

УДК 629.12: 532

А.Б. Ваганов, И.Д. Краснокутский, П.В. Гуров
АНАЛИЗ ПОПЕРЕЧНОЙ ОСТОЙЧИВОСТИ СУДНА
ПРИ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ПО НАПРАВЛЕНИЮ
И БОЛЬШИХ УГЛАХ НАКЛОНЕНИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предложена математическая модель статики судна, охарактеризованная системой координат и параметрами посадки. Модель предназначена для оценки остойчивости водоизмещающего судна при сложном внешнем нагружении. Предложенная методика значительно увеличивает число расчетных ситуаций, в которых следует выполнять анализ остойчивости и управляемости судов. Сделан вывод, что при больших углах дифферента имеют место существенные изменения поперечной остойчивости судна.

Ключевые слова: водоизмещающее судно, плавучесть и остойчивость судна, динамика судна, качка, управляемость, ветер и волнение в море.

Остойчивость судна признается достаточной, если в регламентированных Правилами Регистра условиях плавания действие возмущающих сил от волн, ветра и других внешних сил не может привести к катастрофическим последствиям вследствие заливания и опрокидывания судна. Критерий погоды учитывает одновременное воздействие на судно в штормовую погоду шквалистого ветра и волн, вызывающих бортовую качку. Динамический кренящий момент создается шквалом ветра заданной силы. Судно без хода расположено лагом к ветру и к волнам. Случай резонансной бортовой качки полагается наиболее опасным, вызывающим наибольшие амплитуды угла крена. Восстанавливающий момент при этом определен при равнообъемных наклонениях корпуса в условиях тихой воды и представлен диаграммой статической остойчивости, рассчитанной для начального прямого положения плавания. Однако Правила Регистра не исключают исследований в отношении остойчивости в других расчетных ситуациях.

В эксплуатационных расчетных сценариях применяются уравнения равновесия свободно плавающего судна в условиях тихой воды и гидростатические характеристики корпуса. Методика решений уравнений равновесия судна также предполагает существование определенного начального состояния равновесного плавания, по отношению к которому происходят изменения нагрузки и параметров посадки. Определенные допущения позволяют отказаться от необходимости решения системы дифференциальных уравнений движения корпуса, и вывести приближенные алгебраические формулы для определения посадки в конечном результате и применять в решении гидростатические характеристики корпуса в графическом изображении. Главной вычислительной задачей является определение геометрических характеристик погруженного в воду объема корпуса и действующей ватерлинии при произвольных параметрах посадки. Сложное пространственное движение корпуса изменяет диаграмму остойчивости через изменение величины и формы погруженного объема корпуса. Восстанавливающий момент является функцией углов крена и дифферента $M_B(\theta, \psi)$.

Хотя статический подход не позволяет оценить поперечную остойчивость судна в случаях интенсивной пространственной качки на продольном и косом волнении, изменения диаграммы статической остойчивости в поле углов наклона (θ, ψ) представляют существенный научный и инженерный интерес.

Анализ произошедших в последние годы аварий судов, связанных с потерей остойчивости, показывает на возникновение сложных ситуаций как по характеру воздействия на судно внешних сил, так и усугубляющих ситуацию внутренних динамически происходящих изменений остойчивости. Ряд случаев опрокидывания судов характеризуются наличием зна-

чительного угла дифферента непосредственно перед опрокидыванием. Нам представляется, что учет влияния начального угла дифферента на характеристики поперечной остойчивости судна (на параметры диаграммы поперечной остойчивости), позволит более достоверно указать на возможную причину его опрокидывания.

Возможные сценарии исследования аварийных ситуаций для судов различного назначения:

- затопление больших отсеков;
- прием и смещение больших незакрепленных, сыпучих и других, склонных к смещению грузов (грузовые, технические, рыболовные, паромы и т.п.);
- прием больших подвешенных грузов (крановые суда);
- комбинация выше названных аварийных ситуаций.

Расширение вычислительных возможностей программ, применяемых для расчета диаграмм остойчивости судна при произвольной начальной посадке, заставляет дополнительно рассмотреть основные теоретические положения статики корабля.

Системы координат и уравнения равновесия в задачах статики корабля

Методически решение задач статики корабля основывается на составлении системы уравнений равновесия, определении сил, действующих на корпус, решении уравнений и анализе полученных результатов. В подавляющем числе решаемых задач статики и динамики судна конечным результатом является положение корпуса, определяемое в параметрах неподвижной системы координат. В то же время уравнения плавучести и остойчивости имеют наиболее простой вид и многие категории внешних сил определяются в связанной с корпусом системе координат.

Для определения параметров посадки корабля и их изменения в статике корабля применяются системы координат [1-3], показанные на рис. 1:

- 1) Ox, Y, Z – связанная с корпусом геометрическая система координат, предназначенная для описания геометрии поверхности корпуса;
- 2) Ox, Y_θ, Z_θ – вторая полусвязанная с корпусом геометрическая система координат, которая получается путем поворота осей связанной геометрической системы координат вокруг оси Ox на угол крена и предназначена для вычисления геометрических характеристик погруженного объема корпуса при произвольной посадке [2];
- 3) $O\xi, \eta, \zeta$ – первая полусвязанная система координат должна быть использована для вычисления плеч остойчивости и плеч сил тяжести принимаемых на судно грузов. Выполняет также функцию неподвижной системы координат для составления уравнений равновесия.

Из большого многообразия систем Эйлеровых углов применяется система, образуемая тремя последовательными поворотами вокруг осей трех разных номеров: χ – курс; ψ – дифферент; θ – крен. Учтем, что горизонтальные перемещения и поворот корпуса по курсу не приводит к изменению величины и формы погруженного объема. Примем эти параметры равным нулю при определении гидростатических сил поддержания. Положительным будем полагать дифферент на нос, а крен на правый борт.

При произвольной посадке корабля корректными будут параметры посадки:

- аппликата точки пересечения осью $O\xi$ поверхности спокойной воды T , называемая осадкой;
- угол между осью Ox и следом ватерлинии на плоскости XOZ_θ , называемым углом дифферента;
- угол между осью OY и следом ватерлинии на плоскости мидель-шпангоута, называемым углом крена.

Переход от связанной системы координат ко второй, полусвязанной, осуществляется по формулам:

$$\begin{aligned} y_{\theta} &= y \cdot \cos \theta + z \cdot \sin \theta; \\ z_{\theta} &= z \cos \theta - y \sin \theta. \end{aligned} \quad (1)$$

Обратный переход осуществляется так:

$$\begin{aligned} y &= y_{\theta} \cdot \cos \theta - z_{\theta} \cdot \sin \theta; \\ z &= z_{\theta} \cdot \cos \theta + y_{\theta} \cdot \sin \theta. \end{aligned} \quad (2)$$

Необходим переход от связанной системы координат к первой полусвязанной системе. Он осуществляется по формулам, которые будут освещены ниже:

$$\begin{aligned} \xi &= x \cos \psi + y \sin \theta \cdot \sin \psi + \cos \theta \cdot \sin \psi; \\ \eta &= y \cdot \cos \theta + z \cdot \sin \theta; \\ \zeta &= -x \cdot \sin \theta - y \cdot \sin \theta \cdot \cos \psi + z \cdot \cos \theta \cdot \cos \psi. \end{aligned} \quad (3)$$

Равновесие судна при действии на него силы тяжести D и силы плавучести $\rho g V$ (рис. 1) определяется следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \rho g V - D &= 0; \\ D \xi_G - \rho g V \zeta_C &= 0; \\ D \eta_G - \rho g V \eta_C &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

в которой ξ_G, η_G – координаты центра тяжести судна, ξ_C, η_C – координаты центра величины. Определение этих величин осуществляется по уравнениям (3) в зависимости от координат $X_C, Y_C, Z_C, X_G, Y_G, Z_G$ и параметров посадки θ, ψ, T .

При равнообъемных наклонениях корпуса, не отвечающих уравнениям равновесия по крену и дифференту, образуются поперечный и продольный восстанавливающие моменты:

$$\begin{aligned} M_B^{\theta} &= \rho \cdot g \cdot V \cdot l^{\theta}; \\ M_B^{\psi} &= \rho \cdot g \cdot V \cdot l^{\psi}. \end{aligned} \quad (5)$$

Плечи поперечной и продольной статической остойчивости могут быть определены так:

$$\begin{aligned} l^{\theta} &= \eta_C - \eta_G; \\ l^{\psi} &= \xi_C - \xi_G. \end{aligned} \quad (6)$$

Координаты центра тяжести и центра величины определяются по формулам (3).

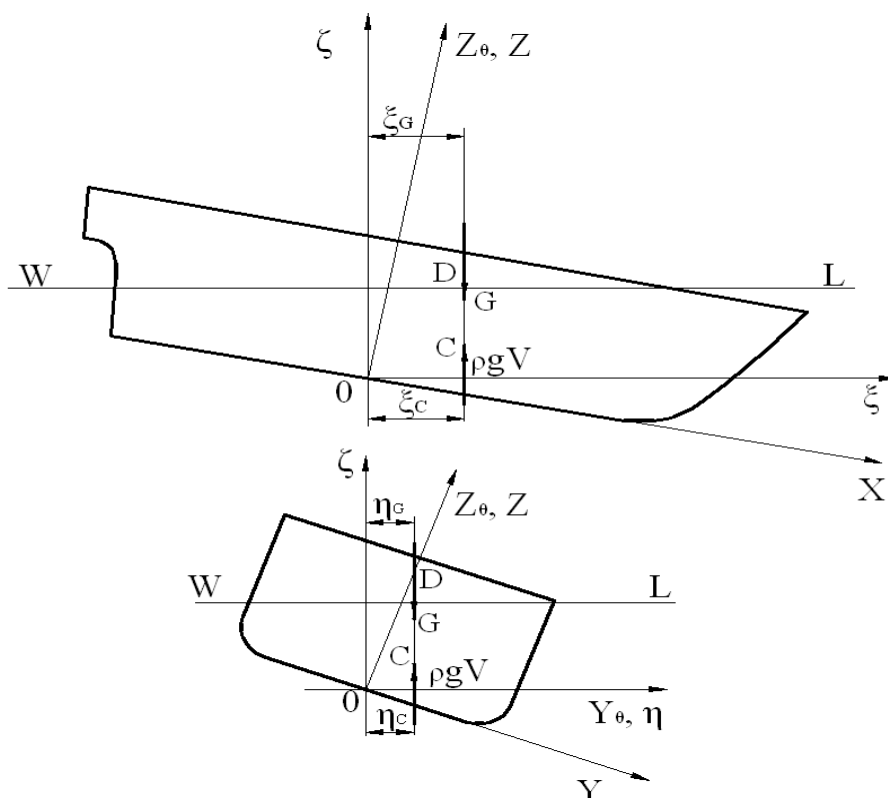


Рис. 1. Системы координат и схема сил, действующих на корпус

Определение гидростатических характеристик погруженного в воду объема корпуса судна

Существует ряд методик расчета гидростатических характеристик корпуса и программ для ЭВМ [1,4]. Однако, для усложненных задач статики и динамики судна, метод должен учитывать пять требований, которые приведены ниже.

1. Непрерывно меняющиеся параметры посадки (углы крена, дифферента и осадка) могут принимать произвольные, большие и знакопеременные значения.
2. Корпус судна может иметь сложную геометрическую форму обводов (катамараны, суда с тоннельными обводами, вырезы и надделки в корпусе и т. п.)
3. Расчет должен быть выделен в отдельный модуль, к которому программа может обратиться с текущими значениями параметров посадки и получить только необходимую информацию для решения уравнений движения силы и моментов плавучести.
4. Трудоемкость вычислений должна быть приемлемой. Поэтому степень подробности описания теоретического корпуса должна быть умеренной и соответствовать сетке теоретического чертежа.
5. Подынтегральная функция представлена в виде массивов координат точек кривой $y = f(x)$ (т.е. аналитическое выражение для функции отсутствует). Подынтегральная функция и ее производные могут иметь резко меняющийся характер, вплоть до скачкообразного (слом борта и скулы, реданы и т.п.).

Этим требованиям удовлетворяет программа для ЭВМ [1].

Из геометрического смысла определенного интеграла и его свойства аддитивности он может быть представлен в таком виде:

$$S = \int_{x_k}^{x_H} y dx = \sum_{i=1}^{N-1} \Delta S_i, \quad (7)$$

где ΔS_i – элемент площади, ограниченной под интегральной функцией $y = f(x)$ на шаге Δx_i интервала интегрирования.

Таким образом, задача распадается на три этапа:

- 1) разбивка интервала интегрирования на малые элементы;
- 2) расчет характеристик малого элемента ΔS ;
- 3) суммирование характеристик элементов.

Расчет элемента, вследствие его малых размеров, можно упростить, а процедуру суммирования легко осуществить в виде циклов программы. Наиболее простым для расчета является элемент площади в форме трапеции (рис. 2).

Используя метод трапеций, обвод действительной кривой $y = f(x)$ заменим прямой линией, проведенной через вершины ординат В и С.

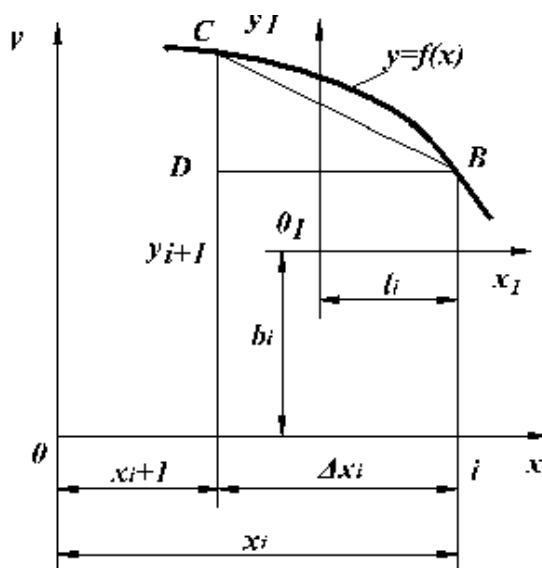


Рис. 2. Элемент площади ΔS_i

Для трапеции ABCDE геометрические характеристики площади ΔS_i определяются по формулам, вытекающим из представления элемента в виде суммы прямоугольника ABDE и прямоугольного треугольника ВСД.

Площадь трапеции равна:

$$\Delta S = \frac{1}{2} \cdot (y_i + y_{i+1}) \cdot \Delta x_i \quad (8)$$

Координаты центра тяжести площади трапеции равны:

$$b_i = \frac{1}{3} \cdot \frac{(y_i^2 + y_i y_{i+1} + y_{i+1}^2)}{(y_i + y_{i+1})}, \quad (9)$$

$$l_i = \frac{1}{3} \cdot \Delta x_i \cdot \frac{(y_i + 2y_{i+1})}{(y_i + y_{i+1})}.$$

Статические моменты площади трапеции относительно осей x и y равны:

$$m_{x_i} = \Delta S \cdot b_i;$$

$$m_{y_i} = \Delta S \cdot (x_i - l_i). \quad (10)$$

Моменты инерции площади трапеции относительно осей X и Y равны:

$$\begin{aligned}
 i_{x_i} &= \frac{1}{3} \cdot y_i^3 \cdot \Delta x_i + \frac{1}{36} \cdot (y_{i+1} - y_i)^3 \cdot \Delta x_i + \frac{1}{18} \cdot (y_{i+1} - y_i) \cdot (y_{i+1} + 2y_i)^2 \cdot \Delta x_i; \\
 i_{y_i} &= \frac{1}{12} \cdot y_i \cdot \Delta x_i^3 + y_i \cdot (x_i - 0,5 \cdot \Delta x_i)^2 \cdot \Delta x_i + \frac{1}{36} \cdot (y_{i+1} - y_i) \cdot \Delta x_i^3 + \\
 &+ \frac{1}{12} \cdot (y_{i+1} - y_i) \cdot \left(x_i - \frac{2}{3} \Delta x_i\right)^2 \cdot \Delta x_i.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Следует отметить, что значение имеет порядок нумерации ординат. Здесь принято правило нумерации ординат в отрицательном направлении оси абсцисс (рис. 2). В том случае, когда нумерация ординат осуществляется в положительном направлении оси абсцисс, в выражениях (7) следует заменить формулы:

$$\Delta x = x_{i+1} - x_i. \tag{12}$$

Остальные формулы не зависят от порядка нумерации ординат.

Вычислив при помощи зависимостей (8-11) характеристики отдельных трапеций, путем суммирования определим соответствующие характеристики всей площади:

$$\begin{aligned}
 S &= \sum_{i=1}^{N-1} \Delta S_i; M_X = \sum_{i=1}^{N-1} m_x; M_Y = \sum_{i=1}^{N-1} m_y; \\
 I_X &= \sum_{i=1}^{N-1} i_x; I_Y = \sum_{i=1}^{N-1} i_y; x_f = \frac{M_Y}{S}.
 \end{aligned} \tag{13}$$

Взяв в качестве подынтегральной функции обвод шпангоута $y = f(z)$, по аналогичному алгоритму можно вычислить площадь и статические моменты площади шпангоута. Если данный расчет выполнить для ряда шпангоутов на интервале (x_K, x_H) , то можно построить строевую по шпангоутам $\omega(x)$. По аналогичному алгоритму можно вычислить характеристики плавучести корабля, взяв в качестве подынтегральной функцию. Данный алгоритм является универсальным для расчетов по статике корабля. Исходной информацией являются массивы координат продольно-горизонтальных сечений корпуса (ватерлиний) и поперечно-вертикальных сечений (шпангоутов) теоретического корпуса. Погрешность метода определяется площадью сегмента, заключенного между кривой $y = f(x)$ и прямой ВС. Погрешность снижается при уменьшении шага Δx и при уменьшении кривизны кривой.

Рассмотренные выше алгоритмы расчета геометрических характеристик поперечных и продольных сечений корпуса судна пригодны лишь в случае простого корпуса, поверхность которого $y = f(x, z)$ является монотонной функцией координат.

Довольно часто у судов это условие нарушается. Это наблюдается у судов, имеющих тоннели для гребных винтов, у судов с различными вырезами или нишами для размещения устройств и оборудования, а также у многокорпусных судов.

Существует несколько способов решения данной проблемы. Рассмотрим метод разбиения объема геометрически сложного корпуса на несколько простых объемов, который позволяет использовать наработанные вычислительные алгоритмы. Геометрические характеристики сложного корпуса будут определяться путем суммирования соответствующих характеристик простых объемов. Введем условное разграничение объемов на «непроницаемые» и «проницаемые» для воды и установим их численный признак. Непроницаемому объему установим признак $k_v = +1$, а проницаемому объему признак $k_v = -1$. Физический смысл коэффициента k_v состоит в том, что его модуль представляет так называемый «коэффициент проницаемости», используемый в теории непотопляемости корабля при затоплении

отсеков заборной водой через пробойну в обшивке. Принцип разбиения сложного корпуса на простые объемы заключается в следующем: действующая ватерлиния должна пересекать обвод шпангоута только в одной точке на правом борту и в одной точке на левом борту.

Тогда геометрические характеристики погруженного объема сложного корпуса могут определяться по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned} S &= \sum_{i=1}^N k_V \cdot S_i; \\ V &= \sum_{i=1}^N k_V \cdot V_i \end{aligned} \quad (14)$$

Таким образом, проблема вычисления геометрических характеристик погруженного объема сложного корпуса состоит в правильном разбиении корпуса на простые объемы, в снятии ординат и организации циклов расчета по объемам.

В тех случаях, когда поверхность теоретического корпуса задана в виде теоретического чертежа, информация о поверхности в цифровом виде массивов координат x_i, y_{ij}, z_{ij} точек должна готовиться заранее. Для этого необходимо построение чертежа «Расчетный корпус». В состав расчетного корпуса нужно включить все теоретические шпангоуты, а также в оконечностях и в местах резкого изменения формы поверхности (бак, ют, реданы) пробить дополнительные расчетные шпангоуты. Более точно это определяется по конкретному теоретическому чертежу.

Расчет характеристик объема погруженной части корпуса и действующей ватерлинии при произвольной посадке судна является общим блоком алгоритмов решения задач плавучести, остойчивости, непотопляемости и наиболее сложной и трудоемкой части этих задач. Он связан с подготовкой, преобразованием и хранением большого объема информации о форме и характеристиках погруженного объема корпуса судна.

Решить задачу определения характеристик объема погруженной в воду части корпуса поэтапно можно и с помощью алгоритмов, рассмотренных выше. Но наибольший эффект дает только автоматизированный алгоритм, объединяющий в себе все промежуточные этапы расчета и исключая графические построения для хранения, преобразования и получения информации.

Объемное водоизмещение определяется по формулам:

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2} \sum_{i+1}^N (\omega_i + \omega_{i+1}) \Delta x_i; \\ N &= NSP - 1; \\ \Delta x_i &= x_i - x_{i+1}. \end{aligned} \quad (15)$$

Статические моменты объема определяются по формулам:

$$\begin{aligned} M_{YZ_0} &= \frac{1}{2} \sum_{i+1}^N \left[(\omega_i + \omega_{i+1}) \cdot x_i - \frac{1}{3} (\omega_i + 2\omega_{i+1}) \cdot \Delta x_i \right] \cdot \Delta x_i; \\ M_{XZ_0} &= \frac{1}{2} \sum_{i+1}^N (B_{\theta_i} + B_{\theta_{i+1}}) \cdot \Delta x_i; \\ M_{XY_0} &= \frac{1}{2} \sum_{i+1}^N (C_{\theta_i} + C_{\theta_{i+1}}) \cdot \Delta x_i. \end{aligned} \quad (16)$$

Статические моменты площади шпангоута:

$$\begin{aligned}\Delta\omega &= \frac{1}{2}(y_{\theta j} + y_{\theta j+1}) \cdot (z_{\theta j+1} - z_{\theta j}); \\ \Delta B_{\theta} &= \frac{1}{3}\Delta\omega \frac{(y_{\theta j}^2 + y_{\theta j+1} + y_{\theta j+1}^2)}{(y_{\theta j} + y_{\theta j+1})}; \\ \Delta C &= \Delta\omega \left[z_{\theta j+1} - \frac{1}{3} \frac{(2y_{\theta j} + y_{\theta j+1})}{(y_{\theta j} + y_{\theta j+1})} \cdot (z_{\theta j+1} - z_{\theta j}) \right]; \\ \omega_i &= \sum_{j+1}^M \Delta\omega_j; B_{\theta} = \sum_{j+1}^M \Delta B_{\theta j}; \\ C_{\theta} &= \sum_{j+1}^M \Delta C_{\theta j}; M = 2NBL - 1.\end{aligned}\quad (17)$$

Координаты центра величины во второй полу связанной системе равны:

$$\begin{aligned}x_{C\theta} &= \frac{M_{YZ\theta}}{V}; \\ y_{C\theta} &= \frac{M_{XZ\theta}}{V}; \\ z_{C\theta} &= \frac{M_{XY\theta}}{V}.\end{aligned}\quad (18)$$

Площадь действующей ватерлинии

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i+1}^N [(y_{\theta i} - y_{\theta i}) + (y_{\theta i+1} - y_{\theta i+1})] \Delta x_i; \quad (19)$$

Статические моменты площади ватерлинии:

$$\begin{aligned}M_{X\theta} &= \frac{1}{6} \sum_{i+1}^N (y_{\theta i}^2 - y_{\theta i}^2 + y_{\theta i+1}^2 - y_{\theta i+1}^2 + y_{\theta i} \cdot y_{\theta i+1} - y_{\theta i} \cdot y_{\theta i+1}) \Delta x_i; \\ M_{Y\theta} &= \frac{1}{2} \sum_{i+1}^N \left\{ [(y_{\theta i} - y_{\theta i}) + (y_{\theta i+1} - y_{\theta i+1})] x_i - \frac{1}{3} [(y_{\theta i} - y_{\theta i}) + 2(y_{\theta i+1} - y_{\theta i+1})] \Delta x_i \right\} \Delta x_i;\end{aligned}\quad (20)$$

Координаты центра тяжести площади ватерлинии:

$$x_f = \frac{M_{Y\theta}}{S}; \quad y_f = \frac{M_{X\theta}}{S}. \quad (21)$$

Моменты инерции площади ватерлинии:

$$\begin{aligned}J_{f\theta} &= \frac{1}{3} \sum_{i+1}^N \left\{ (y_{\theta i}^3 - y_{\theta i}^3) \cdot \Delta x_i + \frac{1}{12} [(y_{\theta i+1} - y_{\theta i})^3 + (y_{\theta i+1} - y_{\theta i})^3] \cdot \Delta x_i + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{6} [(y_{\theta i+1} - y_{\theta i}) \cdot (y_{\theta i+1} + 2y_{\theta i})^2 - (y_{\theta i+1} - y_{\theta i}) \cdot (y_{\theta i+1} + 2y_{\theta i})^2] \cdot \Delta x_i \right\} \Delta x_i; \\ J_{y\theta} &= \frac{1}{3} \sum_{i+1}^N \left\{ \frac{1}{12} (y_{\theta i} - y_{\theta i}) \Delta x_i^3 + (y_{\theta i} - y_{\theta i}) \left(x_i - \frac{1}{2} \Delta x_i \right)^2 \Delta x_i + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{36} [(y_{\theta i+1} - y_{\theta i}) - (y_{\theta i+1} - y_{\theta i})] \Delta x_i^3 - \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} [(y_{\theta i+1} - y_{\theta i}) - (y_{\theta i+1} - y_{\theta i})] \left(x_i - \frac{2}{3} \Delta x_i \right)^2 \Delta x_i \right\};\end{aligned}\quad (22)$$

$$J_{Ox} = J_{x\theta} - y_f^2 \cdot S;$$

$$J_{Of} = J_{y\theta} - x_f^2 \cdot S.$$

Метацентрические радиусы:

$$r = J_{Ox} / V ; R = J_{Oz} / V . \quad (23)$$

Координаты центра величины в связанной с корпусом системе координат:

$$\begin{aligned} x_c &= x_{c\theta}; \\ y_c &= y_{c\theta} \cos \theta - z_{c\theta} \sin \theta; \\ z_c &= z_{c\theta} \cos \theta - y_{c\theta} \sin \theta. \end{aligned} \quad (24)$$

Блок-схема алгоритма решения системы дифференциальных уравнений приведена нами в работе [5].

Для проведения исследований выбран вариант корпуса по типу буксирного судна. Главные размерения вариантов корпусов приведены в табл. 1. Расчетный корпус первого из вариантов показан на рис. 3.

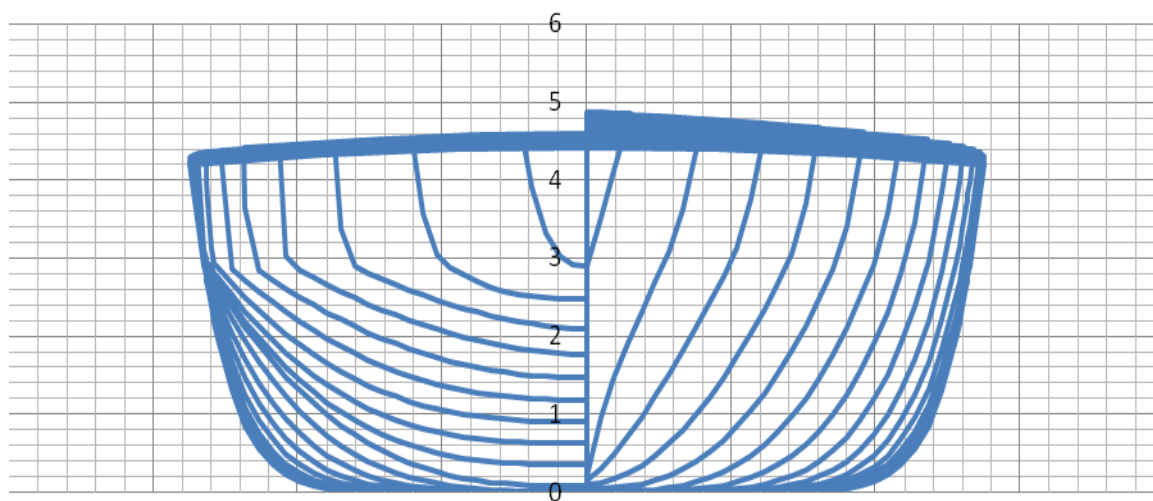


Рис. 3. Расчетный корпус судна

Таблица 1.
Главные размерения корпуса

Наименование	Судно, пример № 1
Длина по КВЛ, L , м	51,4
Ширина по КВЛ, B , м	10,6
Осадка, T , м	2,90
Высота борта, H , м	4,20
Абсцисса центра тяжести X_G , м	0,95
Апplikата центра тяжести Z_G , м	3,29
Коэфф-т общей полноты, δ	0,675
Коэфф-т площади по КВЛ, α	0,820
Коэфф-т площади мидель-шпангоута, β	0,915
Высокие бак и ют (надстройки)	нет

Гидростатические характеристики корпуса, рассчитанные по программе [5] приведены в таблице 2. и диаграммы поперечной остойчивости показаны на рис. 4.

Таблица 2.
Гидростатические характеристики корпуса судов при прямой посадке

Наименование	V, м ³	X _с , м	Z _с , м	S, м ²	X _г , м	Z _г , м	Z _М , м
Судно № 1,2,3	1065	0,95	1,61	430	-0,704	5,24	76,3

Диаграммы поперечной остойчивости, рассчитанные по программе [4], показаны на рис. 4.

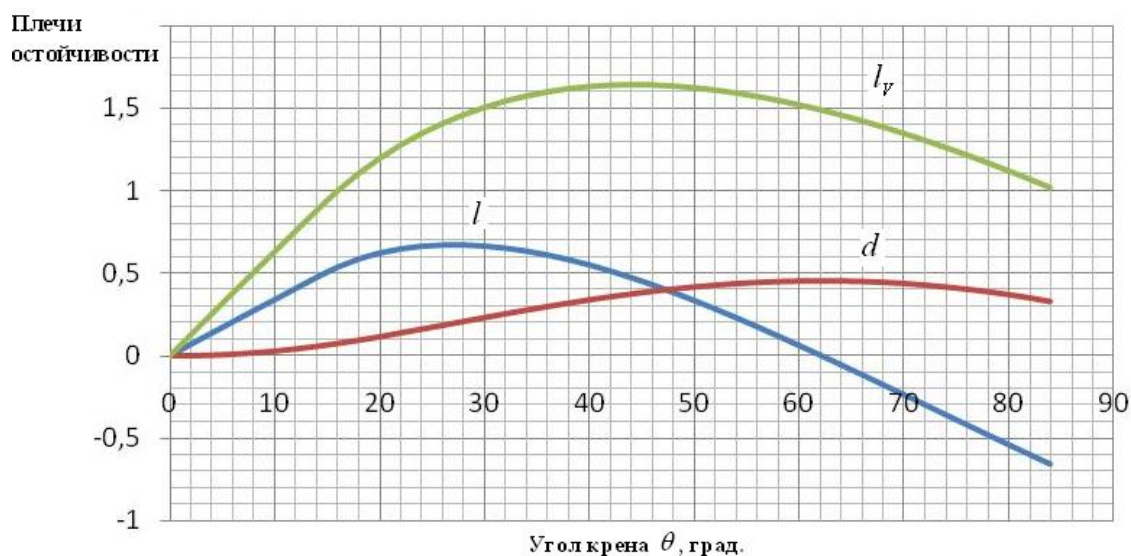


Рис. 4. Диаграммы остойчивости при начально прямой посадке ($X_G = 0,95$ м)

Вычислительный сценарий исследования статической остойчивости составлен как продольное смещение большого груза для получения начального угла дифферента и последующей процедуры поперечных наклонов корпуса. Действие дифференцирующего момента выражено путем задания измененной абсциссы центра тяжести X_G . Величина начального угла дифферента соответствует равносному плаванию судна при заданном водоизмещении и заданных координатах центра тяжести. Наклонения судна являются равнообъемными.

По программе [5] нами выполнен расчет диаграммы статической поперечной остойчивости этого судна при наличии начального угла дифферента. Технология расчета диаграммы остойчивости по этой программе предусматривает задание водоизмещения, координат центра тяжести, начального нулевого угла крена, малого шага наклона по крену, итерационные процедуры решения уравнений равновесия корпуса в отношении осадки и угла дифферента. В начальный момент кренования судна ($\theta_0 = 0$ гр.) после выполнения процедур удифферентовки с заданной точностью фиксируется начальный угол дифферента ψ_0 . В последующем корпусе пошаговым способом задаются углы крена, при которых определяются значения плеч диаграммы поперечной остойчивости, осадка и текущие значения угла дифферента.

На рис. 5-9 приведены плечи статической поперечной остойчивости и соответствующий угол дифферента при фиксированных значениях X_G .

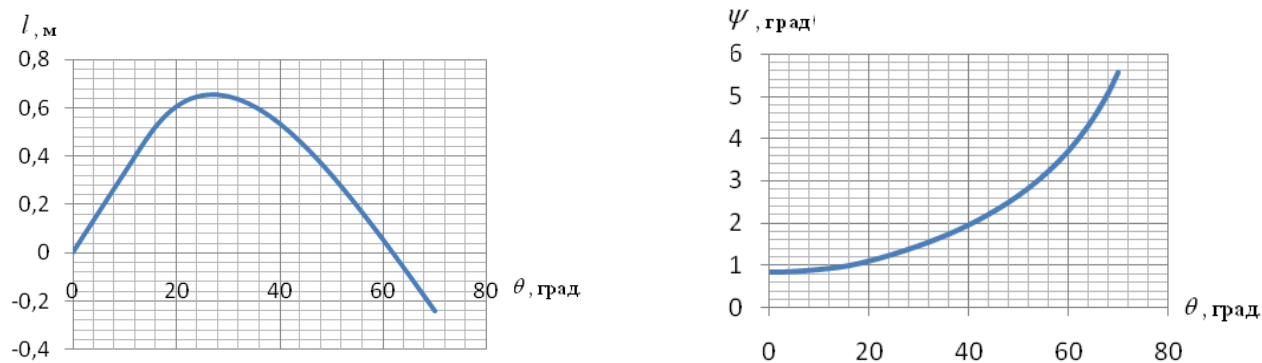


Рис. 5. Диаграмма статической остойчивости и угол дифферента ($X_G = 2.0$ м)

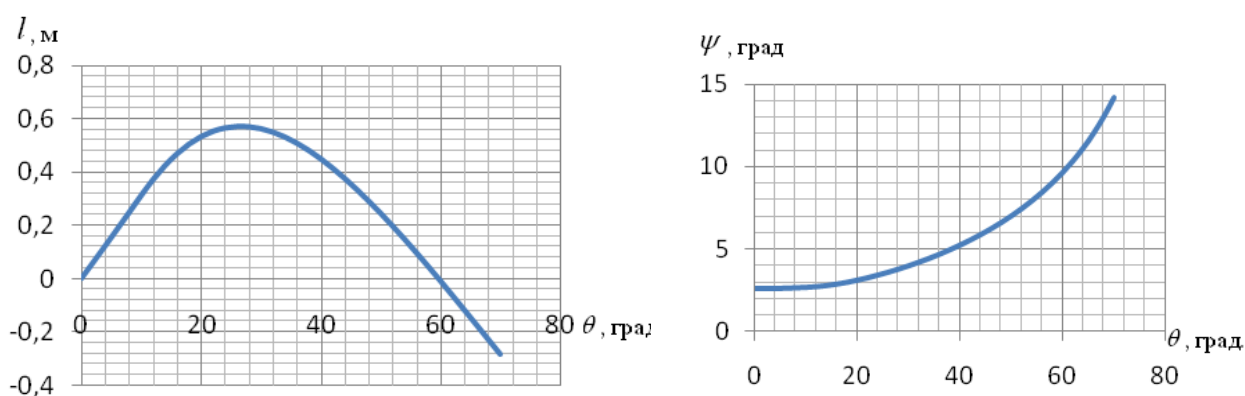


Рис. 6. Диаграмма статической остойчивости и угол дифферента ($X_G = 4.0$ м)

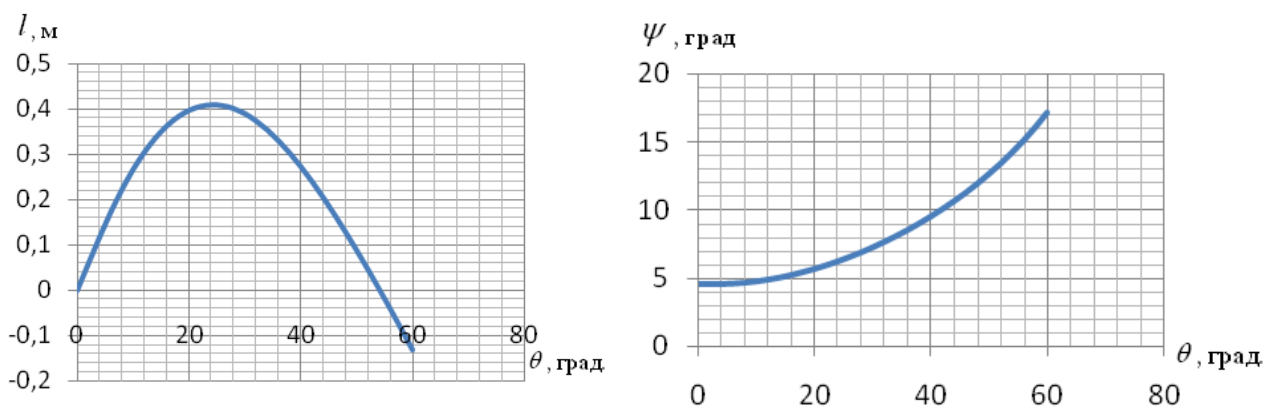


Рис. 7. Диаграмма статической остойчивости и угол дифферента ($X_G = 6.0$ м)

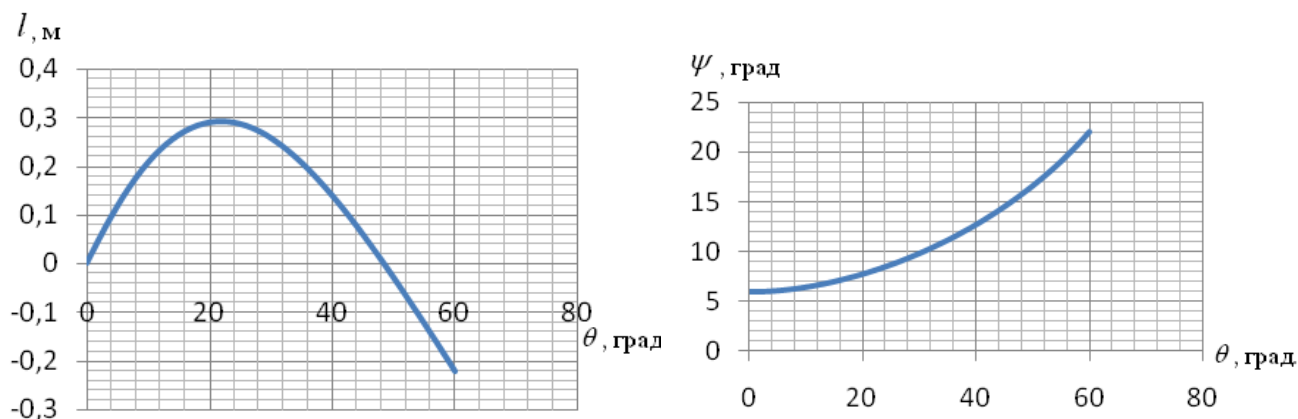


Рис. 8. Диаграмма статической остойчивости и угол дифферента ($X_G = 7.0$ м)

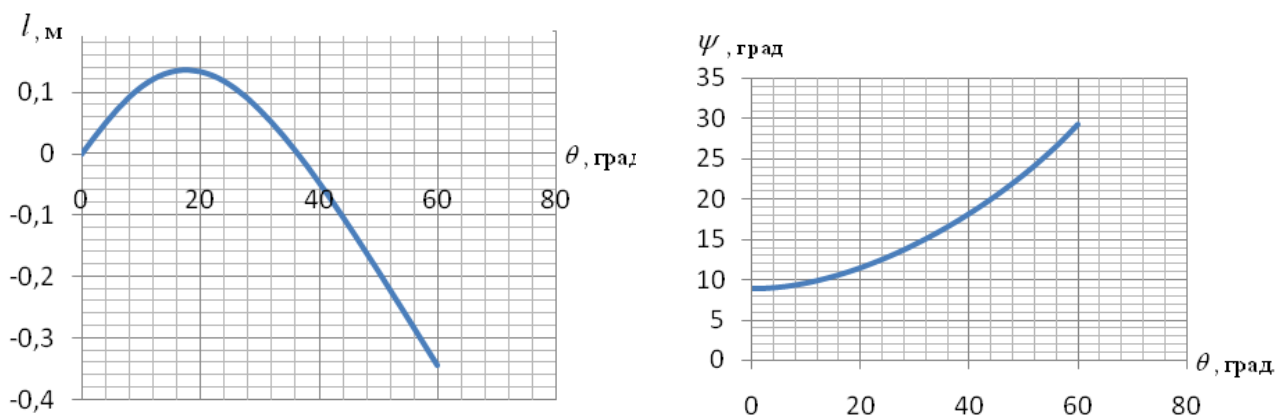


Рис. 9. Диаграмма статической остойчивости и угол дифферента ($X_G = 8.0$ м)

Сравнение с диаграммой остойчивости, рассчитанной при начальной прямой посадке (рис. 2), показывает на значительное ухудшение поперечной остойчивости судна при наличии начального угла дифферента.

Причиной снижения поперечной остойчивости судна из-за влияния угла дифферента является неблагоприятное изменение гидростатических характеристик корпуса.

Действительно, расчет гидростатических характеристик судна, выполненный по программе [5] при посадке с дифферентом ($V = 1065 \text{ м}^3$; $\psi = 16,5 \text{ гр.}$; $\theta = 0 \text{ гр.}$), приведенный в табл. 3, говорит о том, что поперечная метацентрическая высота при угле дифферента $\psi = 16,5 \text{ гр.}$ становится равной нулю ($Z_m = Z_G$). Это означает, что судно при такой посадке полностью теряет остойчивость.

Таблица 3.
Гидростатические характеристики корпуса судна при посадке с дифферентом ($\psi = 16,5 \text{ гр.}$; $\theta = 0 \text{ гр.}$; $X_G = 8,0$ м)

Наименование	$V, \text{ м}^3$	$X_c, \text{ м}$	$Z_c, \text{ м}$	$S, \text{ м}^2$	$X_f, \text{ м}$	$Z_m, \text{ м}$	$Z_M, \text{ м}$
Судно № 1 ($\psi = 16,5 \text{ гр.}$; $\theta = 0 \text{ гр.}$)	1065	8,93	2,19	147	- 2,96	3,29	4,66

Проведенная работа позволяет сделать три вывода.

1. Математическая модель статики корабля адекватно отображает изменение параметров посадки судна при сложном воздействии внешних сил и изменении нагрузки.
2. Данная методика значительно увеличивает число расчетных ситуаций, в которых следует выполнять анализ остойчивости судов.
3. Установлено, что при больших углах дифферента имеют место существенные изменения поперечной остойчивости судна.

Библиографический список

1. Ваганов, А.Б. Динамика неравнообъемных наклонов судна при внезапном изменении нагрузки. [Текст] / А.Б. Ваганов, Н.Т. Нгуен // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2014. № 3. С. 185-193.
2. Ваганов, А.Б. Динамика судна при сложном внезапном воздействии внешних сил [Текст] / А. Б. Ваганов, Н. Т. Нгуен // Вестник АГТУ. 2014. № 4. С. 13-20.
3. Ваганов, А.Б. Расчет управляемости судов и буксирных составов. Учебное пособие [Текст] / А.Б. Ваганов, П.В. Гуров, А.С. Костюнин. Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2013. – 87 с.
4. Благовещенский, С.Н. Справочник по статике и динамике корабля: в 2-х тт. [Текст] / С.Н. Благовещенский, А.Н. Холодилин. – Л.: Судостроение, 1976. Т.1. – 336 с. Т. 2. – 176 с.
5. Ваганов, А.Б., Краснокутский, И.Д. Свидетельство о государственной Регистрации программы для ЭВМ «Расчет гидростатических характеристик и диаграмм остойчивости судовых корпусов сложной геометрической формы при произвольной посадке», №2014612390.