоимость судна по возможности имела незначительное увеличение.

Изложение основного материала. Рассмотрим функцию плеча статической остойчивости в виде

$$l_{\theta} = f\left(\theta, T, \frac{B}{T}, \frac{H}{T}, \delta, \alpha, k, \zeta\right), \quad (1)$$

где θ – угол крена судна, град; T – осадка судна, м; $\frac{B}{T}, \frac{H}{T}$ – соотношения главных размерений; δ, α – коэффициенты полноты корпуса судна; k – условный коэффициент седловатости и развития надстроек; $\zeta = \frac{z_g}{H}$ – коэффициент относительного положения центра тяжести судна по высоте.

Приращение плеча статической остойчивости l_{θ} при заданном $\theta = \text{const}$ в этом случае приближенно можно выразить как полный дифференциал этой функции

$$dl_{\theta} = \frac{\partial l_{\theta}}{\partial T} dT + \frac{\partial l_{\theta}}{\partial \frac{B}{T}} d\frac{B}{T} + \frac{\partial l_{\theta}}{\partial \frac{H}{T}} d\frac{H}{T} + \frac{\partial l_{\theta}}{\partial \delta} d\delta + \frac{\partial l_{\theta}}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial l_{\theta}}{\partial k} dk + \frac{\partial l_{\theta}}{\partial \zeta} d\zeta, \quad (2)$$

Тогда плечо статической остойчивости проектируемого судна определяется как

$$l_{\theta} = l_{\theta 0} + dl_{\theta}, \quad (3)$$

где $l_{\theta 0}$ – плечо статической остойчивости судна-прототипа.

Отметим, что внесение изменений в безразмерные параметры формы корпуса прототипа при $T = \text{const}$ равносильно такой деформации его обводов, которая превращает их в геометрически подобную модель проектируемого судна. Для геометрически подобных судов плечо статической остойчивости пересчитывают по формуле

$$l_{\theta} = \lambda(l_{\theta 0} + dl_{\theta}), \quad (4)$$

где $\lambda = \frac{T}{T_0}$ – линейный масштаб пересчёта.

В качестве приближенной исходной формулы для плеча статической остойчивости примем формулу В.Г. Власова – С.Н. Благовещенского [2]

$$l_{\theta} = y_{C_{90}} \cdot f_1(\theta) + (z_{C_{90}} - z_{C_0}) \cdot f_2(\theta) + r_0 \cdot f_3(\theta) + r_{90} \cdot f_4(\theta) - z_g \cdot \sin \theta, \quad (5)$$

где $y_{C_{90}}, z_{C_{90}}$ – координаты центра величины при наклонении судна на 90° ; r_0, r_{90} – метацентрические радиусы в прямом положении судна и при крене 90° ; z_g, z_{C_0} – ординаты центра величины и центра тяжести в прямом положении судна; $f_i(\theta)$ – линейные комбинации тригонометрических функций от угла крена.

Величины $r_0, r_{90}, y_{C_{90}}, z_{C_{90}}, z_{C_0}, z_g$ определим по приближенным зависимостям в виде [3]

$$\left. \begin{aligned} z_{C_0} &= \frac{\alpha}{\alpha + \delta} \cdot T \\ r_0 &= \frac{1}{m} \cdot \frac{\alpha^2}{\delta} \cdot \frac{B^2}{T} \\ z_g &= \zeta \cdot H, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

а также используем приближенные формулы, предложенные академиком В.Л. Позднюниным,

$$\left. \begin{aligned} y_{C_{90}} &= \frac{B}{2} \cdot \left(1 - c \cdot \frac{T}{H_1}\right); \\ z_{C_{90}} - z_{C_0} &= c_1 \cdot \left(1 - c_2 \cdot \frac{T}{H_1}\right) \cdot H_1; \\ r_{90} &= r_0 \cdot \left(\frac{z_{C_{90}} - z_{C_0}}{y_{C_{90}}}\right)^3, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где c, c_1, c_2 – константы, определяемые по статистическим данным или по данным судна-прототипа; H_1 – приведенная высота борта, определяемая по формуле

$$H_1 = H \cdot \left(1 + \left(\frac{V_H}{V} \right) \right)^\chi, \quad (8)$$

где H – расчетная высота борта; V – кубатура корпуса от киля до горизонтальной плоскости, проходящей через наинизшую точку борта; V_H – кубатура вышележащих водонепроницаемых частей судна, включаемых в расчет остойчивости на больших углах крена; $\chi = \frac{\delta}{\alpha}$ – коэффициент вертикальной полноты корпуса судна.

Н.Б. Севастьянов [3] ввел понятие условного коэффициента седловатости

$$k = 1 + \frac{V_H}{V}. \quad (9)$$

тогда приведенную высоту борта можно определить как

$$H_1 = k^\chi \cdot H. \quad (10)$$

Для удобства дальнейшего изложения представим формулу (4) в общем виде

$$l_\theta = \lambda \cdot \sum_{i=1}^{i=5} \varphi_i \cdot f_i(\theta). \quad (11)$$

где φ_i – функции параметров формы обводов корпуса проектируемого судна.

Используя уравнение (5) и приближенные формулы (6), (7), плечо статической остойчивости проектируемого судна при $\theta = \text{const}$ согласно формуле (11) можно представить как

$$l_\theta = \frac{T}{T_0} \cdot \left[l_{\theta_0} + d(B/T) \sum_{i=1}^{i=5} \frac{\partial \varphi_i}{\partial (B/T)} f_i(\theta) + d(H/T) \sum_{i=1}^{i=5} \frac{\partial \varphi_i}{\partial (H/T)} f_i(\theta) + d\delta \sum_{i=1}^{i=5} \frac{\partial \varphi_i}{\partial \delta} f_i(\theta) + \right. \\ \left. + d\alpha \sum_{i=1}^{i=5} \frac{\partial \varphi_i}{\partial \alpha} f_i(\theta) + d\kappa \sum_{i=1}^{i=5} \frac{\partial \varphi_i}{\partial \kappa} f_i(\theta) + d\zeta \sum_{i=1}^{i=5} \frac{\partial \varphi_i}{\partial \zeta} f_i(\theta) \right]. \quad (12)$$

Для решения уравнения (12) необходимо иметь:

– исходные данные судна-прототипа;
– приращения безразмерных параметров формы корпуса проектируемого судна по сравнению с данными судна-прототипа;

– значения частных производных типа $\frac{d\varphi_i}{dx_i}$, которые вычисляются исходя из формул (6), (7)

и приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчётные формулы частных производных типа $\frac{d\varphi_i}{dx_i}$

φ_i	$\frac{\partial \varphi_i}{\partial \frac{B}{T}}$	$\frac{\partial \varphi_i}{\partial \frac{H}{T}}$	$\frac{\partial \varphi_i}{\partial \delta}$	$\frac{\partial \varphi_i}{\partial \alpha}$	$\frac{\partial \varphi_i}{\partial \kappa}$	$\frac{\partial \varphi_i}{\partial \zeta}$
$\varphi_1 = y_{C_{90}}$	$\frac{y_{C_{90}}}{\frac{B}{T}}$	$\frac{0.5 \cdot B - y_{C_{90}}}{\frac{B}{T}}$	$\frac{\chi \cdot (0.5 \cdot B - y_{C_{90}}) \ln k}{\delta}$	$\frac{\chi \cdot (0.5 \cdot B - y_{C_{90}}) \ln k}{\alpha}$	$\frac{\chi \cdot \left(\frac{B}{2} - y_{C_{90}} \right)}{k}$	0
$\varphi_2 = Z_{C_{90}} - Z_{C_0}$	0	$\frac{Z_{C_{90}}}{\frac{H}{T}}$	$\frac{\chi \cdot Z_{C_{90}} \cdot \ln k + \frac{\chi}{1+\chi} \cdot Z_{C_0}}{\delta}$	$\frac{\chi \cdot Z_{C_{90}} \cdot \ln k - \frac{\chi}{1+\chi} \cdot Z_{C_0}}{\alpha}$	$\frac{\chi \cdot Z_{C_{90}}}{k}$	0
$\varphi_3 = r_0$	$\frac{2 \cdot r_0}{\frac{B}{T}}$	0	$-\left(\frac{r_0}{\delta} \right)$	$\frac{2r_0}{\alpha}$	0	0
$\varphi_4 = r_{90}$	$-\frac{r_0}{\frac{B}{T}}$	$\frac{3 \cdot r_{90}}{\frac{H}{T}}$	$-\frac{(1-3\chi \ln k) \cdot r_{90}}{\delta}$	$\frac{(2-3 \cdot \chi \cdot \ln k) \cdot r_{90}}{\alpha}$	$\frac{3 \cdot \chi \cdot r_{90}}{k}$	0
$\varphi_5 = -a$	0	$-\frac{Z_g}{\frac{H}{T}}$	$-\frac{\chi}{1+\chi} \cdot \frac{Z_{C_0}}{\delta}$	$\frac{\chi}{1+\chi} \cdot \frac{Z_{C_0}}{\alpha}$	0	$-H$

Уравнение (12) можно использовать для построения диаграммы статической остойчивости, вычисляя значения проектируемого судна для ряда углов крена в диапазоне от 0° до 90° .

Таким образом, задаваясь приращениями безразмерных параметров формы обводов корпуса проектируемого судна, мы получаем возможность перестроить диаграмму статической остойчивости судна-прототипа в нужном нам направлении.

Расчётный пример

В качестве судна-прототипа принят сейнер типа РС-300.

Исходные данные:

$\nabla = 236 \text{ м}^3$,	$T = 2,5 \text{ м}$,	$\delta = 0,48$,	$z_{C_{90}} = 2,44 \text{ м}$,
$\Delta = 242 \text{ т}$,	$\frac{L}{B} = 4,55$,	$\alpha = 0,80$,	$z_{C_0} = 1,59 \text{ м}$,
$L_{\perp\perp} = 30 \text{ м}$,	$\frac{B}{T} = 2,64$,	$\beta = 0,71$,	$y_{C_{90}} = 1,33 \text{ м}$,
$B = 6,6 \text{ м}$,	$\frac{H}{T} = 1,40$,	$\zeta = 0,80$,	$r_{90} = 0,67 \text{ м}$,
$H = 3,5 \text{ м}$,	$k = 1,15$,	$z_g = 2,80 \text{ м}$,	$r_0 = 1,98 \text{ м}$.

С использованием данных судна-прототипа, по формулам, приведенным в таблице 1, подсчитаем частные производные типа $\frac{d\varphi_i}{dx_i}$ (таблица 2).

Таблица 2 – Значения частных производных типа $\frac{d\varphi_i}{dx_i}$ для сейнера РС-300

φ_i	$\frac{\partial \varphi_i}{\partial \frac{B}{T}}$	$\frac{\partial \varphi_i}{\partial \frac{H}{T}}$	$\frac{\partial \varphi_i}{\partial \delta}$	$\frac{\partial \varphi_i}{\partial \alpha}$	$\frac{\partial \varphi_i}{\partial k}$	$\frac{\partial \varphi_i}{\partial \zeta}$
$\varphi_1 = y_{C_{90}}$	0,504	1,41	0,344	- 0,206	1,03	0,00
$\varphi_2 = z_{C_{90}} - z_{C_0}$	0,0	1,74	1,670	- 1,00	1,270	0,00
$\varphi_3 = r_0$	1,50	0,0	- 4,120	4,95	0,00	0,00
$\varphi_4 = r_{90}$	-0,254	1,43	- 1,040	1,47	0,940	0,00
$\varphi_5 = -a$	0,0	-2,00	- 1,240	0,745	0,00	- 3,50

Согласно формуле (11), найдены частные производные типа

$$\frac{\partial l_\theta}{\partial \frac{B}{T}} = \sum_{i=1}^{i=5} \frac{\partial \varphi_i}{\partial \frac{B}{T}} f_i(\theta), \quad (13)$$

вычисление которых сведено в таблицу 3 для углов крена в диапазоне от 0° до 90° . Остальные частные производные типа $\frac{\partial l_\theta}{\partial x_i}$ вычисляются аналогичным образом.

Таблица 3 – значение частной производной $\frac{\partial l_\theta}{\partial \frac{B}{T}}$ для РС-300

φ_i	$\frac{\partial \varphi_i}{\partial \frac{B}{T}}$	θ°									
		0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
φ_1	0,504	0,0	0,025	0,170	0,424	0,644	0,686	0,532	0,294	0,106	0,0
φ_2	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
φ_3	1,50	0,0	0,226	0,276	0,121	-1,104	-0,232	-0,202	-0,093	-0,015	0,0
φ_4	-0,254	0,0	-0,003	-0,016	-0,034	-0,039	-0,017	0,021	0,047	0,038	0,0
φ_5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\frac{\partial l_\theta}{\partial \frac{B}{T}}$		0,0	0,248	0,410	0,511	0,501	0,437	0,351	0,248	0,129	0,0

В таблице 4 приведены сводные данные по частным производным типа $\partial l_{\theta} / \partial x_i$, а на рисунке 2 представлены графики изменения $\frac{\partial l_{\theta}}{\partial x_i}$ в диапазоне от 0° до 90° .

Таблица 4 – Сводная таблица производных типа $\frac{\partial l_{\theta}}{\partial x_i}$ для сейнера РС-300

Частные производные	θ°									
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
$\frac{\partial l_{\theta}}{\partial \frac{B}{T}} \dots\dots\dots$	0,00	0,248	0,410	0,511	0,501	0,437	0,351	0,248	0,129	0,00
$\frac{\partial l_{\theta}}{\partial \frac{H}{T}} \dots\dots\dots$	0,00	-0,327	-0,540	-0,595	-0,520	-0,400	-0,313	-0,274	-0,262	-0,260
$\frac{\partial l_{\theta}}{\partial \delta} \dots\dots\dots$	0,00	-0,891	-1,532	-1,734	-1,440	-0,769	-0,028	0,488	0,611	0,430
$\frac{\partial l_{\theta}}{\partial \alpha} \dots\dots\dots$	0,00	0,918	1,429	1,355	0,824	0,138	-0,383	-0,600	-0,515	-0,255
$\frac{\partial l_{\theta}}{\partial k} \dots\dots\dots$	0,00	0,014	0,099	0,286	0,547	0,820	1,045	1,193	1,261	1,270
$\frac{\partial l_{\theta}}{\partial \zeta} \dots\dots\dots$	0,00	-0,609	-1,203	-1,750	-2,250	-2,680	-3,030	-3,290	-3,450	-3,500

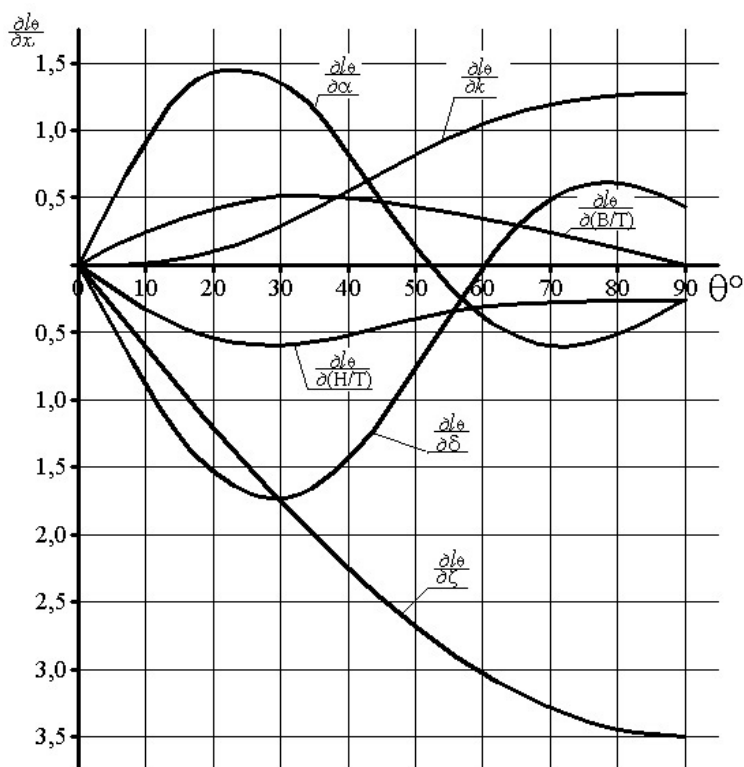


Рисунок 2 – Графики частных производных типа $\frac{\partial l_{\theta}}{\partial x_i}$ для сейнера РС-300

На рисунке 3 приведена диаграмма статической остойчивости сейнера РС-300. Из диаграммы следует, что статическая остойчивость сейнера РС-300 удовлетворяет требованиям Правил Регистра судоходства Украины, однако с очень малым запасом.

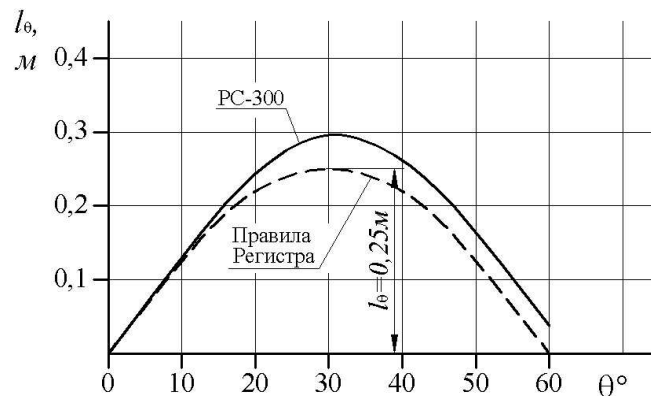


Рисунок 3 – Диаграмма статической остойчивости сейнера РС-300

Поставим задачу – улучшить диаграмму статической остойчивости сейнера РС-300 за счёт небольших изменений безразмерных параметров формы корпуса судна. Примем изменения безразмерных параметров на 5 % от первоначальной величины, а именно:

$$d(B/T) = 0,132; \quad d(H/T) = 0,070; \quad d\delta = -0,024; \quad d\alpha = 0,04; \quad dk = 0,057; \quad d\zeta = -0,04.$$

В таблице 5, с учётом данных таблицы 4, определены приращения dl_θ плеча статической остойчивости вида $dl_\theta = \frac{\partial l_\theta}{\partial x} dx$. На рисунке 4 показаны приращения плеча статической остойчивости по соответствующим безразмерным параметрам формы корпуса судна, а именно:

$$\begin{aligned} 1) \quad l_{\theta 1} &= l_{\theta_0} + \frac{\partial l_\theta}{\partial \frac{B}{T}} d \frac{B}{T}; & 2) \quad l_{\theta 2} &= l_{\theta_0} + \frac{\partial l_\theta}{\partial \frac{H}{T}} d \frac{H}{T}; & 3) \quad l_{\theta 3} &= l_{\theta_0} + \frac{\partial l_\theta}{\partial \delta} d\delta; \\ 4) \quad l_{\theta 4} &= l_{\theta_0} + \frac{\partial l_\theta}{\partial \alpha} d\alpha; & 5) \quad l_{\theta 5} &= l_{\theta_0} + \frac{\partial l_\theta}{\partial k} dk; & 6) \quad l_{\theta 6} &= l_{\theta_0} + \frac{\partial l_\theta}{\partial \zeta} d\zeta. \end{aligned}$$

Таблица 5 – Приращение плеча статической остойчивости вида $dl_\theta = \sum \frac{\partial l_\theta}{\partial x} dx$

№ п/п	θ°	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
1	$d \frac{B}{T} = 0,132$	0,0	0,033	0,060	0,067	0,066	0,058	0,046	0,033	0,017	0
2	$d \frac{H}{T} = 0,070$	0,0	-0,023	-0,033	-0,041	-0,037	-0,029	-0,022	-0,019	-0,018	-0,018
3	$d\delta = -0,024$	0,0	0,021	0,036	0,042	0,035	0,018	0,001	-0,012	-0,015	-0,010
4	$d\alpha = 0,040$	0,0	0,037	0,057	0,054	0,033	0,005	-0,015	-0,024	-0,021	-0,010
5	$dk = 0,057$	0,0	0,001	0,009	0,017	0,032	0,047	0,059	0,067	0,071	0,073
6	$d\zeta = -0,040$	0,0	0,024	0,049	0,070	0,090	0,107	0,121	0,132	0,138	0,140
7	$dl_\theta = \sum \frac{\partial l_\theta}{\partial x} dx$, м.	0,0	0,093	0,178	0,209	0,219	0,206	0,189	0,177	0,152	0,187
8	l_θ (тех. проект)	0,0	0,130	0,243	0,296	0,262	0,164	0,038	-0,098	-0,235	-0,360
9	$l_\theta = l_{\theta_0} + dl_\theta$, м.	0,0	0,223	0,421	0,505	0,481	0,370	0,227	0,079	-0,083	-0,173

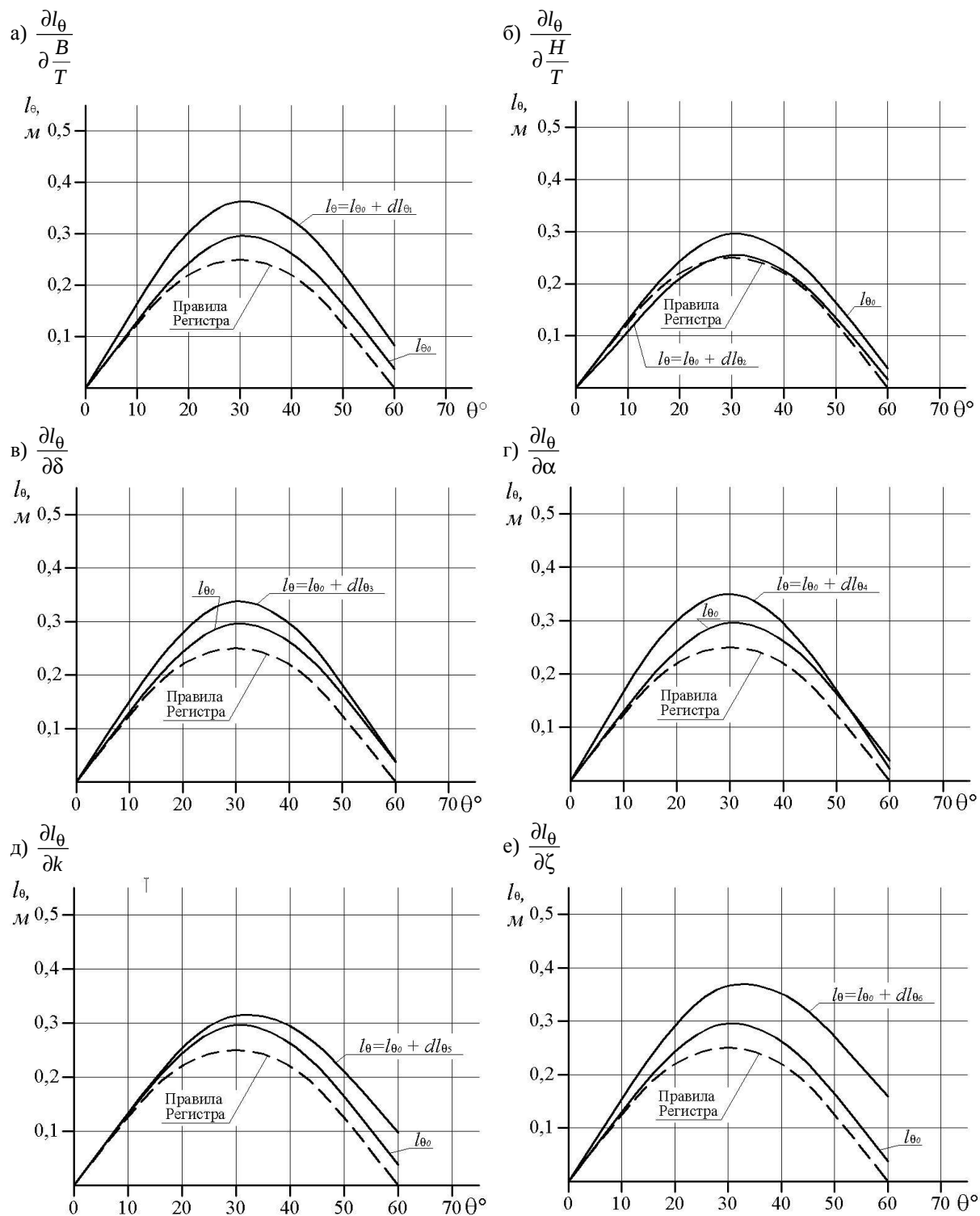


Рисунок 4 – Влияние приращений плеча статической остойчивости сейнера РС-300

Вывод. Перспективы исследований в данном направлении. На рисунке 5 приведена диаграмма статической остойчивости рассматриваемого сейнера с учётом суммы всех приращений $dl_{\theta} = \sum \frac{\partial l_{\theta}}{\partial x} dx$, полученных за счёт изменения безразмерных параметров формы корпуса судна.

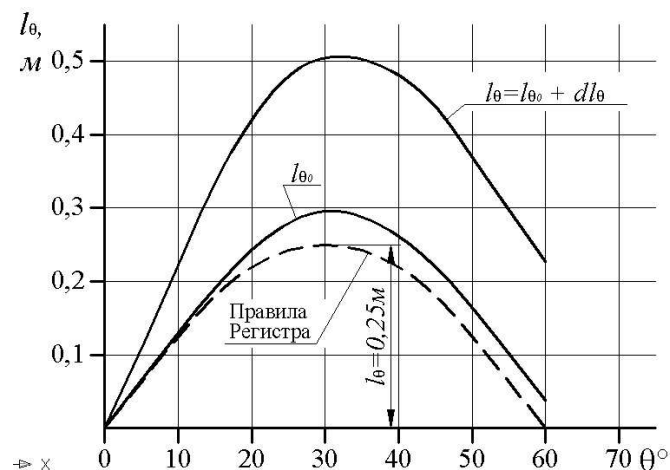


Рисунок 5 – Диаграмма статической остойчивости сейнера РС-300 с учётом приращений за счёт изменения безразмерных параметров формы корпуса судна

Из графиков l_θ следует, что при малых изменениях безразмерных параметров может быть получено существенное приращение плеч статической остойчивости судна.

Дальнейшие исследования в этом целесообразно вести в направлении изучения влияния малых изменений безразмерных параметров формы корпуса на динамическую остойчивость судна и определения границ применимости данной методики.

Библиографический список использованной литературы

1. Регістр судноплавства України. Правила класифікації й будівлі малих судів (в 4-х томах) Т. 4. — Київ: Регістр судноплавства України, 2002.
2. Справочник по теории корабля / под ред. Я.И. Войткунский, Р.Я. Першиц, И.А. Титов. — Л.: Судпромгиз, 1960. — 687 с.
3. Раков А.И. Оптимизация основных характеристик и элементов промысловых судов / А. И. Раков. — Л.: Судостроение, 1978. — 231 с.

Поступила в редакцию 15.04.2011 г.

Жибоедов В.В., Кузьміна Г.В., Раков О.І. Вплив безрозмірних параметрів форми корпусу на діаграму статичної остійності проєктованого судна

Розглянуто методику підвищення остійності судна шляхом малої зміни безрозмірних параметрів форми корпусу проєктованого судна.

Ключові слова: малі морські судна, безрозмірні параметри форми, аналіз остійності, діаграма статичної остійності, плечі статичної остійності.

Zhiboedov V.V., Kuzmina A.V., Rakov A.I. Influence of dimensionless parameters of the form of the case on the diagram of static stability of a projected vessel

The technique of stability increase for a vessel by small change of dimensionless parameters of the form of the case of a projected vessel is considered.

Keywords: small ships, the dimensionless shape parameters, stability analysis, static stability diagram, shoulder static stability.