

А. Б. Ваганов¹, И. Д. Краснокутский¹, Нгуен Нгок Тан²
ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА РАСЧЕТА
ВОССТАНАВЛИВАЮЩИХ СИЛ И
МОМЕНТОВ ВОДОИЗМЕЩАЮЩЕГО СУДНА В ИССЛЕДОВАНИЯХ
ЕГО ДИНАМИКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНИХ СИЛ В УСЛОВИЯХ
ВЕТРА И ВОЛНЕНИЯ МОРЯ

¹*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева*
²*Социалистическая Республика Вьетнам*

В статье рассматриваются вопросы плавучести, остойчивости и динамики водоизмещающего судна при сложном внешнем воздействии в условиях ветра и волнения. Предлагается математическая модель динамики судна, охарактеризована совокупность внешних сил и методы их представления. Главными силами являются гидростатические восстанавливающие силы и моменты, для определения которых в составе математической модели предлагается применить численный метод разбиения мгновенной смоченной поверхности корпуса на граничные малые площадки и суммирования сил давления по ним. В качестве примеров приведены результаты тестовых расчетов свободных колебаний корпуса, приема большого груза и приложения динамического кренящего момента от шквала ветра. Приведены результаты расчёта динамики судна на продольном волнении и возникновения параметрического резонанса. Данная методика значительно увеличивает число расчетных ситуаций, в которых следует выполнять анализ остойчивости судов.

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

Суда, разные по назначению, могут совершать достаточно сложные движения под действием внешних сил. Это воздействие порывистого ветра в условиях волнения различного направления, прием и смещение груза, опасная посадка сопровождающаяся заливанием палубы и помещений. Можно отметить такие особенности динамики судов: сложный характер и высокий уровень внешних воздействий на судно; сложная ответная реакция судна на внешнее воздействие, характеризующаяся возникновением побочных движений. Остойчивость судов не должна оказаться недопустимо малой. Отсюда следует необходимость проведения исследования движения и посадки корабля при сложном и внезапном воздействии внешних сил, базирующемся на подходах и математических моделях динамики судна. Научный анализ методов оценивания плавучести и остойчивости водоизмещающих судов в переходных режимах движения представляется актуальным.

Методически решение задач динамики корабля основывается на составлении системы дифференциальных уравнений движения его корпуса, определении сил, действующих на корпус, интегрировании уравнений движения и анализе полученных результатов. Из-за сложности и громоздкости получающихся уравнений приходится рассматривать отдельные виды движений корпуса и применять частные или комбинированные виды расчетных уравнений движения. Для определения параметров посадки корабля и движения корабля применим системы координат и математическую модель, охарактеризованные в работах [1], [2]. Принятые системы координат и схема сил показаны на рисунке 1.

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 Эйлеравыми углами θ, ψ, χ , которые определяют взаимное расположение осей полусвязанной и связанной с корпусом систем координат. Переход от связанной системы координат к неподвижной системе осуществляется по известным в аналитической геометрии и теории и корабля формулам [3, с.184]. Особенностью рассматриваемых движений корпуса судна явля-

ется 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. Кроме того движение корпуса в горизонтальной плоскости не приведет к изменению величины и формы погруженного объёма и, следовательно, к изменениям гидростатических сил поддержания. Поэтому эти движения корпуса в дальнейшем не будем учитывать. Также положим $\xi_0 = \eta_0 = 0$.

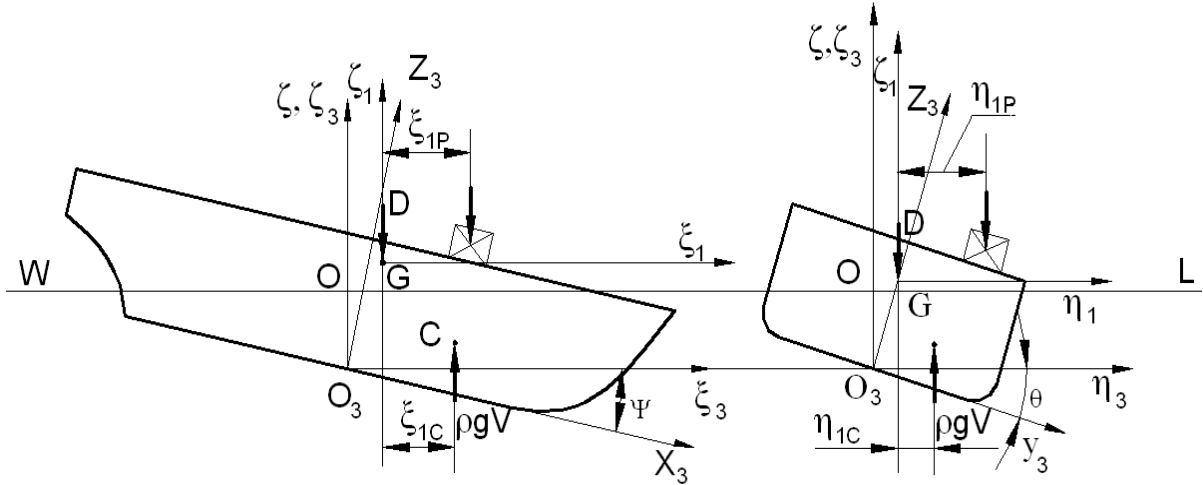


Рис. 1. Системы координат и схема внешних сил

Определим расчетные уравнения движения корпуса при изменении нагрузки. Уравнения движения корпуса при указанных выше ограничениях примут такой вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} (m + \lambda_{33}) \frac{dv_\zeta}{dt} = \rho g V - D - \sum_{i=1}^{N_p} P_i + R_{2\zeta} + R_{3\zeta}; \\ (I_{yy} + \lambda_{55}) \frac{d\omega_\eta}{dt} = M_{диф} - \rho g V \xi_{1c} + \sum_{i=1}^{N_p} P_i \xi_{1p_i} + M_{2\eta} + M_{3\eta}; \\ (I_{xx} + \lambda_{44}) \frac{d\omega_x}{dt} = M_{кр} - \rho g V \eta_{1c} + \sum_{i=1}^{N_p} P_i \eta_{1p_i} + M_{2x} + M_{3x}; \\ \xi_{1c} = \xi_{3c} - \xi_{3g}; \quad \eta_{1c} = \eta_{3c} - \eta_{3g}; \\ \frac{d\zeta}{dt} = v_\zeta; \quad \frac{d\psi}{dt} = \omega_\eta; \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega_x. \end{array} \right. \quad (1)$$

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 при данной мгновенной посадке;

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

$\sum P_i$ – суммарный вес принятых на судно грузов в данный момент времени;

ξ_{1p_i}, η_{1p_i} – 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;

$R_{3\zeta}, M_{3x}, M_{3\eta}$ – возмущающие вертикальная сила и моменты по крену и дифференту от действия волн;

$R_{2\zeta}, M_{2x}, M_{2\eta}$ – сила и моменты сопротивления воды перемещениям корпуса;

$\lambda_{33}, \lambda_{44}, \lambda_{55}$ – присоединенные масса и моменты инерции воды.

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

Кратко охарактеризуем основные категории внешних сил.

Гидростатические силы поддержания определяются как результирующие гидростатических давлений, распределенных по мгновенной смоченной поверхности, которую имело судно при данной посадке. Эти силы играют роль восстанавливающих сил в динамическом процессе движения корпуса. Будем в дальнейшем обозначать эту категорию сил \bar{R}_1, \bar{M}_1 .

Избыточное гидростатическое давление в точке жидкого объема определяется только аппликацией ζ_2 этой точки в гидромеханической системе координат $O_2, \xi_2, \eta_2, \zeta_2$. Поэтому гидростатические восстанавливающие силы обусловлены вертикальными перемещениями корпуса и его бортовыми и килевыми наклонениями. В дальнейшем под обозначениями \bar{R}_1, \bar{M}_1 будем полагать равнодействующие этих сил, которые представим в виде суммы составляющих по осям координат:

$$\bar{R}_1 = \bar{i} R_{1x} + \bar{j} R_{1y} + \bar{k} R_{1z} = \bar{k} R_{1\zeta}; \quad \bar{M}_1 = \bar{i} M_{1x} + \bar{j} M_{1\eta}. \quad (2)$$

Составляющие $R_{1\zeta}, M_{1x}, M_{1\eta}$ определяются выражениями, вытекающими из схемы действия гидростатических сил в рамках теории плавучести и остойчивости свободно плавающего корабля в соответствии с законом Архимеда:

$$R_{1\zeta} = \rho g V; \quad M_{1x} = -\rho g V \cdot l_\theta; \quad M_{1\eta} = -\rho g V \cdot l_\psi, \quad (3)$$

где V – объемное водоизмещение;

l_θ – статическое плечо поперечной остойчивости;

l_ψ – статическое плечо продольной остойчивости.

Традиционные в теории корабля методы определения гидродинамических сил и моментов базируются на поперечно-вертикальных и горизонтальных сечениях теоретического корпуса. Предварительным расчетом определяются гидростатические характеристики корпуса для прямой посадки, диаграммы статической и динамической остойчивости $l_\theta(\theta), d(\theta)$, которые используются в дальнейшем при решении уравнений равновесия корпуса, либо в уравнениях качки судна. При посадке судна, произвольно меняющейся во времени, реально возникает опасность появления ошибок, как методического, так и вычислительного характера. Принципиальным ограничением для данного подхода являются малые углы дифферента. При больших углах наклонений корпуса по дифференту нарастают ошибки в формировании сечения корпуса действующей ватерлинией и в определении объемного водоизмещения и координат центра величины. Эти погрешности имеют методический характер и не могут быть скомпенсированы полностью увеличением числа расчетных шпангоутов. Прямолинейный характер обводов корпуса и равнообъемность наклонений при конечных углах также могут не соблюдаться.

Когда корпус судна характеризуется большой геометрической сложностью, или наклонения корпуса по крену и дифференту не ограничены, следует отойти от традиционных для теории корабля методов и остановить свой выбор на общих формулах гидромеханики для определения гидродинамических сил:

$$\bar{R} = - \int p \bar{n}_0 dS; \quad \bar{M} = - \int p (\bar{r} \times \bar{n}_0) dS, \quad (4)$$

где: \bar{n}_0 – орт внешней нормали к S в данной точке; \bar{r} – радиус-вектор площадки dS .

Расчет гидродинамических сил по этим зависимостям осуществим приближенно, разбив поверхность корпуса на малые элементы ΔS :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_x = \sum_{i=1}^N \Delta R_x = - \sum_{i=1}^N p \cos(n, x) \Delta S, M_x = \sum_{i=1}^N (\Delta R_y Z_d - \Delta R_z Y_d), \\ R_y = \sum_{i=1}^N \Delta R_y = - \sum_{i=1}^N p \cos(n, y) \Delta S, M_y = \sum_{i=1}^N (\Delta R_x Z_d - \Delta R_z X_d), \\ R_z = \sum_{i=1}^N \Delta R_z = - \sum_{i=1}^N p \cos(n, z) \Delta S, M_z = \sum_{i=1}^N (\Delta R_y X_d - \Delta R_x Y_d), \end{array} \right. \quad (5)$$

где p – избыточное давление в центре тяжести площадки;

ΔS ; $\Delta R_x, \Delta R_y, \Delta R_z$ – проекции силы давления, действующей в площадке ΔS ;

X_d, Y_d, Z_d – координаты центра давления площадки;

N – число площадок.

Погрешность данного метода определяется размерами элементарных площадок и легко контролируется. Объём предварительной геометрической подготовки практически одинаков с традиционным снятием ординат теоретического чертежа. В случае использования треугольных элементарных площадок, расчет площади, координат центров тяжести и направляющих косинусов выполняется по известным из аналитической геометрии формулам. Исходной информацией являются только координаты вершин площадки. Можно рекомендовать методику использования «рыбин», пробитых на теоретическом корпусе, путем последовательного ввода узловых точек каждого шпангоута (рис.2). Затем с помощью программы **ELPOD.EXE** формируется совокупность граничных площадок ΔS в файле **KORPUS** [4]. Этот файл используется как единая геометрическая база данных о внешней поверхности корпуса при выполнении расчетов как гидростатических сил и моментов, так и части гидродинамических сил, присоединенных масс и коэффициентов демпфирования.

Для судна с обычными обводами достаточно длину корпуса разбить на (40 – 50) теоретических шпаций, а по периметру мидель-шпангоута – на (25 – 30) «рыбин» на один борт при одинаковых угловых промежутках. В итоге поверхность корпуса представляется совокупностью (4000 – 4500) площадок. Данное умеренное число площадок позволяет при шаге (0.02 – 0.05) секунды в процессе численного интегрирования системы дифференциальных уравнений (1) эффективно проводить необходимые исследования совершаемых корпусом движений.

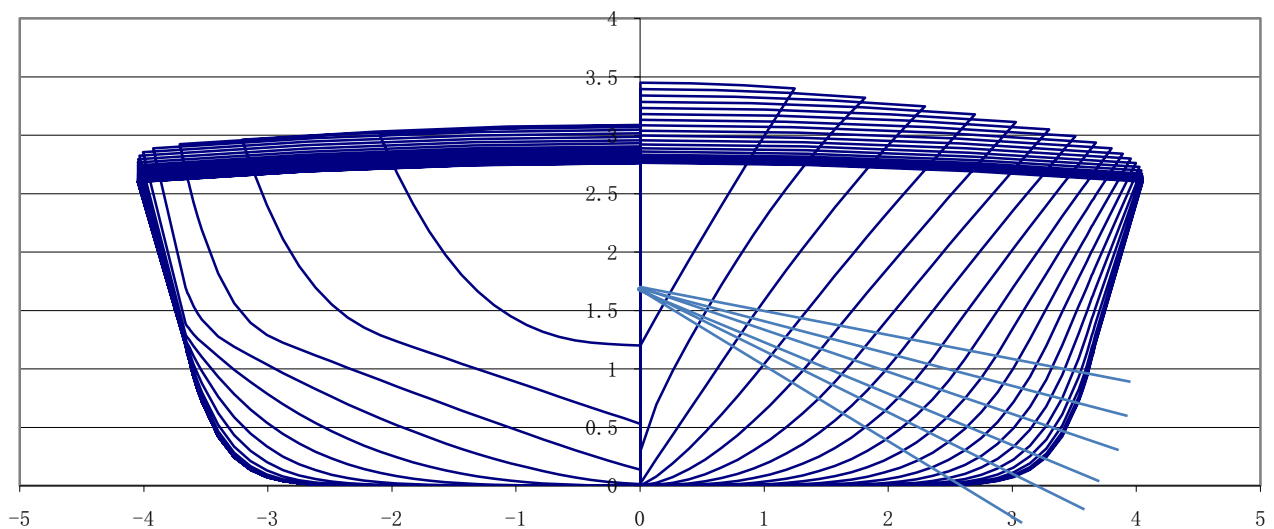


Рис. 2. Разбивка поверхности теоретического корпуса на малые элементы ΔS .

Силы демпфирования. Эти силы разделяются на силы демпфирования волновой природы и силы демпфирования вязкостной природы. Первые обусловлены расходом энер-

гии на создание и поддержание системы волн на поверхности воды, распространяющихся во все стороны от качающегося корабля, а вторые обусловлены вязкостью воды и определяются как сумма сопротивления трения и сопротивления формы. Будем в дальнейшем обозначать силы демпфирования $\overline{R}_2, \overline{M}_2$.

$$\begin{cases} R_{2\zeta} = -b_{\zeta\zeta} \cdot v_{\zeta}; \\ M_{2x} = -b_{440} \cdot \omega_x - b_{441} \cdot \omega_x^2 \cdot \text{sign } \omega_x; \\ M_{2\eta} = -b_{550} \cdot \omega_{\eta}. \end{cases} \quad (6)$$

Возмущающие гидродинамические силы обусловлены непрерывной передачей энергии корпусу судна волнующейся жидкостью. Эту категорию сил принято рассматривать в виде суммы главной (гидростатической) части и дифракционной (гидродинамической) части. Главная часть представляет собой результирующую силу, обусловленную волновой добавкой давления по смоченной поверхности судна. Дифракционная часть обусловлена действием отраженных от корпуса волн, создающих дополнительные гидродинамические давления. Будем в дальнейшем обозначать эти силы $\overline{R}_3, \overline{M}_3$.

Полные значения возмущающих сил при курсовом угле волн 90° найдем путем суммирования всех составляющих, представленных нами в соответствии с рекомендациями [5]:

$$R_{3\zeta} = \chi_{\zeta} \cdot \rho g \cdot \Delta V - \frac{g}{\sigma} \cdot b_{33} \cdot \chi'_{\zeta} \cdot \alpha_b - \sigma^2 \cdot \lambda_{33} \cdot \chi''_{\zeta} \cdot \zeta_{2b}. \quad (7)$$

$$M_{3x} = -\rho g \cdot V_0 \cdot h_0 \cdot \chi_{\theta} \cdot \alpha_b + b_{44} \cdot k \cdot \sigma \cdot \chi'_{\theta} \cdot \zeta_{2b} + \sigma^2 \cdot \lambda_{44} \cdot \chi''_{\theta} \cdot \alpha_b. \quad (8)$$

В правой части формул (7) и (8) первые слагаемые представляют в соответствии с гидростатическим подходом в теории качки судов:

$$\chi_{\zeta} \rho g \Delta V = \chi_{\zeta} \rho g S_{wl} \zeta_{2b} \quad (9)$$

– главная часть вертикальной возмущающей силы, обусловленная дополнительным погруженным в волну объемом корпуса;

$$\rho g V_0 h_0 \chi_{\theta} \alpha_b \quad (10)$$

– главная часть возмущающего кренящего момента, обусловленная тем, что у корпуса на склоне волны изменяется форма погруженного объема.

Далее в формулах (7) и (8) обозначено: ζ_{2b} – аппликата волновой поверхности; α_b – угол волнового склона; $\chi_{\zeta}, \chi'_{\zeta}, \chi''_{\zeta}, \chi_{\theta}, \chi'_{\theta}, \chi''_{\theta}$ – редуцированные коэффициенты; S_{wl} – площадь ватерлинии; V_0 – объемное водоизмещение; h_0 – начальная поперечная метацентрическая высота; σ – частота волны; k – волновое число.

Нужно отметить, что выражения (9) и (10) получены для прямостенных обводов корпуса и для начального положения прямой посадки. При возникновении у судна дополнительного угла крена от внешних сил, например от действия ветра или от смещения груза, эти зависимости нуждаются в коррекции для учета не прямой начальной посадки, непрямоугольного характера обводов и нелинейности по восстанавливающему моменту.

В работе И. К. Бородая, Ю. А. Нецветаева [6] получено теоретическое обоснование гидродинамической задачи о восстанавливающем моменте на конечных углах крена для судна, двигающегося произвольным курсом в условиях волнения. Авторы включили в состав восстанавливающего момента кроме момента гидростатических давлений в условиях тихой воды при данной посадке судна также возмущающий момент от действия волн. Восстанавливающий момент в этом случае является функцией от параметров посадки и от времени. Анализ восстанавливающего момента основан на следующих допущениях:

- движение жидкости потенциальное;
- наклоненное на заданный угол судно испытывает продольную качку и поперечно – горизонтальные колебания;
- амплитуды всех видов колебаний корпуса и вызываемых этими колебаниями волн являются величинами первого порядка малости;
- решение ограничивается рамками теории волн относительной малой амплитуды.

Основываясь на данной работе, считаем возможным объединить вычисление гидростатических сил $\overline{R}_1, \overline{M}_1$ и главной части возмущающих сил по выражениям (9) и (10) в одном

численном алгоритме по формулам (5), определяя при этом осадку судна и аппликаты элементов площади ζ_2 от уровня приведенной волновой ватерлинии с аппликацией ($\chi_\zeta \cdot \zeta_{2b}$). Тогда только гидродинамическая часть возмущающих сил будет представлять возмущающие силы от волнения $\overline{R_3}, \overline{M_3}$ в уравнениях движения (1). Данный методический прием в сочетании с численным методом интегрирования позволяет учесть отмеченные выше проблемы в определении возмущающих сил от волн. Влияние начального угла крена на величину присоединенных масс $\lambda_{33}, \lambda_{44}$ и коэффициентов демпфирования b_{33}, b_{44} возможно в дальнейшем учесть поправочными функциями.

Силы тяжести принимаемых грузов:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{Np} P_i &= 0, \text{ при } t < t_{pi}; \\ \sum_{i=1}^{Np} P_i &, \text{ при } t > t_{pi}. \end{aligned} \quad (11)$$

t_{pi} – время приема груза.

Принимаемые грузы разделим на следующие группы:

- 1 – твердые закрепленные грузы;
- 2 – жидкие грузы в отсеках, заданных размеров;
- 3 – подвешенные, смещающиеся при наклонении корпуса грузы;
- 4 – опора на дне (касание корпусом дна при посадке на мель).

Аэродинамический момент от воздействия ветра на надводную часть корпуса:

$$\begin{aligned} M_{кр} &= M_{кр}^0, \text{ при } t < t^{шкв}; \\ M_{кр} &= M_{кр}^1, \text{ при } t > t^{шкв}. \end{aligned} \quad (12)$$

Совокупность охарактеризованных выше сил и моментов является достаточной для исследования движения судна.

Осуществим интегрирование системы уравнений (1) численным методом. Блок-схема алгоритма решения системы дифференциальных уравнений (1), приведена нами в работе [1, 2].

Пассажирское судно, расчетный корпус которого показан на рис.2, в качестве примера будем использовать для проведения расчетов.

Таблица 1

Главные размерения корпуса

Наименование	Значение
Длина по КВЛ, L, м	47.77
Ширина по КВЛ, В, м	7.33
Осадка, Т, м	1.20
Высота борта, Н, м	2.60
Абсцисса центра тяжести судна, X _G , м	-2.20
Аппликата центра тяжести судна, Z _G , м	3.18
Коэффициент общей полноты, δ	0.7026
Коэффициент площади мидель-шпангоута, β	0.933
Коэффициент площади по КВЛ, α	0.844

Гидростатические характеристики корпуса, рассчитанные по программе [4] приведены в табл. 2.

Таблица 2

Гидростатические характеристики корпуса

T, м	V, м ³	X _с , м	Z _с , м	S, м ²	X _г , м	Z _г , м	Z _М , м
0.800	183.9	-2.207	0.427	265.8	-2.170	5.547	186.8
1.000	238.2	-2.200	0.535	276.9	-2.185	4.842	156.7
1.200	294.6	-2.199	0.643	287.0	-2.201	4.404	136.0
1.400	353.2	-2.214	0.752	298.2	-2.287	4.128	123.3
1.600	413.7	-2.217	0.862	306.5	-2.171	3.920	110.9

С целью тестирования программы расчета и выявления особенностей в характеристиках движения корпуса при сложных видах воздействия внешних сил были рассмотрены следующие расчетные случаи: свободные колебания на тихой воде; внезапный прием груза в условиях тихой воды и воздействие шквала ветра в условиях волнения.

Свободные колебания на тихой воде. Численное моделирование свободных колебаний на тихой воде выполнялось для тестирования программы, определения частот свободных колебаний по крену и установления взаимосвязей бортовых колебаний с другими видами движений. Вычислительный эксперимент проводился при малых углах крена в зоне линейной части диаграммы $l(\theta)$. Начальный угол крена $\theta_0 = 10$ град. = 0,174 рад., начальный угол дифферента $\psi_0 = 5$ град. = 0,087 рад., начальное вертикальное перемещение $\zeta_0 = 0.3$ м. На рис. 3 приведены зависимости $\theta(t)$, $\psi(t)$ и $\zeta(t)$.

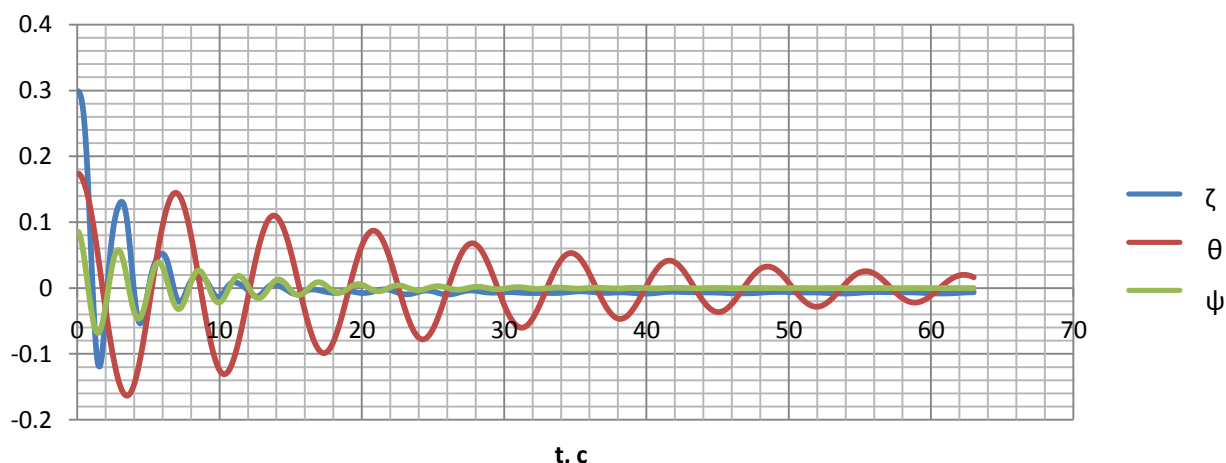


Рис. 3. Свободные колебания корпуса (крен, дифферент и вертикальные)

Полученный результат свидетельствует об адекватности математической модели (1) и правильности вычисления гидростатических сил.

Внезапный прием груза в условиях тихой воды. Исследовано движения корпуса при динамическом приеме груза в определенную точку судна. Параметры приема груза приведены в таблице 3.

Таблица 3

Параметры приема груза

Вес груза P _{гр} , кН	X _{гр} , м	Y _{гр} , м	Z _{гр} , м	t, с
150	10.000	3.000	2.600	20

На рис. 4 приведены зависимости $\theta(t)$, $\psi(t)$ и $\zeta(t)$.

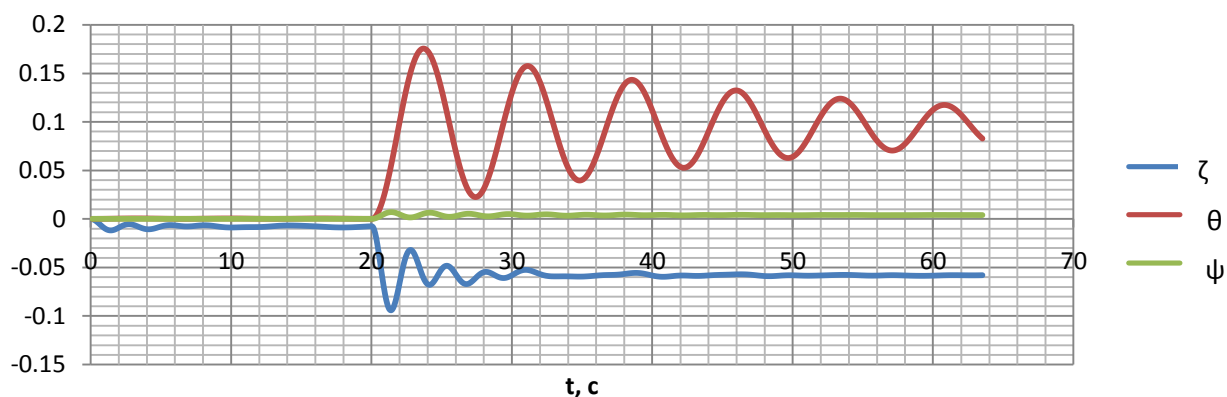


Рис. 4. Приём груза в условиях тихой воды

Общим свойством для всех параметров движения при приеме груза является выраженный динамический характер перемещений. Динамические амплитуды более чем в 2 раза превышают соответствующие статические значения, что делает актуальным применение методов динамики при моделировании грузовых операций.

Воздействие шквала ветра в условиях волнения. На поперечном волнении (КУВ=90°) с высотой волны 2 м. на 62 секунде к судну внезапно был приложен кренящий момент 600 кН м. На рис. 5 приведены зависимости $\theta(t)$, $\psi(t)$ и $\alpha_v(t)$.

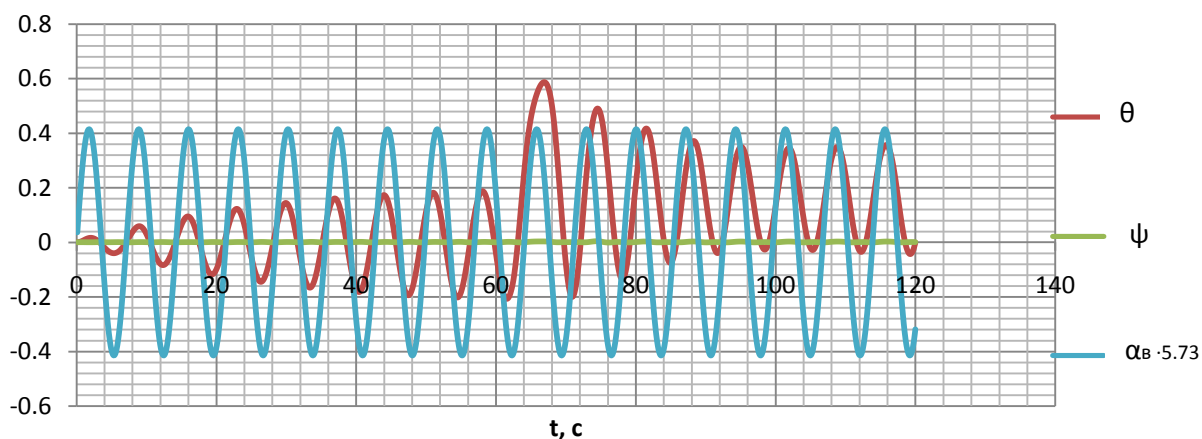


Рис. 5. Воздействие шквала при КУВ=90°

На рис.6 приведены зависимости восстанавливающего момента $M_{1X}(t)$ и возмущающего кренящего момента волн $M_{3X}(t)$ от времени.

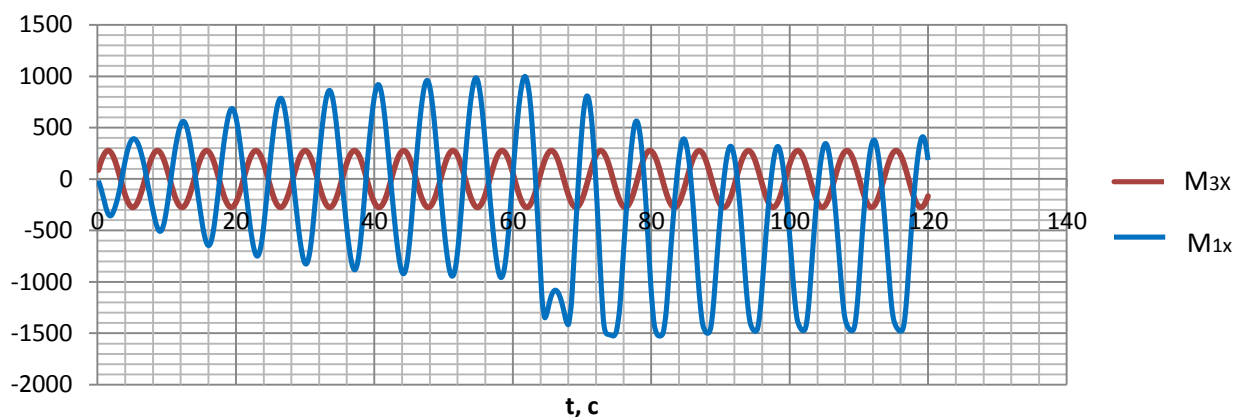


Рис. 6. Зависимости восстанавливающего и возмущающего моментов при КУВ=90°

На продольном волнении (КУВ=0°) на 62 секунде к судну внезапно был приложен кренящий момент 600 кН·м. На рис.7 приведены зависимости $\theta(t)$ и $\psi(t)$, а на рис. 8 – $M_{1x}(t)$ и $M_{3x}(t)$. До приложения кренящего момента наклона судна по крену отсутствовали. После приложения кренящего момента стали развиваться интенсивные колебания по крену с нарастающей амплитудой. Очевидно это обусловлено изменением характеристик поперечной остойчивости на вершине и на подошве волны.

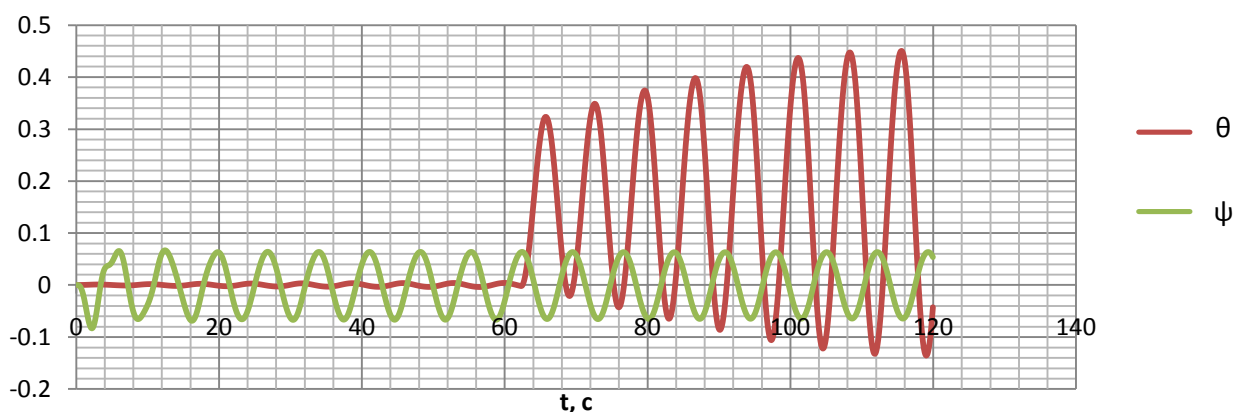


Рис. 7. Воздействие шквала при КУВ=0°

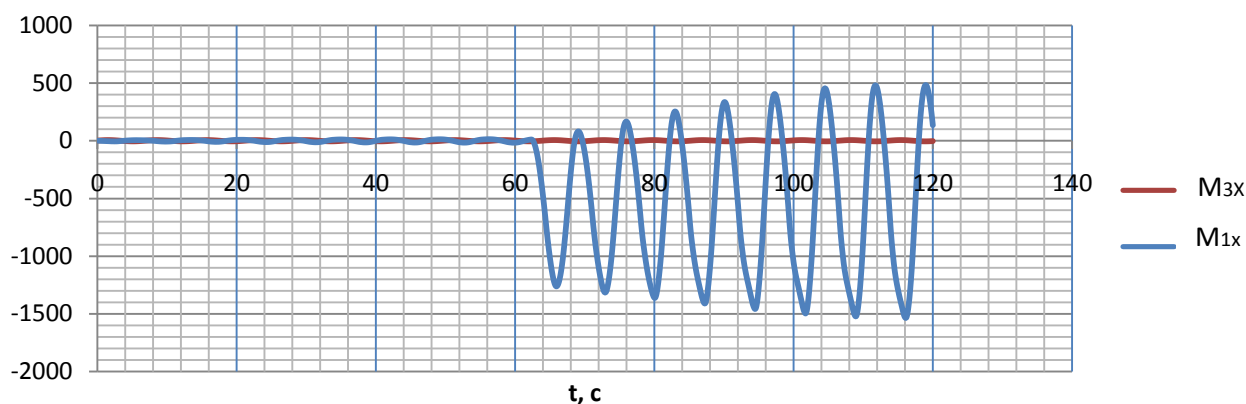


Рис. 8. График изменения восстанавливающего момента по крену при КУВ = 0°

Аналогичная ситуация смоделирована смещением груза 150 кН на правый борт на 30 секунде (при смещении 3м кренящий момент 450 кН·м). На рис. 9 приведены зависимости

$\theta(t)$ и $\psi(t)$. До смещения груза наклоны судна по крену отсутствовали. После смещения груза также стали развиваться интенсивные колебания по крену с нарастающей амплитудой.

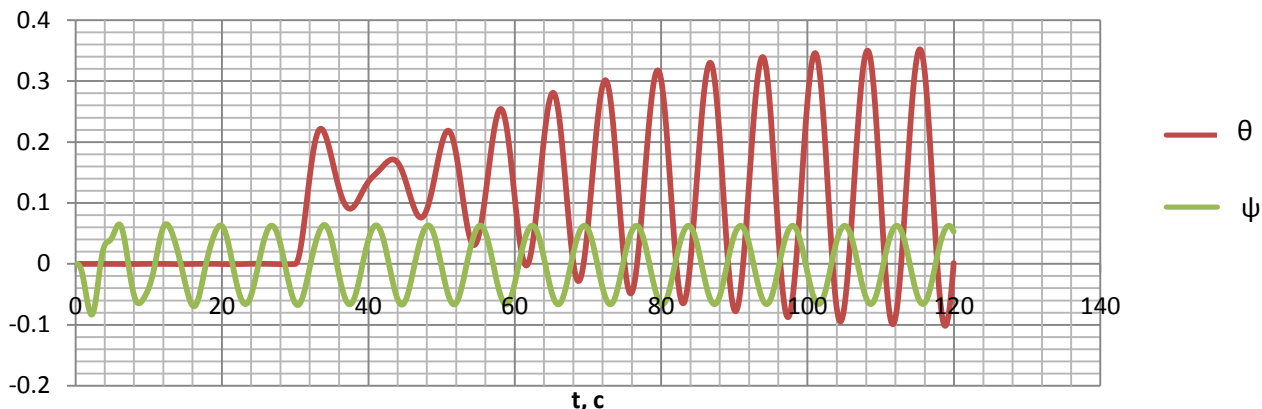


Рис. 9. Смещение груза

Смоделирована ситуация прекращения действия кренящего момента. На волнении (КУВ=0) до 62 секунды к судну приложен кренящий момент 600 кН·м. Затем кренящий момент был убран. На рис. 10 приведены зависимости параметров движения. После прекращения действия кренящего момента колебания по крену продолжались но уже с убывающей во времени амплитудой.

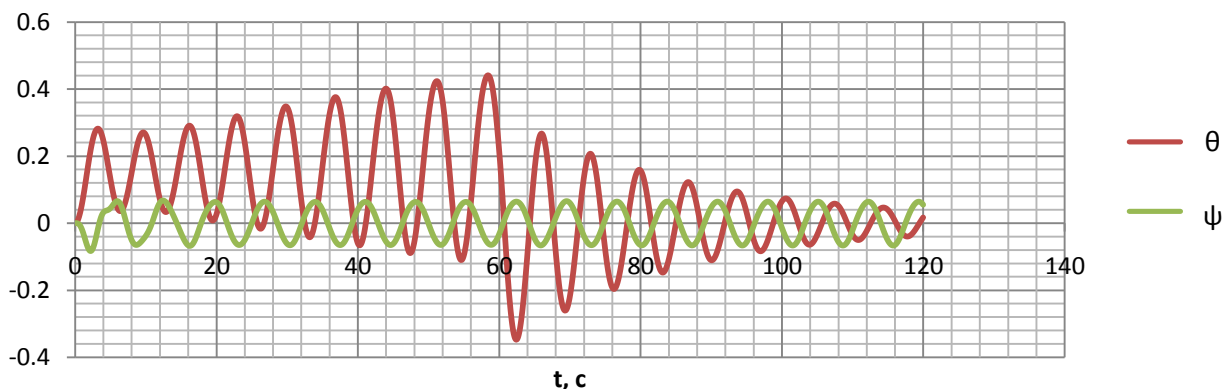


Рис. 10. Наклоны судна на продольном волнении после прекращения действия кренящего момента

В итоге можно отметить, что инициирующим фактором параметрического резонанса по крену на продольном волнении является приложение кренящего момента независимо от его физической сущности. Развитие и угасание параметрического резонанса носит медленно изменяющийся во времени процесс.

Выводы

1. Математическая модель (1) адекватно отображает изменение параметров посадки судна при боковой качке на регулярном волнении. Необходимо наличие начального участка перед выходом на стационарный режим качки, поскольку интегрирование системы дифференциальных уравнений (1) осуществляется численным методом.

2. Проведенное исследование динамики судна позволяет отметить, что при действии больших кренящих моментов, вызывающих углы крена, превышающих θ_{\max} диаграммы $l(\theta)$ и обуславливающих нелинейность по восстанавливающему моменту наблюдается тренд частоты колебаний по крену в сторону уменьшения. Нелинейность изменяет ритм резонансной качки: фазовый угол между углом волнового склона и углом крена становится больше $\pi/2$, что можно видеть на реализациях процесса (рис. 5 и 6). На продольном волнении может

проявиться параметрический резонанс по крену, способный вызвать значительные наклоны. Оценка степени опасности для судна в отношении возможного опрокидывания или заливания может быть выполнена путем математического моделирования по предлагаемой методике.

Библиографический список

1. Ваганов, А.Б. Динамика неравнообъемных наклонов судна при внезапном изменении нагрузки / А.Б. Ваганов, Н.Т. Нгуен [Текст]// Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2014. № 3. С. 185-193.
2. Ваганов, А.Б. Динамика судна при сложном внезапном воздействии внешних сил / А. Б. Ваганов, Н.Т. Нгуен [Текст]// Вестник АГТУ. 2014. № 4. С. 13-20.
3. Справочник по теории корабля: В трёх томах. Том 2. Статика судов. Качка судов/ под ред. Я.И. Войткунского [Текст]. – Л.: Судостроение, 1985. – 440 с., ил.
4. Ваганов А.Б. Свидетельство о государственной Регистрации программы для ЭВМ, №2014612390 «Расчет гидростатических характеристик и диаграмм остойчивости судовых корпусов сложной геометрической формы при произвольной посадке» / А.Б. Ваганов, И.Д. Краснокутский.
5. Справочник по статике и динамике корабля. В двух томах. Изд. 2-е, перераб. и доп. Т. 2. Динамика (качка) корабля [Текст]/С.Н.Благовещенский, А.Н. Холодилин.– Л.: Судостроение, 1975.– 176 с.
6. Бородай, И.К. Мореходность судов / И.К. Бородай, Ю.А. Нецветаев [Текст]. – Л.: Судостроение, 1982. –288с., ил.