

**ОСТОЙЧИВОСТЬ И БОРТОВАЯ КАЧКА КАТАМАРАНА  
С ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ РАЗГРУЗКОЙ**

О. И. Соломенцев, д-р техн. наук, проф. ;  
А. С. Кныш, магистрант

*Национальный университет кораблестроения, г. Николаев*

**Аннотация.** Рассмотрены расчет устойчивости катамаранов с гидродинамической разгрузкой при наличии хода и расчет бортовой качки таких судов.

**Ключевые слова:** катамаран, гидродинамическая разгрузка, устойчивость, бортовая качка.

**Анотація.** Розглянуті розрахунок остійності катамаранів з гідродинамічним розвантаженням при наявності ходу і розрахунок бортової хитавиці таких суден.

**Ключові слова:** катамаран, гідродинамічне розвантаження, остійність, бортова хитавиця.

**Abstract.** In this article we learn stability of the catamaran with hydrofoils and non-zero speed. Roll of such a ships is also learned.

**Keywords:** catamaran, hydrofoils, stability, roll.

**ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Одним из эффективных способов повышения технико-экономических показателей небольших скоростных пассажирских и иных катамаранов является применение гидродинамической разгрузки, основной вид которой – подводные крылья. Определение главных элементов этих катамаранов рассмотрено в работе [6], а ряд положений указанной работы развит и уточнен в предыдущей статье авторов [10].

Однако в известной авторам литературе отсутствуют какие-либо рекомендации в отношении расчета бортовой качки и проверки динамической устойчивости этих судов с учетом разгрузки. Соответствующие требования, содержащиеся в Правилах по скоростным судам различных классификационных обществ (например, в [7]), не учитывают влияния разгрузки. В то же время устойчивость на ходу может существенно снизиться. Бортовая качка на ходу также заметно уменьшается. При отсутствии хода снижение бортовой качки также имеет место, хотя и в меньшей степени, чем на ходу. Поэтому физическая картина бортового накренения катамарана с гидродинамической разгрузкой должна быть иной, чем при отсутствии разгрузки. Получение соответствующих расчетных зависимостей и представляет собой решаемую в данной статье проблему.

**АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
И ПУБЛИКАЦИЙ**

Анализируемый в данной статье круг вопросов рассмотрен одним из авторов применительно к скоростным однокорпусным судам в [12], а применительно к скоростным, но не имеющим разгрузки катамаранам – в работе [9].

Для решения поставленной в статье задачи представляет интерес расчет устойчивости судов на подводных крыльях, соответствующие зависимости приведены в [3, 5]. Используемые далее экспериментальные данные по демпфированию бортовой качки катамарана без разгрузки приведены в [4], а принятая модификация метода статистической линеаризации предложена в [2].

**ЦЕЛЮЮ ДАННОЙ РАБОТЫ** является получение приближенных зависимостей для расчета характеристик начальной устойчивости и бортовой качки катамарана с гидродинамической разгрузкой, которые могли бы быть применены на начальных стадиях проектирования.

**ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА**

На начальном этапе создания норм Регистра бывшего СССР для высокоскоростных судов предлагалось при нормировании устойчивости гражданских судов с динамическими принципами поддержания рассматривать две расчетные ситуации [1]. В первом случае проверяется устойчивость судна с динамическим поддержанием для случая, когда это судно, несмотря на сложные погодные условия, все же движется с динамическим поддержанием. Эти условия носят название наилучших допустимых условий. Во втором случае рассматривается ситуация, когда в условиях интенсивных ветра и волнения судно вынужденно переходит в водоизмещающий режим, и устойчивость проверяется именно для этого режима. Эти условия предлагалось считать критическими проектными условиями, и они более жесткие, чем наилучшие допустимые условия [7]. Поэтому расчетные зависимости как для устойчивости, так и для бортовой качки необходимы для двух случаев: для

движения со скоростью, близкой к скорости полного хода (эксплуатационный режим), и для движения малым ходом или даже при отсутствии хода (водоизмещающий режим: гидродинамическая разгрузка отсутствует, речь идет о выживании судна).

Расчеты устойчивости при отсутствии хода и разгрузки общеизвестны, и их описание не представляет научного интереса. Рассматривая устойчивость катамаранов с гидродинамической разгрузкой при наличии хода, ограничимся плоскими подводными крыльями и запишем для этого случая выражение для восстанавливающего момента при конечных, но небольших углах крена, не превышающих угол выхода подводных крыльев из воды  $\theta_{\text{БК}}$ . Восстанавливающий момент от гидростатических сил в этом диапазоне может считаться линейной функцией угла крена. Для восстанавливающего момента  $M_{\text{В0}}$ , который является функцией угла крена  $\theta$ , найдем [3, 11]:

$$M_{\text{В0}}(\theta) = M_{\text{В0}}^{(0)}(\theta) + \delta M_{\text{В0}}(\theta) \approx (K_{\text{О0}} + \delta K_{\text{О0}})\theta;$$

$$M_{\text{В0}}^{(0)}(\theta) \approx K_{\text{О0}}\theta; \quad \delta M_{\text{В0}} = K_{\text{рзг}} D [l_{\theta F}(\theta) - l_{\theta W}(\theta)] \approx \delta K_{\text{О0}}\theta;$$

$$K_{\text{рзг}} = \frac{Z}{D};$$

$$l_{\theta F}(\theta) = \frac{\rho v^2}{2D} \left[ \sum_{i=1}^I C_{Zi} S_{\text{кр}i} b_{\text{кр}i} \lambda_{\text{кр}i} \int_{-0,5}^{0,5} \varphi_{\text{кр}i}(\bar{h}_{\text{кр}i} - \lambda_{\text{кр}i} \bar{y}/\bar{y} \sin \theta) \bar{y} d\bar{y} \right];$$

$$l_{\theta W}(\theta) = a_{\text{к}} \sin \theta; \quad a_{\text{к}} = z_{\text{г}} - T + \frac{\sum_{i=1}^I C_{Zi} S_{\text{кр}i} h_{\text{кр}i}}{\sum_{i=1}^I C_{Zi} S_{\text{кр}i}},$$

где  $\rho$  – плотность воды;

$K_{\text{рзг}}$  – коэффициент гидродинамической разгрузки;  
 $D$  – водоизмещение судна при отсутствии разгрузки;  
 $Z$  – вертикальная сила, возникающая при наличии хода на элементах гидродинамической разгрузки (здесь в качестве таких элементов рассматриваются только подводные крылья);

$K_{\text{О0}}$  – коэффициент поперечной устойчивости, обусловленный наличием водоизмещающего объема и определяемый для случая, когда разгрузка отсутствует, ход имеется, но водоизмещение проектируемого корабля равно  $(1 - K_{\text{рзг}})D$ , величина  $K_{\text{О0}}$  находится по [9];

$\delta K_{\text{О0}}$  – дополнительный коэффициент поперечной устойчивости, связанный с наличием подводных крыльев и хода;

$M_{\text{В0}}$  – суммарный восстанавливающий момент;

$M_{\text{В0}}^{(0)}$  – восстанавливающий момент, обусловленный наличием водоизмещающего объема;

$\delta M_{\text{В0}}$  – восстанавливающий момент, обусловленный действием подводных крыльев;

$l_{\theta F}(\theta)$ ,  $l_{\theta W}(\theta)$  – дополнительные плечи устойчивости формы и веса, обусловленные влиянием крыла, на начальном участке диаграммы статической устойчивости;

$C_{Zi}$  – коэффициент подъемной силы  $i$ -го крыла при бесконечно большом погружении [10];

$b_{\text{кр}i}$  – хорда  $i$ -го крыла;

$\lambda_{\text{кр}i}$  – относительное удлинение  $i$ -го крыла,  $\lambda_{\text{кр}i} = \frac{l_{\text{кр}i}}{b_{\text{кр}i}}$ , где  $l_{\text{кр}i}$  – размах  $i$ -го крыла;

$h_{\text{кр}i}$  – глубина погружения  $i$ -го крыла под свободную поверхность,  $\bar{h}_{\text{кр}i} = \frac{h_{\text{кр}i}}{b_{\text{кр}i}}$ ;

$\varphi_{\text{кр}i}(\bar{h}_{\text{кр}i})$  – функция, характеризующая влияние свободной поверхности на подъемную силу крыла.

В таком виде эти формулы применимы при углах крена  $\theta < \theta_{\text{БК}}$ . Осредненный по крыльевому комплексу угол выхода (в радианах)  $\theta_{\text{БК}}$  определим в виде

$$\theta_{\text{БК}} \approx \frac{1}{\sum_{i=1}^I C_{Zi}} \sum_{i=1}^I C_{Zi} \frac{2h_{\text{кр}i}}{l_{\text{кр}i}}.$$

Здесь принято, что синус этого угла приближенно равен самому углу (в радианах). В этих формулах коэффициент разгрузки  $K_{\text{рзг}}$ , скорость хода  $v$ , водоизмещение при отсутствии хода  $D = \sum_{j=1}^J p_j$  (здесь  $J$  – количество статей нагрузки,  $p_j$  – вес по  $j$ -й статье нагрузки) и геометрические характеристики крыльев  $C_{Zi}$ ,  $S_{\text{кр}i}$  должны быть связаны между собой соотношением

$$K_{\text{рзг}} D = \frac{\rho v^2}{2} \sum_{i=1}^I C_{Zi}^* S_{\text{кр}i};$$

$$C_{Zi}^* = C_{Zi} \varphi_{\text{кр}i}(\bar{h}_{\text{кр}i}).$$

Очевидно, что вид расчетной формулы для дополнительного плеча устойчивости формы  $l_{\theta F}(\theta)$  будет зависеть от выбора функциональной зависимости  $\varphi_{\text{кр}i}(\bar{h}_{\text{кр}i})$ . В работе [3] была принята за основу экспоненциальная зависимость вида

$$\varphi_{\text{кр}i}(\bar{h}_{\text{кр}i}) = 1 - 0,5 \exp(-2,5\bar{h}_{\text{кр}i}).$$

Однако эта зависимость может быть и линеаризована. Так, по данным экспериментов [5], при  $\bar{h}_{\text{кр}i} < 0,5$  приближенно можно принимать

$$\varphi_{\text{кр}i}(\bar{h}_{\text{кр}i}) = 0,5 + \frac{C_{Zi}^h}{C_{Zi}} \bar{h}_{\text{кр}i},$$

где  $C_{Zi}^h$  – производная коэффициента подъемной силы на  $i$ -м крыле по отнесенной к хорде глубине погружения, при этом  $\frac{C_{Zi}^h}{C_{Zi}} \approx 0,8$ .

В первом случае для дополнительного плеча устойчивости формы в работе [3] была получена

зависимость вида

$$l_{0F}(\theta) = \frac{\rho v^2}{2D} \sum_{i=1}^l C_{Zi} S_{кр} b_{кр} \lambda_{кр} f_{кр}^*(\bar{h}_{кр}) F_{кр}(\lambda_{кр}, \theta) \cos \theta;$$

$$f_{кр}^*(\bar{h}_{кр}) = \frac{0,5 \exp(-2,5\bar{h}_{кр})}{1,0 - 0,5 \exp(-2,5\bar{h}_{кр})};$$

$$F_{кр}(\lambda_{кр}, \theta) = \frac{ch(1,25\lambda_{кр}\theta) - \frac{sh(1,25\lambda_{кр}\theta)}{1,25\lambda_{кр}\theta}}{sh(1,25\lambda_{кр}\theta)}.$$

Представив дополнительный коэффициент поперечной остойчивости катамарана с гидродинамической разгрузкой  $\delta K_{00}$  в виде

$$\delta K_{00} = \frac{\delta M_{B0}}{\sin \theta} = K_{рзг} D(r_K - a_K),$$

найдем дополнительный начальный поперечный метacentрический радиус  $r_K$ , устремив к нулю величину  $\frac{l_{0fk1}(\theta)}{\sin \theta}$ .

Тогда после описанных в работе [3] преобразований получим

$$r_K = \frac{5\rho v^2}{48D} \sum_{i=1}^l C_{Zi} S_{кр} b_{кр} \lambda_{кр}^2 f_{кр}(\bar{h}_{кр}) \approx$$

$$\approx \frac{\rho v^2}{10D} \sum_{i=1}^l C_{Zi} S_{кр} b_{кр} \lambda_{кр}^2 f_{кр}(\bar{h}_{кр}).$$

Во втором случае, если линеаризовать зависимость  $\varphi_{кр}(\bar{h}_{кр})$ , в формировании кренящего момента участвует только та часть подъемной силы, которая зависит от безразмерного погружения крыла. Дополнительный восстанавливающий момент остойчивости формы  $\delta M_{B0F} = D l_{0F}(\theta)$  определится, как и ранее, интегрированием по размаху крыла в виде [5]

$$\delta M_{B0F} \approx \frac{\rho v^2}{2} \theta \sum_{i=1}^l C_{Zi} S_{кр} \frac{l_{кр} \lambda_{кр} \bar{h}_{кр}}{12},$$

и дополнительный начальный поперечный метacentрический радиус  $r_{K1}$  определится как

$$r_{K1} = \frac{\delta M_{B0F}}{D\theta} \approx \frac{\rho v^2}{2D} \sum_{i=1}^l C_{Zi} S_{кр} \frac{l_{кр} \lambda_{кр} \bar{h}_{кр}}{12}.$$

Далее необходимо определить угол крена  $\theta_{рзг} = \theta^*$  такой, что при  $\theta \geq \theta^*$  разгрузка прекращается. Это означает, что остойчивость корабля при таких углах крена можно определять так же, как и для водоизмещающего корабля, приняв в приведенных выше формулах  $K_{рзг} = 0$  и  $M_{B0}(\theta) = M_{B0}^0(\theta)$ . В работе [3] выполнен расчетный анализ зависимости  $\delta M_{B0}(\theta)$  при конечных углах крена. Этот анализ позволяет приближенно установить величину угла крена  $\theta_{кр}$  такую, что при углах крена  $\theta > \theta_{кр}$  величина  $\delta M_{B0}(\theta)$  начинает быстро снижаться. Поэтому примем условно  $\theta_{рзг}^* = \theta_{кр}$ .

Тогда путем обработки расчетных данных из работы [3] для плоских крыльев находим:

$$\theta_{рзг}'' = \frac{1}{\sum_{i=1}^l C_{Zi}} \sum_{i=1}^l C_{Zi} \theta_{рзг}'';$$

$$\theta_{рзг}'' = \frac{2}{\lambda_{кр}} (0,45 + \bar{h}_{кр}),$$

где углы  $\theta_{рзг}^*$  и  $\theta_{рзг}$  получаются в радианах.

Для оценки остойчивости катамарана с гидродинамической разгрузкой с плоскими крыльями на конечных углах крена необходимо ввести те или иные допущения относительно действий командира корабля в части снижения скорости в условиях сильного бокового ветра и интенсивной бортовой качки. Предположим, что если осредненные по процессу бортовых колебаний углы крена  $\theta_C$  не превышают осредненного по крыльевому комплексу угла выхода  $\theta_{BK}$ , то командир не снижает скорость и коэффициент разгрузки  $K_{рзг}$  равен его проектному значению. При  $\theta_C > \theta_{BK}$  начинается снижение скорости и пропорционально квадрату скорости снижается и коэффициент разгрузки. Наконец, при  $\theta_C > \theta_{рзг}^*$  положение корабля становится опасным: ему угрожает опрокидывание. Поэтому при таких интенсивных бортовых колебаниях корабль движется малым ходом и сколько-нибудь значительные подъемные силы на крыльях не возникают. Остойчивость же обеспечивается в этом случае только за счет водоизмещающих объемов. Конкретная же зависимость коэффициента разгрузки  $K_{рзг\theta}(\theta_C)$  при  $\theta_{BK} < \theta_C < \theta_{рзг}^*$  определяется такими обстоятельствами, предсказание которых на любой стадии проектирования едва ли возможно. Поэтому логично зависимость  $K_{рзг\theta}(\theta_C)$  принять простейшей (линейной), в этом случае

$$K_{рзг\theta}(\theta_C) = K_{рзг}, \quad \theta_C \leq \theta_{BK};$$

$$K_{рзг\theta}(\theta_C) = K_{рзг} \frac{\theta_{рзг}'' - \theta_C}{\theta_{рзг}'' - \theta_{BK}}, \quad \theta_{BK} \leq \theta_C \leq \theta_{рзг}'';$$

$$K_{рзг\theta}(\theta_C) \equiv 0, \quad \theta_C \geq \theta_{рзг}''.$$

Тогда восстанавливающий момент  $M_{B0}(\theta)$  для катамарана с гидродинамической разгрузкой во всем диапазоне углов крена определится в виде

$$M_{B0}(\theta) = [1 - K_{рзг\theta}(\theta)] D l_{0F}^0[\theta, K_{рзг\theta}(\theta)] +$$

$$+ K_{рзг\theta}(\theta) D [l_{0F}(\theta) - l_{0W}(\theta)];$$

$$l_{0F}^0[\theta, K_{рзг\theta}(\theta)] = l_{0F}^0[\theta, K_{рзг\theta}(\theta)] - l_{0W}^0[\theta, K_{рзг\theta}(\theta)];$$

$$l_{0W}^0[\theta, K_{рзг\theta}(\theta)] = [z_g - z_{c0} K_{рзг\theta}^z(\theta)] \sin \theta,$$

где  $l_{0F}^0$ ,  $l_{0W}^0$  – плечи статической остойчивости формы и веса водоизмещающего объема, а зависимость  $K_{рзг\theta}(\theta)$  аналогична зависимости  $K_{рзг\theta}(\theta_C)$ .

Для определения плеч статической остойчивости формы водоизмещающего объема можно использовать те же методы, что и для катамаранов без разгрузки. Но при пользовании этими методами необходимо учитывать, что каждому углу крена отвечает своя осадка  $T_\theta(\theta) = T_0[1 - K_{\text{раз}\theta}^x(\theta)]$  и свои коэффициенты общей полноты  $\delta_\theta(\theta) = \delta_0 \bar{T}_\theta^{\frac{1}{x}-1}(\theta)$  и полноты КВЛ  $\alpha_\theta(\theta) = \alpha_0 \bar{T}_\theta^{\frac{1}{x}-1}(\theta)$ . Здесь  $\bar{T}_\theta(\theta) = T_\theta(\theta)/T_0$ , а индексом «0» обозначены величины, соответствующие отсутствию разгрузки. Выше использованы формулы параболической аппроксимации строевой по шпангоутам. При этом оказывается, что коэффициент вертикальной остроты при изменении угла крена

$$\chi_\theta = \frac{\delta_\theta(\theta)}{\alpha_\theta(\theta)} \approx \frac{\delta}{\alpha} = \chi \neq \chi_\theta(\theta).$$

Демпфирующий момент катамарана с гидродинамической разгрузкой при бортовой качке с учетом хода  $M_{\text{до}} = M_{\text{до}}(\theta_0, \dot{\theta})$ , где  $\theta_0, \dot{\theta}$  – амплитуды углов и ординаты скоростей бортовой качки, представим в следующем виде:

$$M_{\text{до}}(\theta, \dot{\theta}) = -2n_{\text{ов}}(J_x + \lambda_0)[\mu_\theta(\theta_0) + \Delta\mu_{\text{ов}1} + \Delta\mu_{\text{ов}2} + \Delta w_\theta \theta_0] \dot{\theta};$$

$$2\mu_\theta(\theta_0) \approx A + B\theta_0; \quad n_{\text{ов}} = \sqrt{\frac{K_{\text{О0}} + \delta K_{\text{О0}}}{J_x + \lambda_0}},$$

где  $J_x, \lambda_0$  – собственный и присоединенный моменты инерции масс;

$\mu_\theta(\theta_0)$  – безразмерный коэффициент демпфирования для катамарана без хода и без разгрузки;

$A, B$  – эмпирические коэффициенты, полученные путем обработки экспериментальных диаграмм [4] и приведенные в [9];

$\Delta\mu_{\text{ов}1}, \Delta\mu_{\text{ов}2}$  – поправки к коэффициенту линейного демпфирования бортовой качки на наличие хода для не имеющего разгрузки катамарана, определяемая по [9], и на наличие разгрузки и хода, связанная с силами циркуляционной природы на крыльях, соответственно;

$\Delta w_\theta$  – дополнительный коэффициент квадратичного демпфирования бортовой качки, возникающий при наличии разгрузки, не зависящий от хода и обусловленный силами отрывной природы на крыльях.

Соответственно при отсутствии хода будем иметь

$$M_{\text{до}}(\theta, \dot{\theta})_{\dot{\theta}=0} = -2n_{\text{ов}}(J_x + \lambda_0)[\mu_\theta(\theta_0) + \Delta w_\theta \theta_0] \dot{\theta}.$$

Дисперсия бортовой качки катамарана с гидродинамической разгрузкой с учетом влияния хода  $D_\theta$  определится по известным зависимостям, которые описывают воздействие белого шума на линейную динамическую систему второго порядка в виде [9]

$$D_\theta = \frac{G_\theta}{8n_{\text{ов}}^3 [\mu_{\text{00}} + \tilde{\mu}_\theta(D_\theta) + \Delta\mu_{\text{ов}1} + \Delta\mu_{\text{ов}2} + \Delta\tilde{\mu}_\theta(D_\theta)]}; \quad (1)$$

$$G_\theta = \frac{2\pi}{g^2} (\kappa_{\text{0}\Sigma}^2 + \Delta\kappa_{\text{0}\Sigma}^2) S_r^* n_{\text{ов}}^8, \quad (2)$$

где  $G_\theta$  – коэффициент интенсивности возмущающего волнового воздействия;

$n_0$  – частота собственных бортовых колебаний при отсутствии хода (и, соответственно, гидродинамической разгрузки);

$\kappa_{\text{0}\Sigma}$  – полный поправочный коэффициент к возмущающему моменту при бортовой качке для частоты набегающего волнения  $\omega = n_{\text{ов}}$ ,  $\kappa_{\text{0}\Sigma} \approx \bar{\kappa}_{\text{0}\Sigma} \left(1 + \frac{\delta K_{\text{О0}}}{K_{\text{О0}}}\right)$ , где  $\bar{\kappa}_{\text{0}\Sigma}$  отвечает отсутствию разгрузки;

$\Delta\kappa_{\text{0}\Sigma}$  – поправка к коэффициенту  $\kappa_{\text{0}\Sigma}$ , определяемая, как показано ниже;

$S_r^*$  – ордината спектральной плотности волновых ординат при частоте набегающего волнения  $\omega = n_{\text{ов}}$ ;

$\mu_{\text{00}} = A$  – коэффициент чисто линейного демпфирования не имеющего хода и разгрузки катамарана;

$\tilde{\mu}_\theta(D_\theta)$  – линейризованная добавка к коэффициенту линейного демпфирования не имеющего хода и разгрузки катамарана, отвечающая слагаемому  $B\theta_0$ ;

$\Delta\tilde{\mu}_\theta(D_\theta)$  – линейризованная добавка к коэффициенту демпфирования, возникающая при наличии разгрузки, не зависящая от хода и обусловленная силами отрывной природы на крыльях.

Очевидно, что при отсутствии хода, но при наличии разгрузки в приведенных выше формулах следует

принять  $n_{\text{ов}} = n_0 = \sqrt{\frac{K_{\text{О0}}}{J_x + \lambda_0}}$  и  $\mu_{\text{ов}1} = \mu_{\text{ов}2} = 0$ . Обозначим  $x_\theta = \sqrt{D_\theta}$ , и тогда в соответствии со способом

А. В. Герасимова [2] дисперсия  $D_\theta$  определится из неполного кубического уравнения вида [9]

$$c_1 x_\theta^3 + c_2 x_\theta^2 - c_3 = 0;$$

$$c_1 = 1,9c(B + \Delta w_\theta); \quad c_2 = A + \Delta\mu_{\text{ов}1} + \Delta\mu_{\text{ов}2}; \quad c_3 = \frac{G_\theta}{n_{\text{ов}}^3},$$

и если  $D_\theta$  измеряется в рад<sup>2</sup>, то  $c = 1/57,3$ .

Осталось найти величины  $\Delta\mu_{\text{ов}2}, \Delta\kappa_{\text{0}\Sigma}$  и  $\Delta w_\theta$ . Ограничимся рассмотрением катамарана с тонкими корпусами, у которого ширина корпуса на уровне расположения крыльев и возвышение крыльев над основной плоскостью малы по сравнению с аппликатой центра тяжести судна  $z_g$ . Вертикальную и килевую качку будем считать отсутствующей. Примем также, что катамаран расположен лагом к набегающим волнам. Тогда мгновенный угол атаки  $i$ -го крыла будем считать равным углу схода потока из-за бортовой качки и равным  $\delta_{\text{кпр}} = \frac{(\theta - \dot{\alpha})z_{\text{кпр}}}{v}$  [8], где  $\dot{\alpha}$  – ордината

скоростей частиц жидкости в волне, а  $z_{\text{кпр}} \approx \sqrt{z_g^2 + \frac{l_{\text{кпр}}^2}{16}}$ .

В этом случае из-за наличия разгрузки в уравнение бортовой качки добавляется момент

$$\Delta M_{\theta\Sigma} = \delta_{кр} \frac{\rho v^2}{2} \sum_{i=1}^l C_{Zi}^{\delta} l_{крi} b_{крi} z_{крi} = \Delta M'_{Д\theta} + \Delta M_{В3\theta};$$

$$C_{Zi}^{\delta} = \frac{5,5 \gamma_{крi}}{1 + \frac{5,5 \gamma_{крi} \zeta_{крi}}{\pi \lambda_{крi}}}; \quad \gamma_{крi} = 1 - \frac{1}{2(1 + 4\bar{h}_{крi})};$$

$$\zeta_{крi} = 2 - \frac{12\bar{h}_{крi}}{\lambda_{крi} + 12\bar{h}_{крi}},$$

где  $C_{Zi}^{\delta}$  – производная коэффициента подъемной силы на  $i$ -м крыле по углу атаки, а  $\Delta M'_{Д\theta}$  и  $\Delta M_{В3\theta}$  – дополнительные демпфирующий и возмущающий моменты, обусловленные силами циркуляционной природы на крыльях и определяемые очевидными соотношениями

$$\Delta M'_{Д\theta} = -\frac{\rho v}{2} \dot{\theta} \sum_{i=1}^l C_{Zi}^{\delta} l_{крi} b_{крi} z_{крi}^2;$$

$$\Delta M_{В3\theta} = -\frac{\rho v}{2} \dot{\alpha} \sum_{i=1}^l C_{Zi}^{\delta} l_{крi} b_{крi} z_{крi}^2.$$

При нахождении дисперсии  $D_{\theta}$  момент  $\Delta M_{Д\theta}$  учитывается через коэффициент  $\Delta \mu_{\theta v^2}$ , а момент  $\Delta M_{В3\theta}$  – через коэффициент  $\Delta \kappa_{\theta\Sigma}$ . Если учесть, что возмущающий момент катамарана  $M_{В3\theta}$  без учета поправки  $\Delta M_{В3\theta}$  есть  $M_{В3\theta} = \kappa_{\theta\Sigma} (K_{0\theta} + \delta K_{0\theta}) \alpha$ , где  $\alpha$  – ордината угла волнового склона, а величины  $\alpha = \alpha_0 \sin(n_{\theta v} t + \varepsilon_{\theta})$  и  $\dot{\alpha} = n_{\theta v} \alpha_0 \cos(n_{\theta v} t + \varepsilon_{\theta})$ , где  $\alpha_0$  есть амплитуда угла волнового склона, сдвинуты по фазе на  $\pi/2$ , то приходим к формулам (1), (2). Здесь дополнительно обозначено:  $t$  – время и  $\varepsilon_{\theta}$  – фаза возмущающего момента при бортовой качке по отношению к набегающему волнению. Тогда для положения катамарана с гидродинамической разгрузкой лагом к набегающим волнам имеем

$$\Delta \mu_{\theta v^2} \approx \frac{\rho \cdot v}{2(J_X + \lambda_{\theta}) n_{\theta v}} \sum_{i=1}^l C_{Zi}^{\delta} l_{крi} b_{крi} z_{крi}^2;$$

$$\Delta \kappa_{\theta\Sigma} \approx \frac{\rho \cdot v n_{\theta v}}{2(K_{0\theta} + \delta K_{0\theta})} \sum_{i=1}^l C_{Zi}^{\delta} l_{крi} b_{крi} z_{крi}^2.$$

На косых курсовых углах зависимость для возмущающего момента и, соответственно, для коэффициента  $\Delta \kappa_{\theta\Sigma}$  получается более сложной. Однако этот вопрос требует отдельного рассмотрения.

Кроме силы циркуляционной природы, на крыле возникает и сила отрывной природы, что приводит к появлению в уравнениях бортовой качки дополнительного демпфирующего момента  $M''_{Д\theta}$ , который пропорционален  $\dot{\theta}|\dot{\theta}|$  и при нахождении дисперсии  $D_{\theta}$  учитывается через коэффициент квадратичного демпфирования  $\Delta W_{\theta}$ .

Момент  $M''_{Д\theta}$  определяется выражением

$$M''_{Д\theta} = -C_O \frac{\rho}{2} \dot{\theta} |\dot{\theta}| \sum_{i=1}^l l_{крi} b_{крi} z_{крi}^2 = -\Delta W_{\theta} \dot{\theta} |\dot{\theta}|;$$

$$\Delta W_{\theta} = C_O \frac{\rho}{2} \sum_{i=1}^l l_{крi} b_{крi} z_{крi}^2; \quad C_O = C_O^{(0)} K_{НС};$$

$$C_O^{(0)} = \frac{2\pi}{4 + \pi},$$

где  $C_O$  – коэффициент отрывного демпфирования для крыла;

$C_O^{(0)}$  – коэффициент сопротивления пластины при стационарном струйном обтекании, определенный по известной формуле Рэлея;

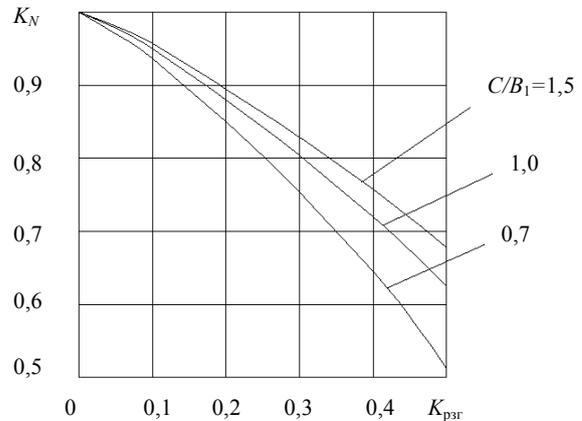
$K_{НС} \approx 1,8 \dots 2,0$  – поправка на нестационарность обтекания.

Тогда, очевидно, будет  $\Delta W_{\theta} = \frac{W_{\theta}}{J_X + \lambda_{\theta}}$ .

Некоторые результаты расчетов по приведенным выше зависимостям приведены на рис. 1

и 2. Обозначим  $\frac{n_{\theta v}}{n_0} \approx \sqrt{1 + \frac{\delta K_{0\theta}}{K_{0\theta}}} = K_N$ , причем

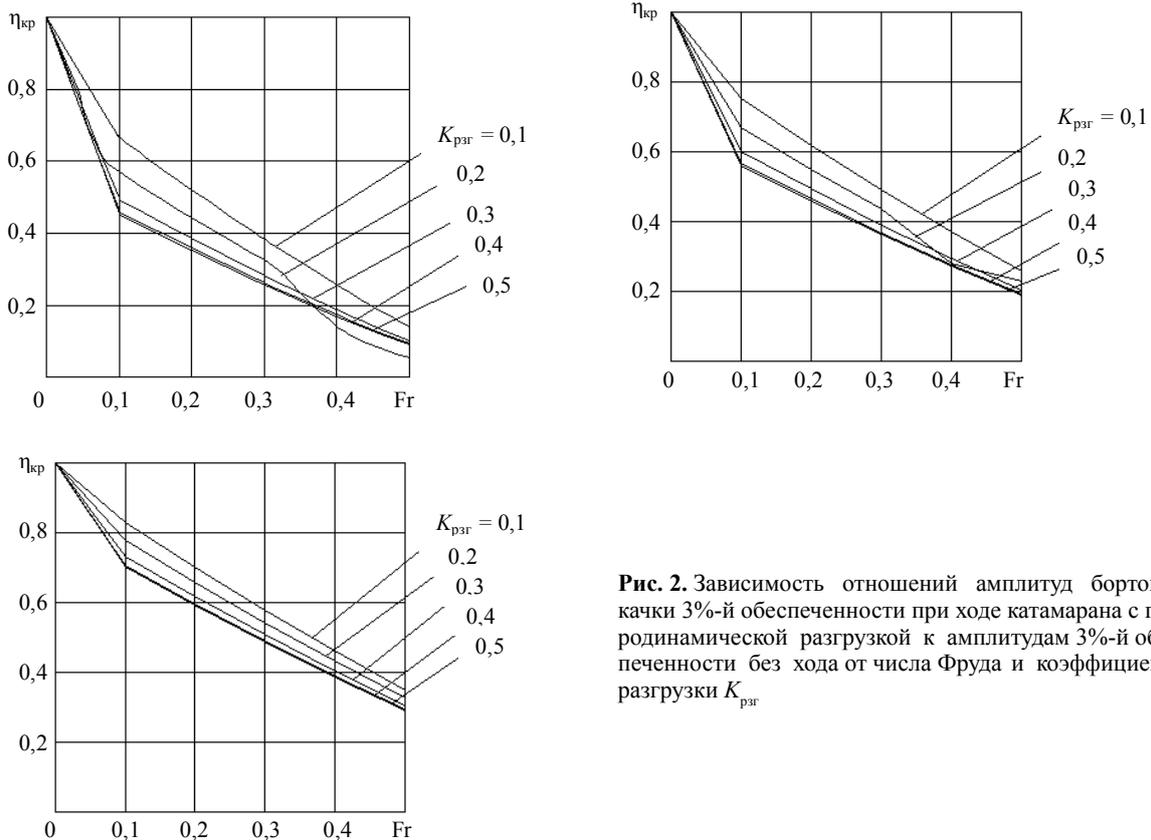
$K_N = K_N(Fr, K_{рзг}, C/B_1)$ . Зависимость вида  $K_N = K_N(K_{рзг})$ , отвечающая  $Fr = 0,3$  и трем значениям  $C/B_1$ , приведена на рис. 1. Видно, что  $\delta K_{0\theta} < 0$  и величина  $K_N$  снижается по мере роста степени разгрузки.



**Рис. 1.** Зависимость отношения частот собственных бортовых колебаний при гидродинамической разгрузке для числа Фруда, равного 0,3, к частотам колебаний при отсутствии хода катамарана от коэффициента разгрузки  $K_{рзг}$  и при относительных горизонтальных клиренсах  $C/B_1 = 0,7; 1,0; 1,5$

Обозначим далее  $\frac{\theta_{3v}}{\theta_3} = \eta_{кр}$ , где  $\theta_{3v}$ ,  $\theta_3$  – амплитуды

бортовой качки 3%-й обеспеченности для имеющего ход катамарана с гидродинамической разгрузкой и при отсутствии хода соответственно. Очевидно, что  $\eta_{кр} = \eta_{кр}(Fr, K_{рзг}, C/B_1)$ , причем по результатам расчетов зависимость вида  $\eta_{кр} = \eta_{кр}(C/B_1)$  оказалась весьма слабой. Зависимости вида  $\eta_{кр} = \eta_{кр}(Fr)$  при разных значениях коэффициента разгрузки приведены на рис. 2.



**Рис. 2.** Зависимость отношений амплитуд бортовой качки 3%-й обеспеченности при ходе катамарана с гидродинамической разгрузкой к амплитудам 3%-й обеспеченности без хода от числа Фруда и коэффициента разгрузки  $K_{рзг}$

### ВЫВОДЫ

1. Полученные приближенные зависимости позволяют оценить характеристики начальной остойчивости и бортовой качки катамарана с гидродинамической разгрузкой, связав эти величины со скоростью судна и с коэффициентом разгрузки.

2. Начальная остойчивость катамарана при наличии хода снижается, причем тем в большей степени, чем больше разгрузка. Соответственно снижается и частота собственных свободных бортовых колебаний.

3. Амплитуды бортовой качки катамарана с ростом скорости снижаются, причем тем в большей степени, чем больше коэффициент разгрузки. Это сни-

жение связано с ростом демпфирования бортовой качки.

4. При малых коэффициентах разгрузки (или при отсутствии разгрузки) дополнительное ходовое демпфирование возникает только на корпусах катамарана как на крыльях предельно малого удлинения. При гидродинамической разгрузке из-за наличия подводных крыльев ходовое демпфирование возрастает, но это сопровождается и некоторым ростом возмущающего момента. По результатам выполненных расчетов, влияние роста демпфирования на крыльях получается преобладающим по сравнению со связанным с крыльями дополнительным возмущением. Поэтому с ростом коэффициента разгрузки амплитуды бортовой качки снижаются.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Богданов, А. И.** Критерий погоды для морских судов с динамическими принципами поддержания [Текст] / А. И. Богданов, Л. Н. Стреляев // Труды ЦНИИ морского флота. – Л. : Транспорт, 1980. – Вып. 258.
- [2] **Герасимов, А. В.** Статистическая линеаризация сопротивления бортовой качке [Текст] / А. В. Герасимов // Судостроение. – 1971. – № 4. – С. 5–7.
- [3] **Гошев, Г. А.** Поперечная остойчивость судов на подводных крыльях [Текст] / Г. А. Гошев // Труды ЛИВТ. – Л. : Речной транспорт, 1960. – Вып. 1.
- [4] **Кобернюк, Г. В.** Приближенное определение коэффициента демпфирования бортовой качки для катамаранов [Текст] / Г. В. Кобернюк // Вопросы судостроения. Сер. Проектирование судов. – Л. : ЦНИИ «Румб», 1981. – Вып. 27. – С. 111–114.
- [5] **Козырев, В. С.** О критериях остойчивости морских судов с малопогруженными крыльями [Текст] / В. С. Козырев // Науч.-техн. сборник Регистра СССР. – Л. : Транспорт, 1971. – Вып. 1.

- [6] **Ляховицкий А. Г.** Проектирование скоростных катамаранов с подводными крыльями [Текст] / А. Г. Ляховицкий, Э. Б. Сахновский, Б. М. Сахновский // Судостроение. – 2005. – № 2. – С. 9–15.
- [7] Правила классификации и постройки высокоскоростных судов. – СПб. : Российский Морской Регистр судоходства, 2008.
- [8] **Семенов-Тянь-Шанский, В. В.** Качка корабля [Текст] / В. В. Семенов-Тянь-Шанский, С. Н. Благовещенский, А. Н. Холодилин. – Л. : Судостроение, 1969. – 392 с.
- [9] **Соломенцев, О. И.** Влияние хода на бортовую качку катамарана [Текст] / О. И. Соломенцев, Е. А. Кудинова // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2012. – № 2. – С. 11–16.
- [10] **Соломенцев, О. И.** Применение частных целевых функций при исследовании концепции катамаранов с гидродинамической разгрузкой [Электронный ресурс] / О. И. Соломенцев, А. С. Книш // Вісник НУК. – Миколаїв : НУК, 2013. – № 1. – Режим доступа: <http://ev.nuos.edu.ua>.
- [11] **Царев, Б. А.** Развитие форм уравнения остойчивости и пути его применения при проектировании высокоскоростных судов [Текст] / Б. А. Царев // Сб. НТО им. акад. А. Н. Крылова. – Л. : Судостроение, 1972. – Вып. 174. – С. 25–47.
- [12] **Solomyentsev, O. I.** Rolling and Dynamic Stability of the High – Speed Ships [Text] / O. I. Solomyentsev // International Conference of Fast Ships: Malek Ashtar University of Technology. – Shiraz, 2005. – 20 p.

---

© О. И. Соломенцев, А. С. Книш

Надійшла до редколегії 20.06.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК

д-р техн. наук, проф. В. О. Некрасов