

УДК 629.12

А. Б. Ваганов<sup>1</sup>, Нгуен Нгок Тан<sup>2</sup>

## ДИНАМИКА ВОДОИЗМЕЩАЮЩЕГО АМФИБИЙНОГО СУДНА ПРИ ВХОДЕ В ВОДУ И ПРИ ВЫХОДЕ ИЗ ВОДЫ НА БЕРЕГ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Социалистическая Республика Вьетнам<sup>2</sup>

**Цель:** Исследование движения водоизмещающего амфибийного судна при входе в воду и при выходе из воды на берег.

**Метод:** При входе в воду и при выходе из воды на берег на водоизмещающее амфибийное судно действуют разные силы по разным категориям. Чтобы описывать его движение, была использована система уравнений по методу «ДИНАМИКА». При входе в воду движение судна разделяется на три режима: режим движения на колесах по твердой поверхности, режим частичного плавания с касанием колесами и режим свободного плавания. Расчет выполнен по численному методу Рунг-Кутта 4 порядка с помощью ПЭВМ.

**Результаты:** По результатам расчета можно определить изменения реакции подвески колеса, угла дифферента и водоизмещения. Во время спуска в воду реакции подвески у каждой пары колеса разные и быстро изменяются. При заданном условии начального движения судна угол дифферента появляется во время спуска и равен нулю при режиме свободного плавания.

**Выводы:** При входе в воду и выходе из воды на берег, движение водоизмещающего судна является сложным, в зависимости от условия эксплуатации можно определить нагрузки на колеса для оценки прочности подвески, а также оценить опасность движения судна с точки зрения остойчивости и незаливаемости.

*Ключевые слова:* амфибийное судно, остойчивость, незаливаемость, дифферент, динамическая нагрузка.

Амфибийные суда должны выполнять достаточно трудные движения: спуск в воду с берега и выход из воды на берег. Такие суда в данных режимах движения частично поддерживаются гидростатическими силами в погруженной в воду части корпуса, и частично реакциями колес при касании о дно водоема или опорную поверхность. Соотношения между данными категориями сил непрерывно меняются в процессе движения и остойчивость данных судов не должна оказаться опасно малой. Поэтому научный анализ некоторых положений плавучести и остойчивости амфибийных водоизмещающих судов в переходных режимах движения представляется актуальным.

Можно отметить особенности динамики таких судов:

1. Сложный характер и высокий уровень внешних воздействий на судно.
2. Сложная динамика поведения судна как реакции на внешнее воздействие.

Отсюда следует необходимость проведения исследования движения и посадки корабля при сложном и внезапном воздействии внешними силами, базирующемся на подходах и математических моделях динамики судна. Методически решение задач динамики корабля основывается на составлении системы дифференциальных уравнений движения, определении сил, действующих на корпус, интегрировании уравнений движения и анализе полученных результатов.

Из-за сложности и громоздкости получающихся уравнений приходится часто рассматривать отдельные частные виды движений корпуса и применять частные или комбинированные виды расчетных уравнений движения. Для определения параметров посадки корабля и движения корабля применим системы координат, охарактеризованные в работах [1]; [2]; [3]. Принятые системы координат показаны на рис. 1.

Положение корпуса судна в неподвижной системе координат может быть определено тремя линейными координатами  $\xi_0, \eta_0, \zeta_0$ , центра  $G$  связанной системы координат и тремя угловыми координатами  $\Theta, \Psi, \chi$ , которые характеризуют взаимное расположение осей полу- связанной и связанной систем координат. Переход от связанной системы координат к неподвижной системе осуществляется по известным в аналитической геометрии формулам.

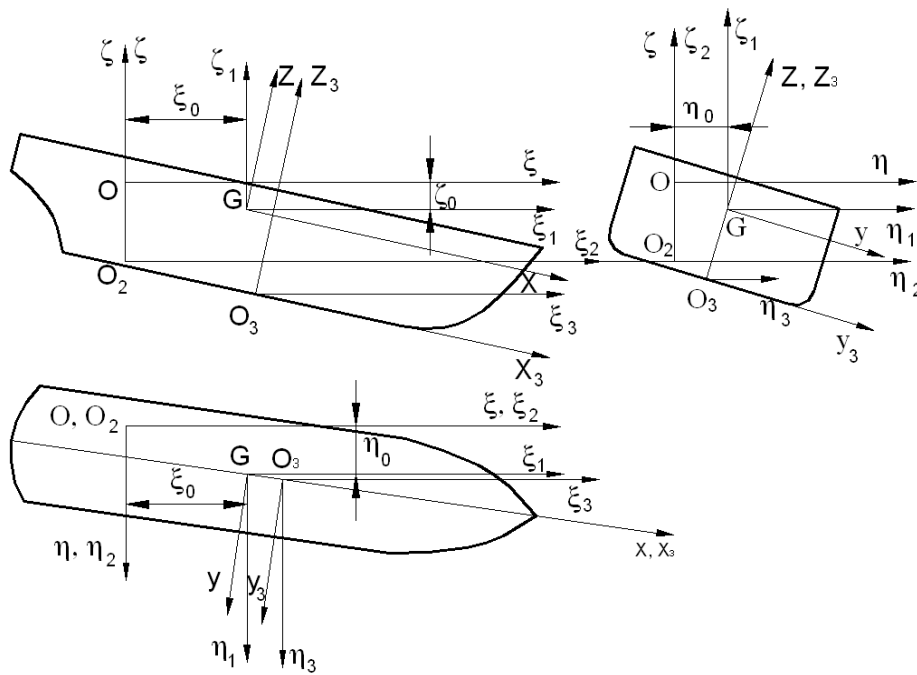


Рис. 1. Системы координат

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

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

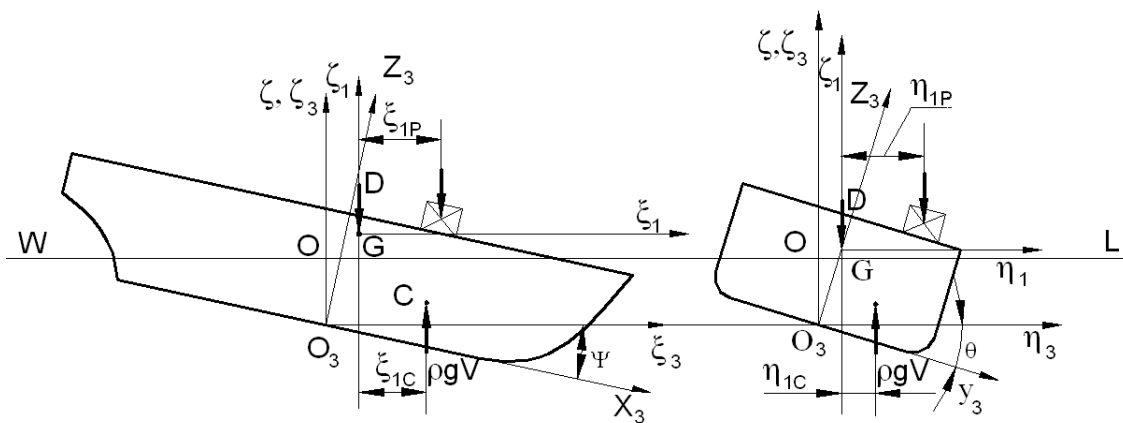


Рис. 2. Схема внешних сил

Уравнения движения корпуса при указанных ранее ограничениях примут такой вид:

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

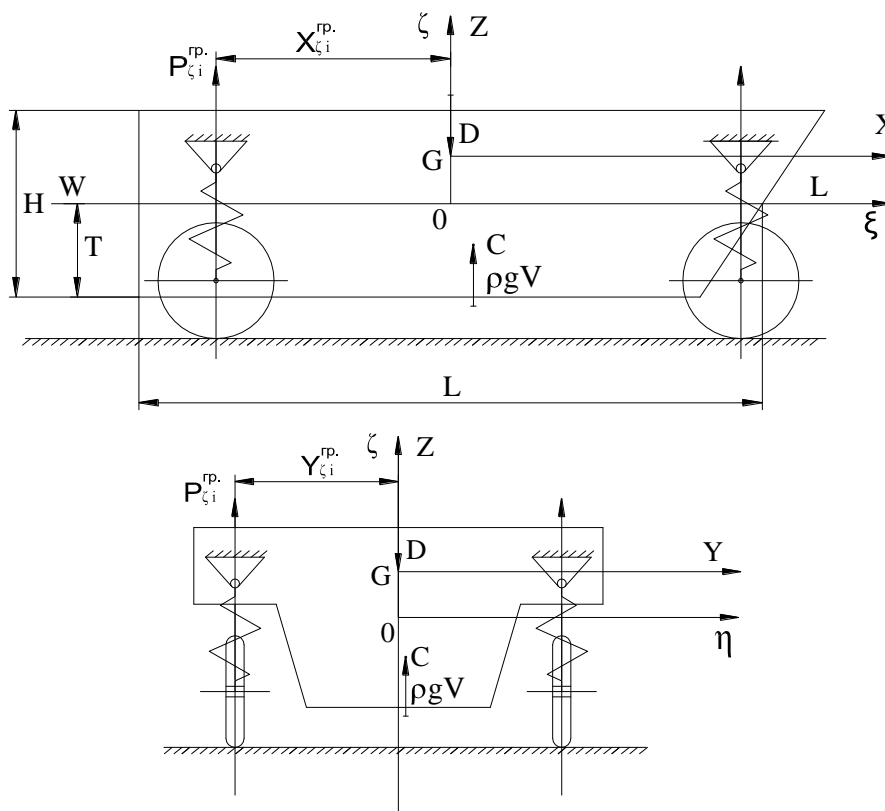
$$\xi_{1c} = \xi_{3c} - \xi_{3g}; \quad \eta_{1c} = \eta_{3c} - \eta_{3g};$$

$$\frac{d\zeta}{dt} = v_\zeta; \quad \frac{d\psi}{dt} = \omega_\eta; \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega_\xi.$$

В уравнениях движения (1) обозначено:  $D$  - сила тяжести корпуса;  $\xi_g, \eta_g$  - абсцисса и ордината центра тяжести судна;  $\rho gV$  - сила плавучести, вычисляемая при данной мгновенной посадке;  $\xi_{1c}, \eta_{1c}$  - абсцисса и ордината центра величины;  $\sum P_i$  - суммарный вес принятых на судно грузов в данный момент времени;  $\xi_{1P_i}, \eta_{1P_i}$  - абсцисса и ордината центра тяжести принятого груза;  $M_{KP}$  - кренящий момент внешних сил, действующих в данный момент времени;  $M_{Диф}$  - дифференцирующий момент внешних сил, действующих в данный момент времени;  $b_{\zeta\zeta}, b_{44}, b_{55}$  - коэффициенты сопротивления воды перемещениям корпуса.

Принимаемые грузы классифицированы так:

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



**Рис. 3. Схема сил, действующих на корпус судна с колесными движителями на упругой подвеске.**

Первые три категории грузов и их действие подробно освещены в литературе по плавучести и остойчивости судов [5]. Четвертая категория грузов нуждается в рассмотрении.

На рис. 3 приведена схема сил, действующих на корпус судна, имеющего колесные движители на упругой подвеске. Поддержание корпуса при погружении в воду частично осуществляется силой плавучести и частично реакциями подвески колес  $\sum P_i^{sp}$ .

Выделим и покажем три возможных расчетных ситуации движения амфибийного судна (рис. 4).

1. Режим движения на колесах по твердой опорной поверхности при полном выходе судна из воды (рис. 4, а). Сила тяжести корпуса полностью компенсируется реакциями подвески:

$$D = \sum P_i^{zp} . \quad (2)$$

2. Режим частичного плавания с касанием колесами опорной поверхности (рис. 4, б). Сила тяжести частично уравновешивается силой плавучести и частично вертикальными реакциями подвески колес:

$$D = \rho g V + \sum P_i^{zp} . \quad (3)$$

3. Режим свободного плавания судна на корпусе (рис. 4, в). Сила тяжести полностью уравновешивается силой плавучести. Колеса свободно висят и не касаются опорной поверхности:

$$D = \rho g V . \quad (4)$$

Обозначения на рис. 4:  $\alpha$  – угол наклона опорной поверхности по направлению движения колеса;  $v$  – скорость продольного движения корпуса, которую будем полагать заданной и постоянной;  $H_{M0}$  – заглубление опорной поверхности под колесом на начальном этапе движения на горизонтальном участке;  $H_{M1}$  – заглубление, при котором колесо отрывается от опорной поверхности и реакция колеса будет равна нулю;  $k_v$  – коэффициент пропорциональности, определенный по такой формуле  $k_v = v \cdot \text{tg} \alpha$ ; А – точка порога опорной поверхности;  $t_{0i}$  – время прохождения  $i$ -м колесом точки А.

В каждом режиме движения определим такие параметры:

$H_M$  – заглубление опорной поверхности (дна) относительно плоскости ватерлинии WL;

$X_{0i}^{zp}$  – горизонтальные координаты опор подвески, определяемые в связанной с корпусом системе координат ( $i=1, \dots, n^{zp}$ );

$Z_{0i}^{zp}$  – аппликаты точки касания колесами опорной поверхности в свободном провисании при свободном плавании в воде, определяемые в связанной геометрической системе координат ( $i=1, \dots, n^{zp}$ );

В алгоритме решения системы уравнений (1) в каждый момент времени должны определяться:

$\zeta_i^{OP}$  – аппликата относительно плоскости WL (в неподвижной системе координат) опорной точки колеса в свободном провисании подвески

$$\zeta_i^{OP} = Z_{0i}^{zp} - T \quad (5)$$

$T$  – заглубление начала связанной геометрической системы координат  $O_3$  относительно плоскости WL (осадка корпуса);

$\zeta_{Mi}^{zp}$  – глубина воды под колесом;

$\Delta \zeta_i^{OP}$  – ход амортизатора подвески колеса

$$\Delta \zeta_i^{OP} = \zeta_i^{zp} + \zeta_i^{OP}; \quad (6)$$

$P_i^{zp}$  – реакция подвески колеса

$$P_i^{zp} = k^{zp} \zeta_i^{OP}; \quad (7)$$

$k^{zp}$  – Коэффициент жесткости амортизатора подвески полагается известным.

Процесс движения судна в продольном направлении заменим изменением глубины воды под колесом (рис. 5):

$$\zeta_{Mi}^{zp} = H_{M0} + k_v (t - t_{0i}). \quad (8)$$

Поскольку горизонтальные перемещения корпуса не оказывают влияние на величину гидростатических сил, такая замена будет правомочна. Вертикальные движения корпуса, крен и дифферент будут происходить правильно.

Осуществим интегрирование численным методом. Блок-схема алгоритма решения системы дифференциальных уравнений (1) приведена в работе [1]. Для вычисления характеристик погруженного объема корпуса и гидростатических сил поддержания применена программа [4], использующая метод поперечных сечений корпуса и правило трапеций с неравноотстоящими ординатами при вычислении определенных интегралов. Исходной информацией являются массивы координат поперечно-вертикальных сечений (шпангоутов) теоретического корпуса.

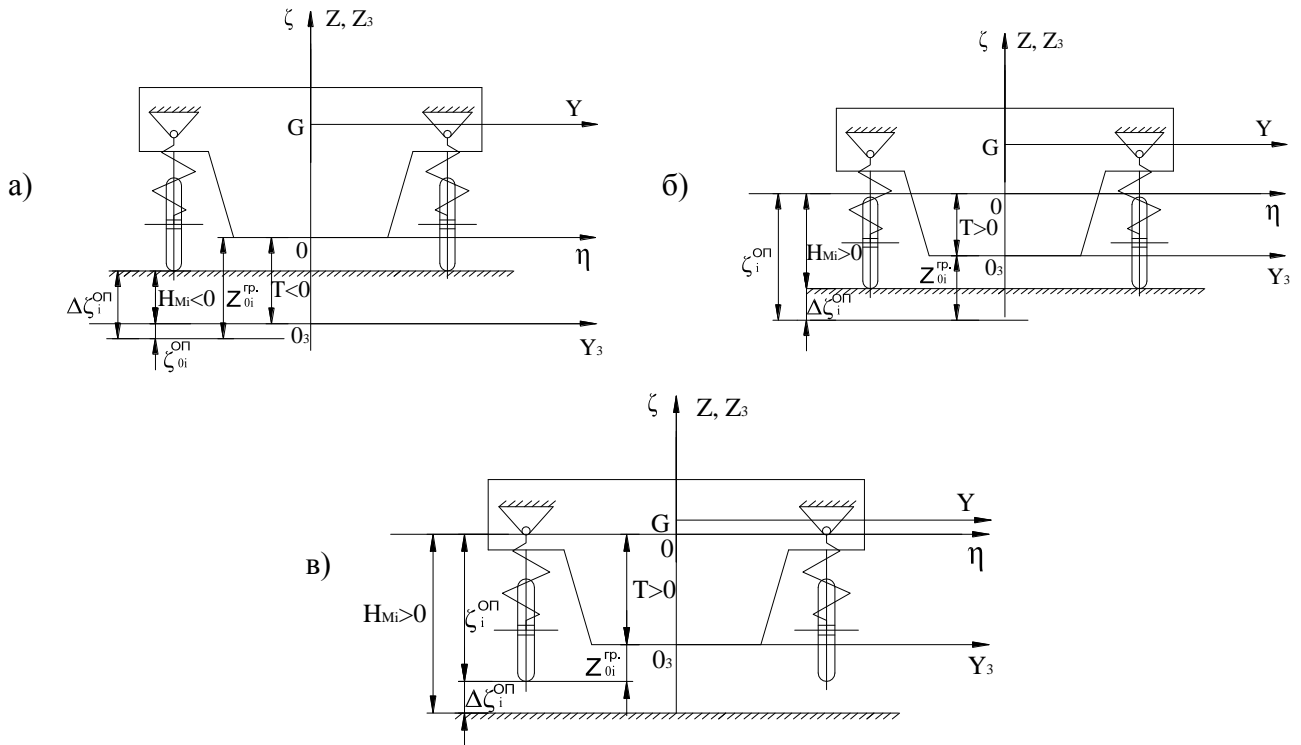


Рис. 4. Расчетные случаи

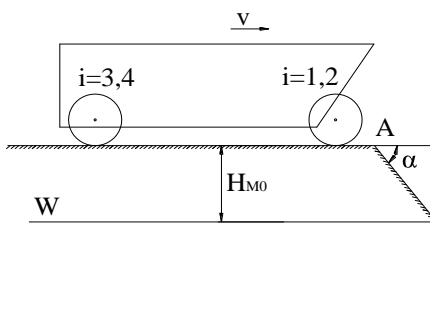


Рис. 5. Расчетная схема глубин при отпуске

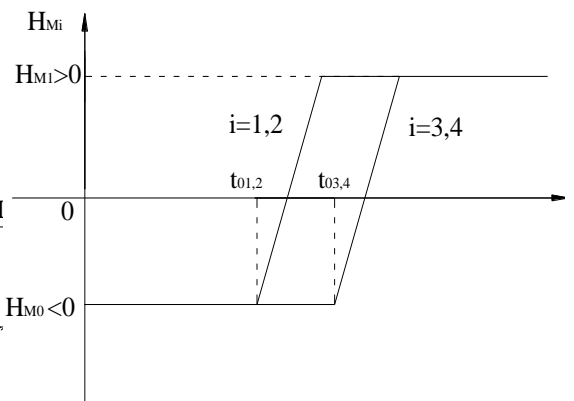


Рис. 6. Аналитическое представление глубин

В качестве примера для иллюстрации расчетов принят корпус небольшого амфибийного судна, главные размеры и характеристики которого:

$$L = 14,0 \text{ м}; B = 2,4 \text{ м}; T = 1,3 \text{ м}; H = 2,0 \text{ м}; D = 43 \text{ т}; Z_g = 0,8 \text{ м}.$$

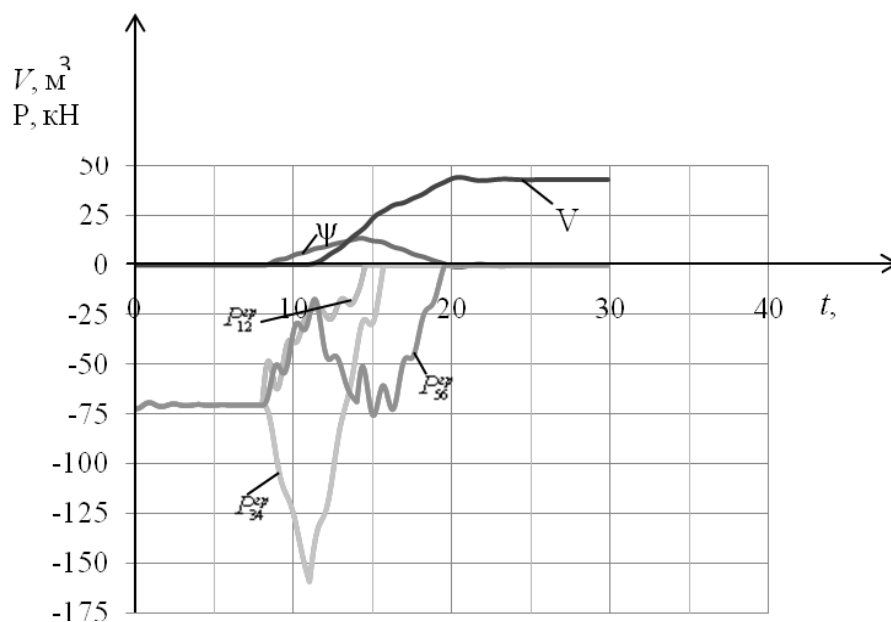
**Таблица 1**  
**Координаты центров осей колес по времени**

$X_{01} = 6,0$	$Y_{01} = 1,1$	$Z_{01} = 1,0$	$t_{01} = 8,0$
$X_{02} = 6,0$	$Y_{02} = -1,1$	$Z_{02} = 1,0$	$t_{02} = 8,0$
$X_{03} = 0$	$Y_{03} = 1,1$	$Z_{03} = 1,0$	$t_{03} = 11,0$
$X_{04} = 0$	$Y_{04} = -1,1$	$Z_{04} = 41,0$	$t_{04} = 11,0$
$X_{05} = -6,0$	$Y_{05} = 1,1$	$Z_{05} = 1,0$	$t_{05} = 14,0$
$X_{06} = -6,0$	$Y_{06} = -1,1$	$Z_{06} = 1,0$	$t_{06} = 14,0$

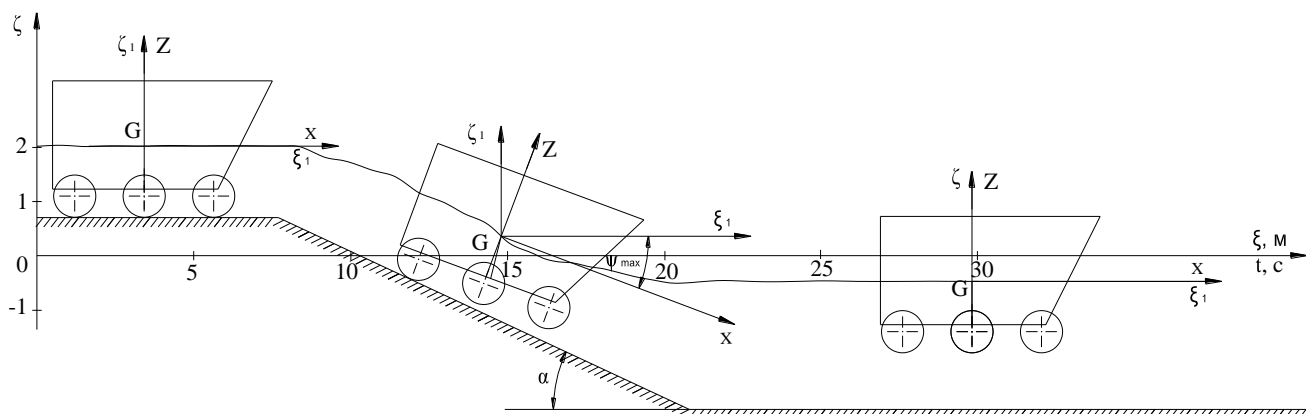
$k^{ep} = 180 \text{ кН/м}$  ;  $\alpha = 14 \text{ град.}$ ;  $v = 2 \text{ м/с}$ .

$H_{M0} = -0,6 \text{ м}$ ;  $H_{M1} = 4,0 \text{ м}$  – при спуске;

$H_{M0} = 4,0 \text{ м}$ ;  $H_{M1} = -0,6 \text{ м}$  – при выходе.



**Рис. 7. Зависимости водоизмещения, реакции подвески колес и угла дифферента от времени**



**Рис. 8. Траектория движения центра тяжести G по времени**

По разработанному алгоритму и программе выполнены расчет динамики судна при спуске в воду.

В начальном состоянии судно двигалось поступательно по горизонтальному участку

твердой поверхности, возвышающейся над плоскостью воды 0.60 метра, с постоянной скоростью 2 м/с. За порогом уклон дна составлял 14 градусов. Глубина водоема составляла 4.0 метра. Результаты расчета представлены на рис. 6, 7 и 8.

### Выводы

1. Анализ результатов позволяет определить динамику корпуса при спуске на воду и действии изменяющихся во времени внешних сил, а также оценить опасные движения корпуса с точки зрения остойчивости и незаливаемости.

2. Определяются нагрузки на колеса, знание которых необходимо для оценки прочности подвески и возможности обеспечения колесами движущей силы.

3. Определяется положение мгновенной ватерлинии на корпусе, которое необходимо для анализа остойчивости. Определяется заглубление судового движителя (гребного винта) в воду, которое также необходимо знать для его включения с целью продолжения движения судна в воде после всплытия.

### Библиографический список

1. Ваганов, А.Б. Динамика неравнообъемных наклонений судна при внезапном изменении нагрузки / А.Б. Ваганов, Н.Т. Нгуен // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 3.
2. Ваганов, А.Б. Динамика судна при сложном внезапном воздействии внешних сил нагрузки / А.Б. Ваганов, Н.Т. Нгуен // Вестник АГТУ. – 2014. – № 36.
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. 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 2 т. Т. 1. – 2-е изд., перераб. и доп. Статика корабля. – Л.: Судостроение, 1976.

Дата поступления  
в печать 26.10.2015

A. B. Vaganov<sup>1</sup>, Nguyen Ngoc Than<sup>2</sup>

### THE DYNAMICS OF MOVEMENT OF AMPHIBIOUS VESSEL DURING ENTERING AND EXITING THE WATER

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeev<sup>1</sup>,  
Socialist Republic of Vietnam<sup>2</sup>

**The purpose:** A study of movement of a displacement amphibious vessel when entering the water and exiting the water.

**Method:** When entering the water and exiting the water on displacement amphibious vessel there are different forces of different categories. The system of equations by the method of "dynamics" was used to describe the movement. When entering the water the vessel is divided into three modes: the mode of movement on wheels on a hard surface, the partial mode of navigation with touch wheels and a free-floating mode. The calculation is made with the numerical method Runge-Kutta 4 using PEVM.

**Results:** According to the results of the calculation, it is possible to determine changes of the reaction of wheel suspension, of trim angle and of displacement.. During the descent into the water the reaction of suspension from each pair of wheels are different and change rapidly. For a given initial condition of the vessel, the trim angle appears during descent and vanishes under the regime of free navigation.

**Conclusions:** When entering the water and exiting the water, the movement of a displacement vessel is complex, depending on the conditions, it is possible to determine the load on the wheels to assess the strength of the suspension, as well as to assess the risk of the vessel movement from the point of view of stability and deck-dryness.

*Key words:* amphibious vessel, stability, deck-dryness, trim, dynamic load.