

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

УДК 629.12:532

А. Б. Ваганов¹, Нгуен Нгок Тан²

ДИНАМИКА НЕРАВНООБЪЕМНЫХ НАКЛОНЕНИЙ СУДНА ПРИ ВНЕЗАПНОМ ИЗМЕНЕНИИ НАГРУЗКИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Социалистическая Республика Вьетнам²

Цель: Исследование движения судна при внезапном изменении нагрузки.

Метод: При внезапном изменении нагрузки судна, его движение описывается системой уравнений по методу «ДИНАМИКА». При этом движение судна представляется собой как совокупность вращений вокруг осей, проходящих через центра тяжести судна и перемещение центра тяжести судна. Расчет выполнен по численному методу Рунге-Кутты 4-го порядка с помощью ПЭВМ.

Результаты: Для расчета было выбрано два варианта корпуса судна: низкобортный и высокобортный. Полученные результаты: при внезапном изменении нагрузки вертикальное перемещение у высокобортного корпуса судна – положительное а у низкобортного корпуса – отрицательное.

Выводы: При внезапном изменении нагрузки возникают побочные вида движения. Побочное вертикальное перемещение корпуса представляет опасность затопления для низкобортных судов.

Ключевые слова: динамика, статика, крен, дифферент, динамическая нагрузка, наклонение, вертикальное перемещение.

Динамика корабля – раздел, который изучает движение корпуса судна под действием внешних, изменяющихся во времени сил от ветра и волнения моря, от принимаемых на корабль грузов, работы различных механизмов.

Изменение параметров посадки судна могут быть большими, а наклонения, особенно по крену, неравнообъемными. Применение методик статики корабля, метацентрических формул остойчивости, допущения о прямолинейности обводов корпуса, диаграмм остойчивости будет неправомерным. Нужны другие теоретические и вычислительные средства, способные дать исчерпывающее и точное решение задач плавучести и остойчивости корабля в сложных эксплуатационных ситуациях.

Методически решение задач динамики корабля основывается на классификации этих задач, составлении уравнений движения, определении сил, действующих на корпус, интегрировании уравнений движения и анализе полученных результатов.

Для определения посадки корабля и в дальнейшем движения корабля применимы такие системы координат [1]; [2]; [3]:

1) O, ξ, η, ζ – неподвижная система координат, предназначенная для отсчета линейных перемещений корпуса. Ось $O\zeta$ вертикальна, а оси $O\xi$ и $O\eta$ горизонтальны, и координатная плоскость $\xi O\eta$ параллельна плоскости спокойной воды;

2) $O_2, \xi_2, \eta_2, \zeta_2$ – неподвижная гидромеханическая система координат. Начало этой системы координат располагается на поверхности спокойной воды и, чаще всего, на одной вертикали с началом неподвижной системы координат, а оси $O_2\xi_2 \parallel O_2\zeta_2$, $O_2\eta_2 \parallel O_2\xi_2$, $O_2\zeta_2 \parallel O_2\xi_2$.

3) G, x, y, z – связанная с корпусом система координат, предназначенная для составления уравнений движения корпуса и определения внешних сил;

4) $G, \xi_1, \eta_1, \zeta_1$ – первая полусвязанная система координат, начало которой совпадает с началом связанной системы координат, а оси $G\xi_1 \parallel O\xi, G\eta_1 \parallel O\eta, G\zeta_1 \parallel O\zeta$. Эта система координат предназначена для отсчета угловых перемещений корпуса;

5) O_3, x_3, y_3, z_3 – связанная с корпусом геометрическая система координат, предназначенная для описания геометрии поверхности корпуса, при этом оси $Gx \parallel O_3x_3, Gy \parallel O_3y_3, Gz \parallel O_3z_3$;

б) $O_3, x_3, y_\Theta, z_\Theta$ – вторая полусвязанная с корпусом геометрическая система координат, которая получается путем поворота осей связанной геометрической системы координат вокруг оси O_3, x_3 на угол крена и предназначена для вычисления геометрических характеристик погруженного объема корпуса при произвольной посадке;

7) $O_3, \xi_3, \eta_3, \zeta_3$ – вспомогательная вторая полусвязанная система координат предназначена для вычисления плеч остойчивости и плеч сил тяжести привязанных на судно грузов.

Положение корпуса судна в неподвижной системе координат может быть определено тремя линейными координатами ξ_0, η_0, ζ_0 , центра G связанной системы координат и тремя угловыми координатами Θ, Ψ, χ , которые характеризуют взаимное расположение осей полусвязанной и связанной систем координат. Переход от связанной системы координат к неподвижной системе осуществляется по известным в аналитической геометрии формулам.

В различных разделах теории корабля применяются частные комбинации перечисленных систем координат, которые приспособлены к особенностям решаемых задач, обеспечивают компактность расчетных уравнений, отвечают естественным представлениям наблюдателя (капитана) на судне и сложившимся традициям в кораблестроении и в судовождении. Нет единообразия и в принятии угловых параметров. Статика корабля использует угловые параметры, предложенные В.Г. Власовым. В качке и управляемости судов используются угловые параметры Эйлера. Кроме того, применяются и различные правила знаков при отсчете углов поворота Θ, Ψ, χ .

Из большого многообразия систем Эйлеровых углов в кораблестроении применяется система, образуемая тремя последовательными поворотами вокруг осей трех разных номеров: χ – курс; ψ – дифферент; Θ – крен. В качестве положительного направления поворотов примем направление поворота корпуса по часовой стрелке (рис. 1).

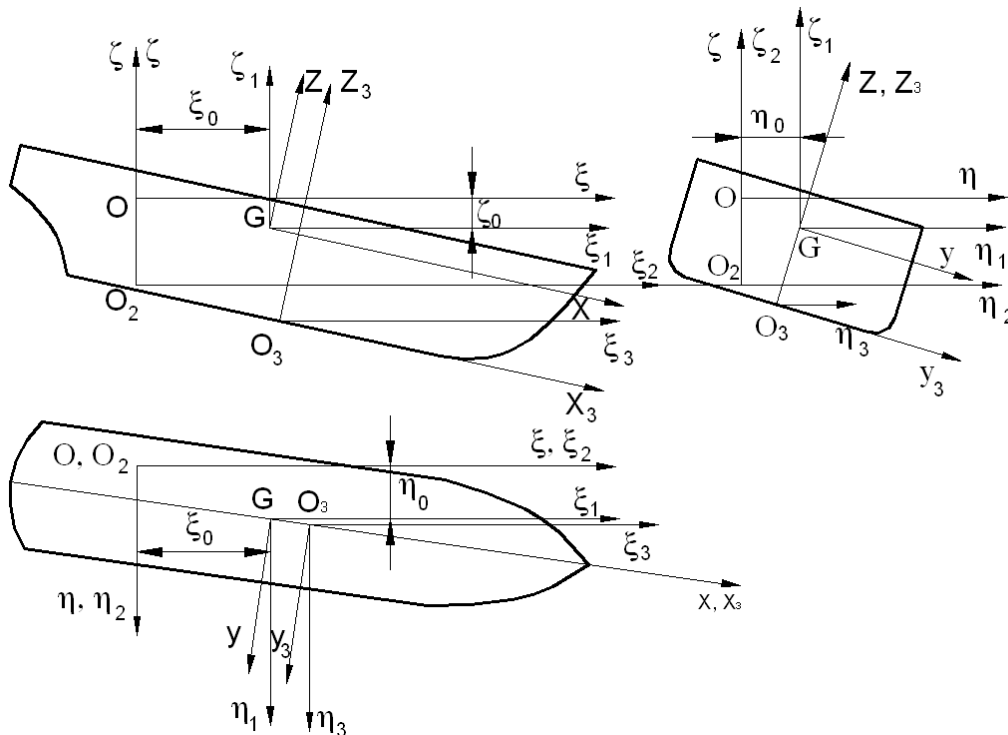


Рис. 1. Системы координат

При пространственных неограниченных углах χ , ψ , Θ система дифференциальных уравнений движения не разделяется на нормальные дифференциальные уравнения. Поэтому введение частных видов движения корпуса корабля или введение ограничений на углы наклона с последующими упрощениями задачи является необходимым шагом для получения инженерного решения.

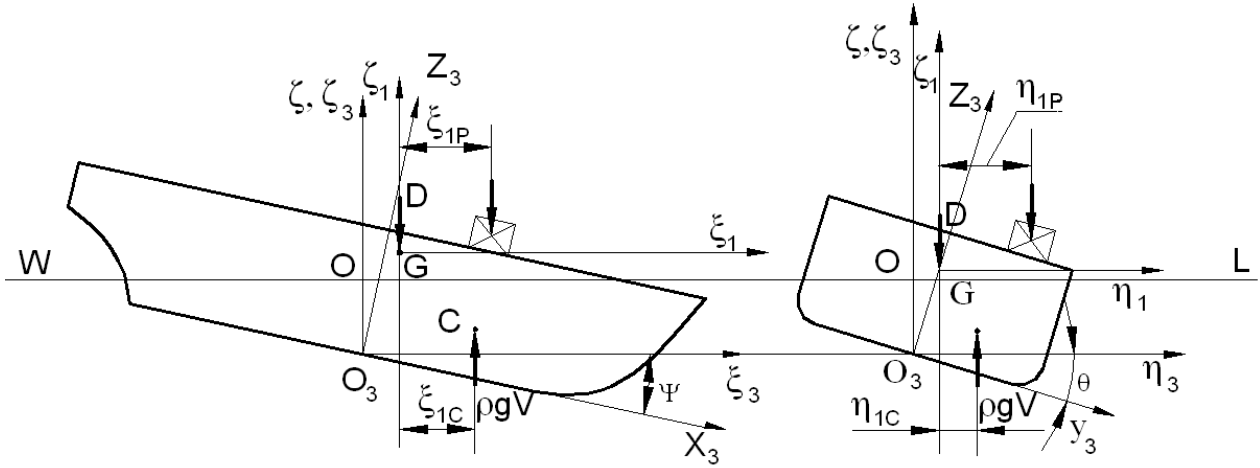


Рис. 2. Схема внешних сил

Особенностью рассматриваемых движений корпуса судна является то, что силы тяжести корпуса и грузов вертикальны и при изменении нагрузки движение корпуса будет иметь место в вертикальном направлении, по крену и по дифференту. Движение корпуса в горизонтальной плоскости не приведет к изменению величины и формулы погруженного объекта. Поэтому эти движения корпуса не будем учитывать. Также положим $\xi_0 = \eta_0 = 0$, т.е. начало O неподвижной системы координат и начало O_3 всегда лежит на одной вертикали.

Определим расчетные уравнения движения корпуса при изменении нагрузки. Схема внешних сил, действующих на корпус, показана на рис. 2.

Тогда уравнения движения корпуса примут такой вид:

$$\begin{aligned}
 (m + \lambda_{33}) \frac{dv_\zeta}{dt} &= \rho g V - D - \sum_{i=1}^{N_p} P_i - b_{\zeta\zeta} v_\zeta; \\
 (I_{yy} + \lambda_{55}) \frac{d\omega_\eta}{dt} &= M_{\text{Диф}} + D \xi_g - \rho g V \xi_c + \sum_{i=1}^{N_p} P_i \xi_{p_i} - b_{55} \omega_\eta; \\
 (I_{xx} + \lambda_{44}) \frac{d\omega_\xi}{dt} &= M_{\text{КР}} + D \eta_q - \rho g V \eta_c + \sum_{i=1}^{N_p} P_i \eta_{p_i} - b_{44} \omega_\xi; \\
 \xi_c &= \xi_{3c} - \xi_{3g} \\
 \eta_c &= \eta_{3c} - \eta_{3g} \\
 \frac{d\zeta}{dt} &= v_\zeta; \\
 \frac{d\psi}{dt} &= \omega_\eta; \\
 \frac{d\theta}{dt} &= \omega_\xi;
 \end{aligned} \tag{1}$$

В уравнениях движения (1) обозначено:

D – сила тяжести корпуса;

ξ_g, η_g – абсцисса и ордината центра тяжести судна;

$\rho g V$ – сила плавучести, вычисляемая по ординатам теоретического корпуса при мгновенной посадке;

ξ_{1c}, η_{1c} – абсцисса и ордината центра величины;

ΣP_i – суммарный вес принятых на судно грузов в данный момент времени;

ξ_{pi}, η_{pi} – абсцисса и ордината центра тяжести принятого груза;

$M_{кр}$ – кренящий момент внешних сил, действующих в данный момент времени;

$M_{диф}$ – дифферентующий момент внешних сил, действующих в данный момент времени;

$b_{\zeta\zeta}, b_{44}, b_{55}$ – коэффициенты сопротивления воды перемещениям корпуса.

После приведения системы уравнений к нормальному виду осуществим интегрирование численным методом.

Блок-схема алгоритма ПОСАДКА, ориентированного на применение достаточно мощных ПЭВМ приведена на рис. 3. При выборе численного метода интегрирования остановимся на методах Рунге-Кутты четвертого порядка.

В блок-схеме (рис. 3) алгоритм ТКOST составлен по рекомендациям [1], [2], использующим метод поперечных сечений корпуса и правило трапеций с неравноотстоящими ординатами при вычислении определенных интегралов.

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.

В методе СТАТИКА наклонение корпуса судна кинематически рассматривается как качение по горизонтальной плоскости «катящейся кривой» F_0, F_1, F_2, \dots . Горизонтальная составляющая этого движения не учитывается. Это равнообъемное наклонение. Вращение осуществляется вокруг осей F_{0x}, F_{1x} .

В методе ДИНАМИКА движение корпуса судна, описываемой системой дифференциальных уравнений (1), представляется как совокупность вращений вокруг осей $G\xi, G\eta$ (крен и дифферент) и перемещение во вертикальном на правлении (на рис. 4).

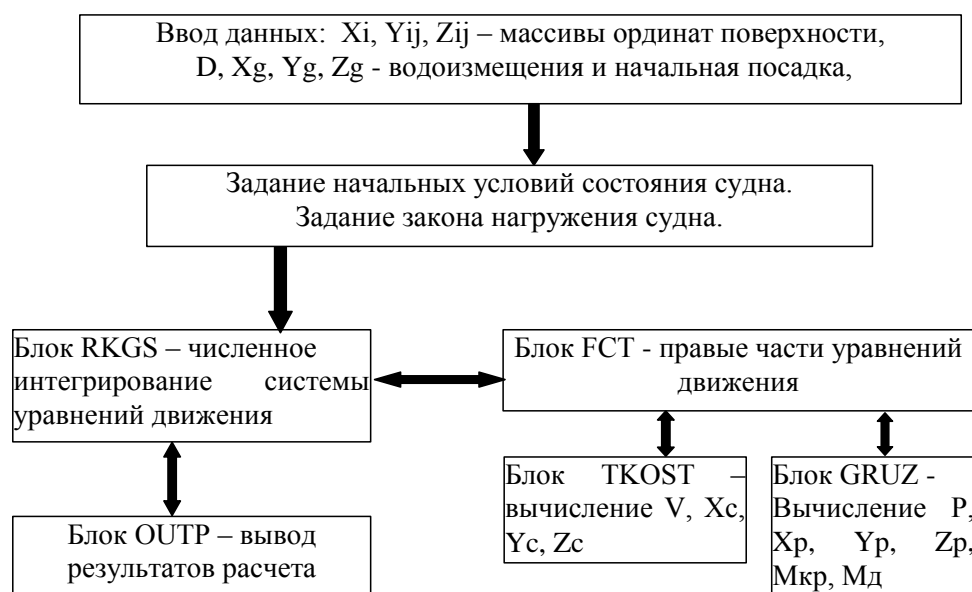


Рис. 3. Блок схема программы ПОСАДКА корабля

Выполним такой анализ. Возможно наклонение корабля по крену (дифференту) с бесконечно малой угловой скоростью. В этом случае наклонение будет являться равнообъемным, поскольку в вертикальном направлении корабль будет успевать всплывать или погружаться. Положение равнообъемной ватерлинии определится как касательная к «катящейся кривой» F_0, F_1, \dots, F_n . Другим предельным случаем наклонения будет мгновенное наклонение (поворот вокруг оси Gx) на угол θ . Наклонная ватерлиния будет касательной к окружности радиусом $r = (Z_G - T)$. Эти наклонения покажем на рис. 4, а, б.

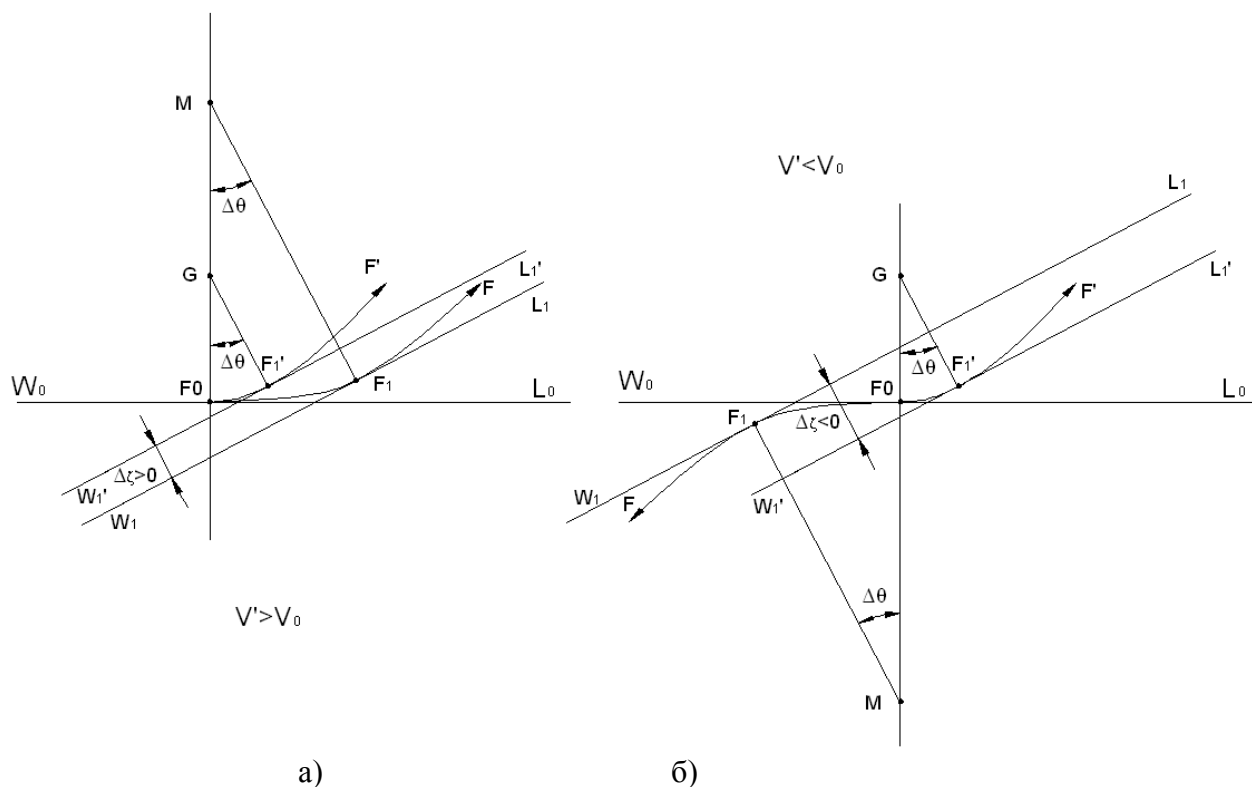


Рис. 4. Кинематическая схема наклонений корпуса:
 а – судно высокобортное; б – судно низкобортное

Обозначим $\Delta\zeta$ – возвышение мгновений ватерлинии над равнообъемной ватерлинии. Если $\Delta\zeta > 0$ – судно всплывает, а если $\Delta\zeta < 0$, то погружается.

Окружность, разность $r = (Z_G - T)$ – это линия центра тяжести F_0 при мгновенном повороте вокруг G на угол θ . Касательно к этой окружности под углом θ будет проходить мгновенная ватерлиния $W'L'$. Это не равнообъемная ватерлиния и судно будет совершать вертикальное движение, чтобы выполнилось уравнение плавучести:

$$D = \rho g V_0; \tag{2}$$

Как следствие, образуется избыточная вертикальная сила, равная

$$\Delta R_\zeta = (\rho g V - D). \tag{3}$$

Можно выделить два типа корпусов: высокобортное и низкобортное (по параметру $(H - T)/H$). Два этих типа имеют различающиеся значительно формулу «катящейся кривой». Поэтому «побочное» вертикальное перемещение у таких типов корпусов будут также существенно различными:

В качестве примеров для расчетов принято два корпуса пассажирского судна, которые имеют одну и ту же погруженную часть и разные надводные части.

Вариант корпуса 1: $L = 47,77$ м; $B = 7,33$ м; $T = 1,2$ м; $H = 2,6$ м; $z_G = 3,1$ м.

Вариант корпуса 2: $L = 47,77$ м; $B = 7,33$ м; $T = 1,2$ м; $H = 1,51$ м; $z_G = 1,62$ м.

Для каждого варианта корпуса выполнен расчет гидродинамических характеристик и координаты катящейся кривой F_0, F_1, \dots, F_n .

Определенно, что после мгновенного наклонения $\theta = 25^\circ$ величина $\Delta\zeta$ (рис. 5) составляют:

- $\Delta\zeta = 0,32$ м для высокобортного варианта корпуса;
- $\Delta\zeta = 0,538$ м для низкобортного варианта корпуса;

Их будем рассматривать как потенциальную склонность к вертикальным перемещения судна при динамическом приложении кренящего момента. У реального судна угловая скорость будет принимать конечные значения и величина вертикального перемещения очевидно будет другой.

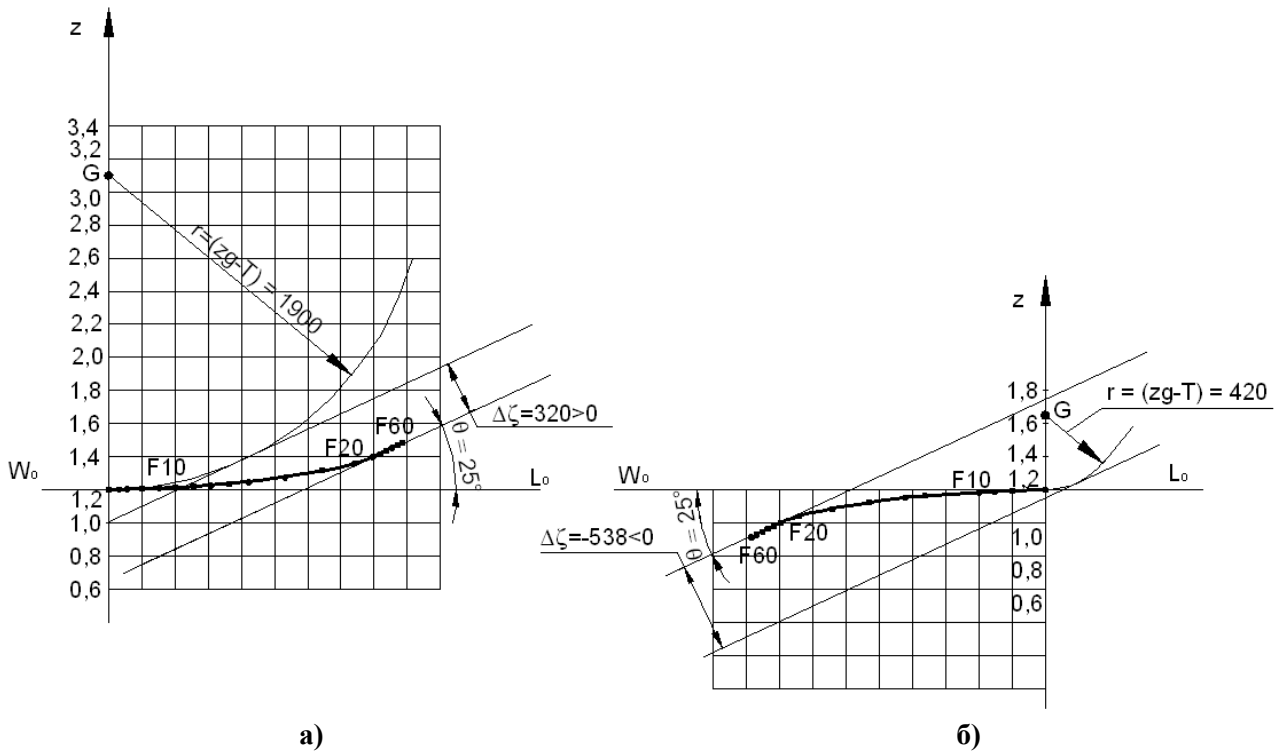


Рис. 5. Предельные способы наклонения:
a – высокобортное судно; *б* – низкобортное судно

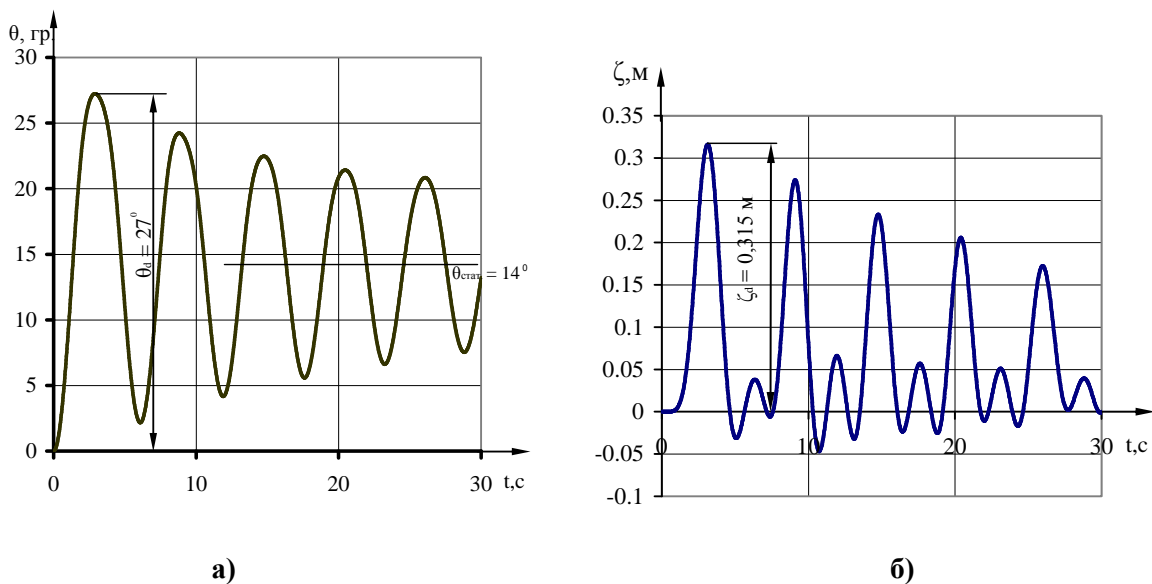


Рис. 6. Динамические характеристики движения судна (вариант корпуса 1):
a – угол крена; *б* – вертикальное перемещение

По разработанному алгоритму и программе ПОСАДКА СУДНА выполнены расчеты динамики судов при внезапном приложении кренящего момента. На рис. 7, а показана зависимость угла крена и на рис. 7, б показана зависимость вертикального перемещения для низкобортного варианта корпуса.

Результаты расчета подтверждают выше приведенные рассуждения о сложном характере движения корпуса судна при динамическом изменении нагрузки.

Динамический угол крена θ_d при этом оказывается менее аналогичной величины, определенной по диаграмме статической и динамической остойчивости из-за наличия момента демпфирования воды $b_{44} \omega_x$, побочного влияния вертикальных помещений.

Более опасным от затопления для низкобортного варианта корпуса является значительное динамическое перемещение $\Delta \zeta_d = -0,25$ м.

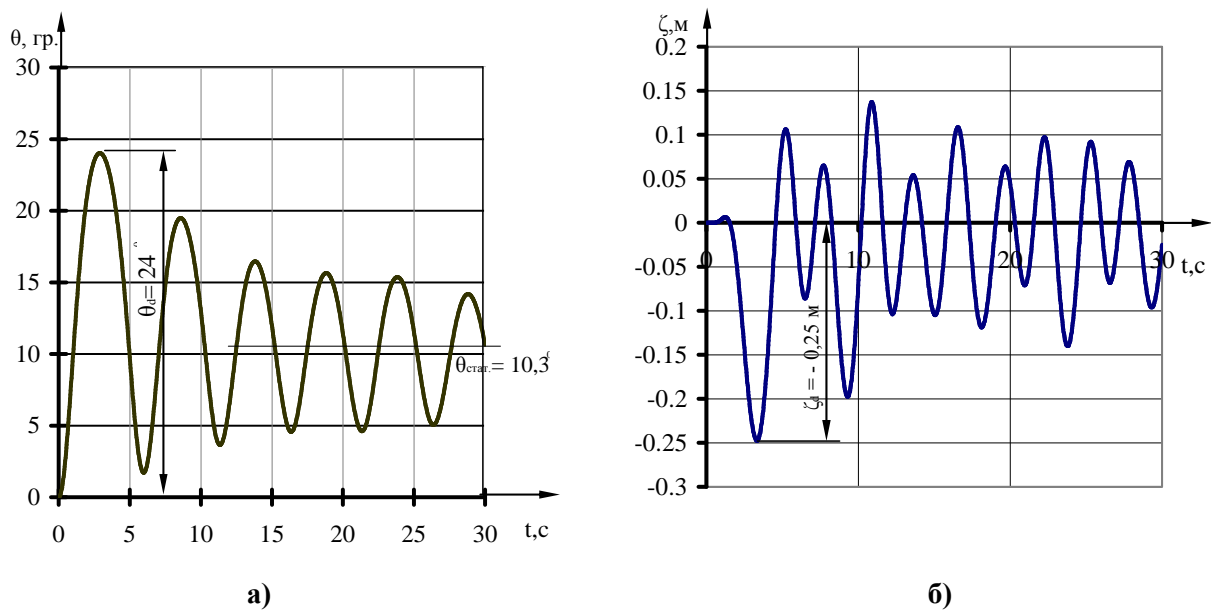


Рис. 7. Динамические характеристики движения судна (вариант корпуса 2):
а – угол крена; б – вертикальное перемещение

Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. При динамическом изменении нагрузки судна движение корпуса судна имеет сложный характер, так как возникают побочные виды движения (при действии только кренящего момента появляется кроме крена дополнительное вертикальное перемещение).
2. Побочное вертикальное перемещение корпуса составляет опасность затопление для низкобортных судов.

Библиографический список

1. Ваганов, А.Б. Расчет плавучести и остойчивости корабля на ЭЦВМ / А.Б. Ваганов. – Горький, 1981.
2. Ваганов, А.Б. Краснокутский И.Д. Свидетельство о государственной Регистрации программы для ЭВМ, №2014612390 «Расчет гидростатических характеристик и диаграмм остойчивости судовых корпусов сложной геометрической формы при произвольной посадке».
3. Ваганов, А.Б. Конструирование теоретического корпуса судна аналитическим методом и расчет мореходных качеств на ЭВМ: учеб. пособие / А.Б. Ваганов, А.В. Васильев, В.А. Ковалев. – Горький, 1989.

4. Справочник по статике и динамике корабля. В 2 т. Т. 1. Статика корабля. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1976.

*Дата поступления
в редакцию 01.07.2014*

A. B. Vaganov¹, Nguyen Ngoc Than²

**THE DYNAMICS OF A VESSEL'S MOVEMENT AT A SUDDEN CHANGE
OF THE LOAD ON IT**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeev¹,
Socialist Republic of Vietnam²

Purpose: Research of a vessel's movement at a sudden change of the load on it.

Method: At a sudden change of the load on a vessel, its movement is described by a system of equations by the method of "dynamics". The movement of the vessel is represented as a set of rotations around the axes through the ship's center of gravity and the displacement of the ship's center of gravity. The calculation is made by the Runge–Kutta method on IBM PC.

Results: To calculate two variations of the hull are chosen. They are low-sided and high-sided. The derived results are that at a sudden change of the load the vertical displacement of a high-sided hull is positive and a low-sided hull's is negative.

Conclusion: At a sudden change of the load on a vessel, side types of movement arise. Side vertical displacement of the hull is the risk of flooding of a low-sided vessel.

Key words: dynamics, statics, careen, difference, dynamic load, the inclination, the vertical movement.