

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.5

*Абдуллаева З.М., Асланов Г.К., Яхьяев М.Л.*

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ СУДНА НА МЕЛКОВОДЬЕ

*Abdullaeva Z.M., Aslanov G.K., Yakhyaev M.L.*

### THE SIMULATION RESULTS OF THE BOAT IN SHALLOW WATER

*Рассматриваются вопросы движения судна на мелководье с постоянной и переменной глубиной. Получены уравнения динамики судна, позволяющие учитывать влияние мелководья на динамику судна путем подстановки в коэффициенты при уравнениях движения судна на глубокой воде отношения осадки судна к глубине акватории. Разработана математическая модель движения судна по заданной кривой траектории на мелководье при переменной глубине.*

**Ключевые слова:** гидродинамические коэффициенты, уравнения гидродинамики судна, мелководье, моделирование.

*The questions are considered of the movement vessel in shallow with constant and variable depth. The equations of dynamics vessel are obtained, permitting to allow the impact on the dynamics of shallow vessel by substituting the coefficients of the equations of motion the vessel in deep water relations draft of the vessel to the depth of the waters. The mathematical model has been developed of the vessel on a given curve trajectory in shallow at variable depth.*

**Key words:** hydrodynamic coefficients, equations of hydrodynamic of the vessel, shallow, modeling.

Одним из путей повышения эффективности работы морского флота является обеспечение безопасного плавания средне и крупнотоннажных судов на мелководье, что приводит к ужесточению требований по обеспечению безопасности плавания.

При плавании на мелководье приходится учитывать соотношение между глубиной и осадкой, так как на мелководье возникают силы гидродинамического взаимодействия корпуса судна и грунта, существенно влияющие на поведение судна.

Моделирование движения судна на мелководье является актуальной задачей. Сравнительный анализ математических моделей движения судна на

мелкой и глубокой воде разных авторов показал, что нет единой модели описывающей движения судна на глубокой воде.

В качестве модели движения судна на глубокой воде возьмем систему безразмерных дифференциальных уравнений для малых отклонений судна от криволинейной траектории в связанной с судном системе координат согласно [1].

$$\begin{aligned} m_{22}\dot{\beta} + \bar{n}_y^\beta \beta - \bar{n}_y^\omega \omega + n\beta\omega \operatorname{sign}(\beta, \omega) &= n_y^\delta \delta \\ m_{66}\dot{\omega} - \bar{m}_y^\beta \beta - \bar{m}_y^\omega \omega - m\beta\omega \operatorname{sign}(\beta, \omega) &= n_y^\delta \delta \bar{l}_p \\ \left( \frac{\dot{\bar{V}}}{\bar{V}} \right) + \beta \left( \frac{m_{22}}{m_{11}} \omega - \dot{\beta} \right) &= \frac{1}{m_{11}} (n_p - n_x) \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\bar{V}$  - линейная (приведенная) скорость судна  $\bar{V} = \frac{V}{V_0}$ ;  $V$  - текущее значение линейной скорости судна;  $V_0$  - начальное значение линейной скорости судна;  $\beta$  - угол дрейфа;  $\bar{\omega}$  - безразмерная угловая скорость судна  $\bar{\omega} = \frac{\Omega L}{V_0}$ ;  $L$  - длина судна между перпендикулярами;  $\Omega$  - угловая скорость судна;  $m_{11}$ ,  $m_{22}$ ,  $m_{66}$  - безразмерные гидродинамические коэффициенты;

$\tau$  - безразмерное время  $\tau = \frac{V_0}{L}$ ;  $n_x$  - безразмерный коэффициент сопротивления движению судна;  $n_p$  - безразмерный коэффициент тяги движителей;  $m_y^\omega, n_y^\beta, n_y^\omega, m_y^\beta$  - гидродинамические коэффициенты корпуса судна, причем;  $m_y^\omega$  - гидродинамический коэффициент вращательной производной горизонтального момента;  $n_y^\beta$  - гидродинамический коэффициент позиционной производной поперечной силы;  $n_y^\omega$  - гидродинамический коэффициент вращательной производной поперечной силы;  $m_y^\beta$  - гидродинамический коэффициент позиционной производной горизонтального момента.  $n_y^\omega, m_y^\beta$  характеризуют линейные компоненты зависимости поперечной силы и горизонтального момента на корпусе от угловой скорости и называются вращательными производными.

По аналогии с ними значения  $n_y^\beta, m_y^\beta$  называются позиционными производными.

$n_y^\delta$  - коэффициент, характеризующий эффективность установленных на судне средств управления;  $\delta$  - угол перекладки руля, выраженный в радианах и от считываемый от диаметральной плоскости судна, причем перекладка руля на правый борт соответствует  $\delta > 0$  а на левый борт значению  $\delta < 0$ ;  $\bar{l}_p$  - приведенное отстояние баллера руля от центра тяжести судна (безразмерное плечо руля);  $n, m$  - коэффициенты нелинейности поперечной силы и

момента.

Обычно исследователя интересуют размерные уравнения. После приведения указанных уравнений к размерному виду получены уравнения:

$$\left. \begin{aligned}
 & \frac{d\beta}{dt} = \frac{V_0 \sigma \rho W}{2C_e B(\rho W + \lambda_{22})} \times (n_y^\delta \delta - \beta(n_y^\beta) + \\
 & + n_y^\delta \chi_\beta \left[ 1 - \frac{F'_{p+pn}}{F_{p+pn}} \left( \frac{\sqrt{1 + \sigma_p} - 1}{1 + \sqrt{1 + \sigma_p}} \right) \right] + \sum_e n_{ye}^\beta \chi_{\beta e} \right) + \\
 & + \Omega \frac{L}{V_0} \left( -n_y^\omega - n_y^\delta \frac{l_p}{L} \chi_\omega \left[ 1 - \frac{F'_{p+pn}}{F_{p+pn}} \left( \frac{\sqrt{1 + \sigma_p} - 1}{1 + \sqrt{1 + \sigma_p}} \right) \right] + \sum_e n_{ye}^\beta \chi_{\omega e} \frac{l_e}{L} \right) \\
 & + 2 \frac{C_e B}{\sigma L} \left( \frac{\rho W + \lambda_{11}}{\rho W} \right) - n \beta \Omega \frac{L}{V_0} \operatorname{sign} \left( \beta, \Omega \frac{L}{V_0} \right) \\
 \\
 & \frac{d\Omega}{dt} = \frac{V_0^2 \sigma \rho W \rho_z^2}{2C_e B L \rho_z^{-2} (\rho W \rho_z^2 + \lambda_{66})} (n_y^\delta \delta l_p + \beta(m_y^\beta - \\
 & - n_y^\delta \frac{l_p}{L} \chi_\beta \left[ 1 - \frac{F'_{p+pn}}{F_{p+pn}} \left( \frac{\sqrt{1 + \sigma_p} - 1}{1 + \sqrt{1 + \sigma_p}} \right) \right] - \sum_e n_{ye}^\beta \chi_{\beta e} \frac{l_e}{L} ) + \\
 & + \Omega \frac{L}{V_0} \left( m_y^\omega - n_y^\delta \left( \frac{l_p}{L} \right)^2 \chi_\omega \left[ 1 - \frac{F'_{p+pn}}{F_{p+pn}} \left( \frac{\sqrt{1 + \sigma_p} - 1}{1 + \sqrt{1 + \sigma_p}} \right) \right] - \sum_e n_{ye}^\beta \chi_{\omega e} \left( \frac{l_e}{L} \right)^2 \right) + \\
 & + m \beta \Omega \frac{L}{V_0} \operatorname{sign} \left( \beta, \Omega \frac{L}{V_0} \right) \\
 \\
 & \frac{dV}{dt} = \frac{V V_0}{L} \left[ \frac{\sigma \rho W L}{2C_e B(\rho W + \lambda_{11})} \times \left( n_{x0} \left( \frac{V}{V_0} \right)^3 - n_{x0} + 0.3 \frac{D_B^2}{\sigma L T} \left( \frac{\Omega L}{V_0} \right)^2 - 0.4 n_y^\delta \delta^2 \right) - \right. \\
 & \left. - \beta \left( \frac{(\rho W + \lambda_{22}) \Omega L}{(\rho W + \lambda_{11}) V_0} + \frac{d\beta}{dt} \frac{L}{V_0} \right) \right];
 \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где:

$\bar{l}_e$  – отстояние диска винта от центра тяжести корабля  $\bar{l}_e = \frac{l_e}{L}$ ;

$\chi_\beta$  – поправка, учитывающая справляющее действие корпуса на скос у руля, обусловленный углом дрейфа;

$\chi_{\omega}$  – поправка, учитывающая справляющее действие корпуса на скос у руля, обусловленный кривизной траектории;

$F'_{p+pn}$  - площадь руля и рудерпоста, попадающая в струю винта;

$F_{p+pn}$  - площадь руля и рудерпоста, соответствующая осадке судна кормой ( $T_K$ );

$\sigma_p$  - коэффициент нагрузки винта;

$\sum_{\epsilon}$  - число винтов;

$n_{y\epsilon}^{\beta}$  - позиционная производная безразмерного коэффициента поперечной силы от винта;

$\chi_{\beta\epsilon}$  - поправка учитывающая, спрямляющее действие корпуса на скос у винта от угла дрейфа;

$\chi_{\omega\epsilon}$  - поправка учитывающая, спрямляющее действие корпуса на скос у винта от кривизны траектории;

$\bar{n}_y^{\omega}$  - гидродинамический коэффициент вращательной производной поперечной силы;

$C_b$  – коэффициент общей полноты;

$B$  – ширина судна по действующую ватерлинию;

$\sigma$  - коэффициент полноты площади диаметральной плоскости;

$\rho$  - массовая плотность жидкости (воды);

$\rho_z$  – радиус инерции массы корпуса относительно вертикальной оси;

$W$  – объемное водоизмещение, рассчитываемое через произведение главных размерений и коэффициентов общей полноты  $C_b$ :  $W=C_b \times L \times B \times T$ .

Коэффициенты при уравнениях динамики судна зависят от отношения осадки судна к глубине акватории, в котором происходит плавание. Всего от отношения осадки судна к глубине зависят 17 коэффициентов. Поэтому при моделировании исследователю приходится каждый раз для каждой осадки и глубины пересчитывать коэффициенты при уравнениях динамики, что занимает много времени.

Ставится задача аппроксимировать представленные в виде графиков коэффициенты влияния мелководья в виде математических зависимостей.

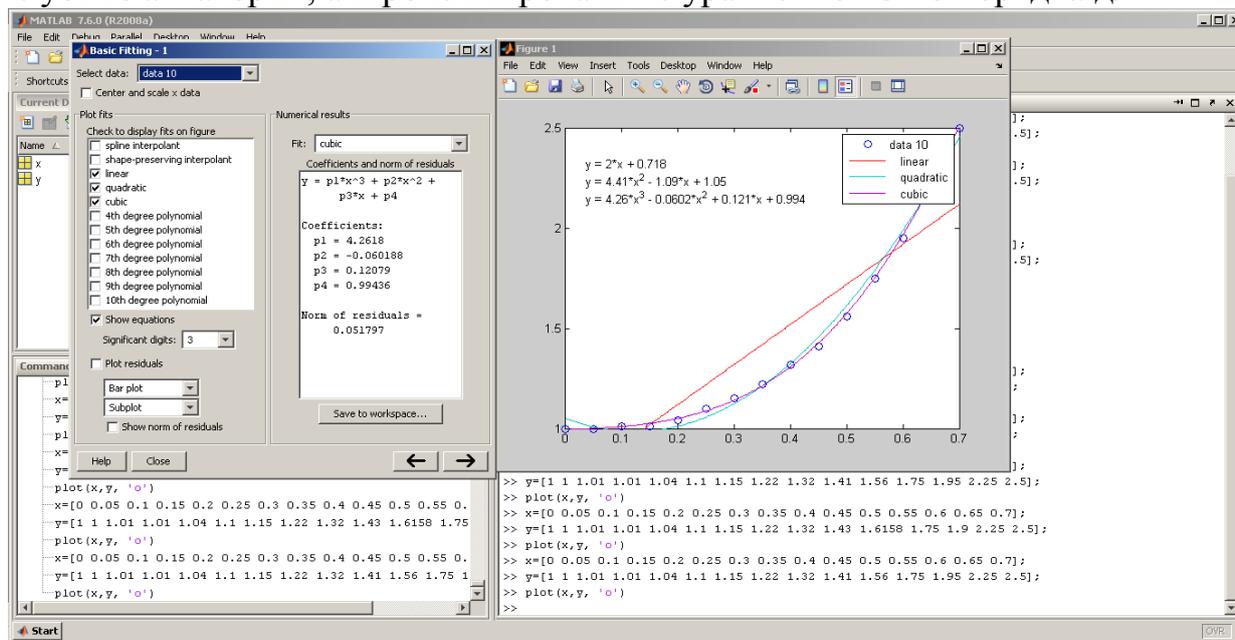
В [2] получены уравнения, учитывающие влияние мелководья на динамику судна с аппроксимацией кривых влияния мелководья на гидродинамические коэффициенты с помощью кривых третьего порядка.

Проведенный анализ показал, что при аппроксимации с помощью уравнений второго порядка максимальная средняя квадратическая погрешность аппроксимации доходит до 6 %, что неприемлемо.

Была поставлена задача осуществить аппроксимацию с точностью до 2%.

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{d\beta}{dt} &= \frac{V_0 \sigma \rho W}{2C_e B (\rho W + \lambda_{22} \left[ a_1 \left( \frac{T}{H} \right)^3 + b_1 \left( \frac{T}{H} \right)^2 + c_1 \left( \frac{T}{H} \right) + I \right])} \times \left( n_y^\delta \delta - \beta \left[ n_y^\beta \left[ a_2 \left( \frac{T}{H} \right)^3 + b_2 \left( \frac{T}{H} \right)^2 + c_2 \left( \frac{T}{H} \right) + I \right] \right] + \right. \\
 &+ n_y^\delta \chi_\beta \left[ 1 - \frac{F'_{p+pn}}{F_{p+pn}} \left( \frac{\sqrt{I+\sigma_p} - I}{I + \sqrt{I+\sigma_p}} \right) \right] + \sum_\epsilon n_{ye}^\beta \chi_{\beta\epsilon} \left. \right) + \Omega \frac{L}{V_0} \left( -n_y^\omega \left[ a_3 \left( \frac{T}{H} \right)^3 - b_3 \left( \frac{T}{H} \right)^2 + c_3 \left( \frac{T}{H} \right) + I \right] - \right. \\
 &- n_y^\delta \frac{l_p}{L} \chi_\omega \left[ 1 - \frac{F'_{p+pn}}{F_{p+pn}} \left( \frac{\sqrt{I+\sigma_p} - I}{I + \sqrt{I+\sigma_p}} \right) \right] + \sum_\epsilon n_{ye}^\beta \chi_{\omega\epsilon} \frac{l_\epsilon}{L} \left. \right) + 2 \frac{C_e B}{\sigma L} \left( \frac{\rho W + \lambda_{11} \left[ a_1'' \left( \frac{T}{H} \right)^3 + b_1'' \left( \frac{T}{H} \right)^2 + c_1'' \left( \frac{T}{H} \right) + I \right]}{\rho W} \right) - \beta \Omega \frac{L}{V_0} \operatorname{sign} \left( \beta, \Omega \frac{L}{V_0} \right) \times \\
 &\times \left[ \beta \pi \frac{T}{L} \left( A_1 \left( \frac{T}{H} \right)^3 + A_2 \left( \frac{T}{H} \right)^2 + A_3 \left( \frac{T}{H} \right) + I \right) + \beta |\beta| \left( \left( 1,055 + 0,251 \frac{B}{T} + 0,021 \left( \frac{B}{T} \right)^2 + 12,49 \frac{T}{L} + 0,0244 \frac{L}{T} - a_k \right) \times \right. \right. \\
 &\times \left. \left. \left( 3,34 \left( \frac{T}{H} \right)^2 - 0,234 \left( \frac{T}{H} \right) + I \right) \right) + \frac{\Omega L}{V_0} \left( A_5 \left( \frac{T}{H} \right)^3 + A_6 \left( \frac{T}{H} \right)^2 + A_7 \left( \frac{T}{H} \right) + I \right) + \beta \frac{\Omega L}{V_0} \left( A_9 \left( \frac{T}{H} \right)^3 + A_{10} \left( \frac{T}{H} \right)^2 + A_{11} \left( \frac{T}{H} \right) + I \right) \right]; \\
 \\
 \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{V_0^2 \sigma \rho W \rho_z^2}{2C_e B L \rho_z^{-2} (\rho W \rho_z^2 + \lambda_{66} \left[ a_1' \left( \frac{T}{H} \right)^3 + b_1' \left( \frac{T}{H} \right)^2 + c_1' \left( \frac{T}{H} \right) + I \right])} \times \left( n_y^\delta \delta l_p + \beta \left[ m_y^\beta \left[ a_2' \left( \frac{T}{H} \right)^3 + b_2' \left( \frac{T}{H} \right)^2 + c_2' \left( \frac{T}{H} \right) + I \right] - \right. \right. \\
 &- n_y^\delta \frac{l_p}{L} \chi_\beta \left[ 1 - \frac{F'_{p+pn}}{F_{p+pn}} \left( \frac{\sqrt{I+\sigma_p} - I}{I + \sqrt{I+\sigma_p}} \right) \right] - \sum_\epsilon n_{ye}^\beta \chi_{\beta\epsilon} \frac{l_\epsilon}{L} \left. \right) + \Omega \frac{L}{V_0} \left( m_y^\omega \left[ a_3' \left( \frac{T}{H} \right)^3 - b_3' \left( \frac{T}{H} \right)^2 + c_3' \left( \frac{T}{H} \right) + I \right] - \right. \\
 &- n_y^\delta \left( \frac{l_p}{L} \right)^2 \chi_\omega \left[ 1 - \frac{F'_{p+pn}}{F_{p+pn}} \left( \frac{\sqrt{I+\sigma_p} - I}{I + \sqrt{I+\sigma_p}} \right) \right] - \sum_\epsilon n_{ye}^\beta \chi_{\omega\epsilon} \left( \frac{l_\epsilon}{L} \right)^2 \left. \right) + \beta \Omega \frac{L}{V_0} \operatorname{sign} \left( \beta, \Omega \frac{L}{V_0} \right) \times \left[ \beta \left( 3,36 \left( \frac{T}{L} + 0,0136 \right) \times (2S_k/LT + a_k) \right) \times \right. \\
 &\times \left. \left( B_1 \left( \frac{T}{H} \right)^3 + B_2 \left( \frac{T}{H} \right)^2 + B_3 \left( \frac{T}{H} \right) + I \right) - \left( 0,1595 - 0,0469 \frac{B}{T} + 0,00375 \left( \frac{B}{T} \right)^2 \right) \times \left( B_5 \left( \frac{T}{H} \right)^3 + B_6 \left( \frac{T}{H} \right)^2 + B_7 \left( \frac{T}{H} \right) + I \right) \right]; \\
 \\
 \frac{dV}{dt} &= \frac{V_0^2}{LV} \left[ \frac{\sigma \rho L W}{2C_e B \left( \rho W + \lambda_{11} \left[ a_1'' \left( \frac{T}{H} \right)^3 + b_1'' \left( \frac{T}{H} \right)^2 + c_1'' \left( \frac{T}{H} \right) + I \right] \right)} \times \left( n_{x0} \left( \left( \frac{V_0}{V} \right)^3 - 1 \right) + 0,3 \frac{D_B^2}{\sigma L T} \left( \frac{\Omega L}{V_0} \right)^2 - 0,4 n_y^\delta \delta^2 \right) - \right. \\
 &\left. - \beta \frac{\left( \left( \rho W + \lambda_{22} \left[ a_1 \left( \frac{T}{H} \right)^3 - b_1 \left( \frac{T}{H} \right)^2 + c_1 \left( \frac{T}{H} \right) + I \right] \right) \right) \frac{\Omega L}{V_0} - \frac{d\beta}{dt} \frac{L}{V_0}}{\left( \rho W + \lambda_{11} \left[ -a_1'' \left( \frac{T}{H} \right)^3 + b_1'' \left( \frac{T}{H} \right)^2 - c_1'' \left( \frac{T}{H} \right) + I \right] \right)} \right];
 \end{aligned} \right. \quad (3)$$

На рис.1 приведена экранная форма аппроксимации кривой влияния мелководья на кинематические характеристики судна, в частности для k22 для значения  $\lambda = 0,09$ , определяемые в функции отношения осадки судна к глубине акватории, аппроксимированные уравнением 3-го порядка для k22



**Рисунок 1** - Экранная форма аппроксимации кривой влияния мелководья на кинематические характеристики судна k22 для значения  $\lambda = 0,09$

Как указывалось выше, надо было аппроксимировать 17 кривых, из которых мы нашли в литературе аппроксимирующие формулы для 5 кривых, а остальные кривые были аппроксимированы нами. [3, 4]

После подстановки в уравнениях, гидродинамика судна математических зависимостей от коэффициентов гидродинамики судна от отношения осадки судна к глубине акватории, получим следующие уравнения (3), где  $S_k$  – площадь, дополняющая диаметрально плоскость в корме судна до прямоугольника,  $D_B$  – диаметр гребневого винта.

По этим уравнениям могут быть вычислены угол дрейфа, угловая и линейная скорости судна при маневрировании на мелководье.

Следует отметить, что размерные уравнения получены в связанной с судном системе координат.

Нас же интересует движение судна в связанной с землей системе координат. Уравнения движения судна в связанной с землей системе координат будет иметь вид (4):

$$\theta = k + \beta ; k = k_0 + \int \frac{\Omega L}{V_0} dt; x = x_0 + \int \frac{V}{V_0} \cos \theta dt; y = y_0 + \int \frac{V}{V_0} \sin \theta dt. \quad (4)$$

где  $\theta$  – угол между направлением на север и вектором скорости судна;

$k$  – курс судна;

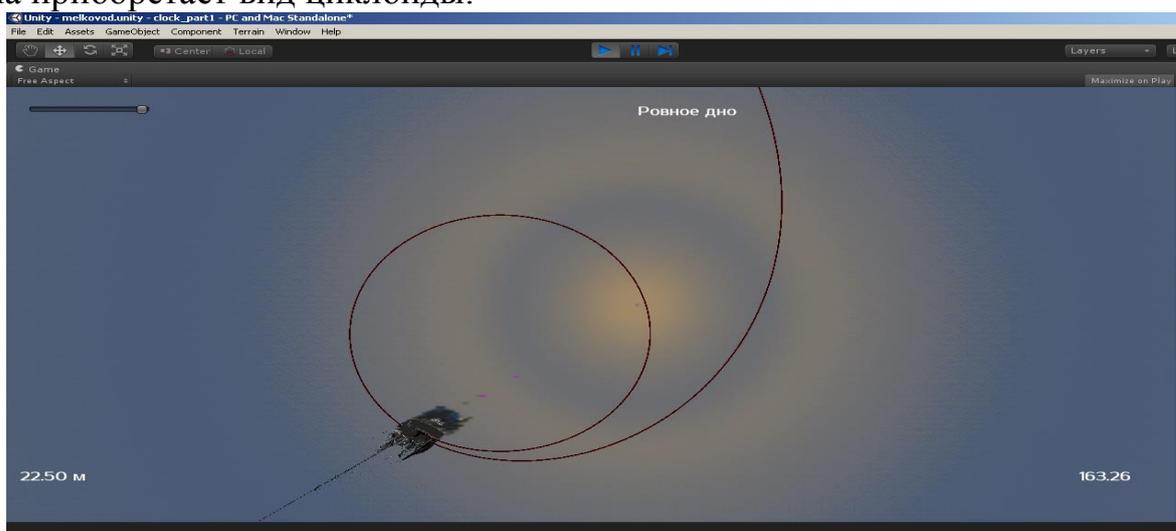
$k_0$  – курс судна в начальный момент времени;

$x, y$  – текущие координаты судна;

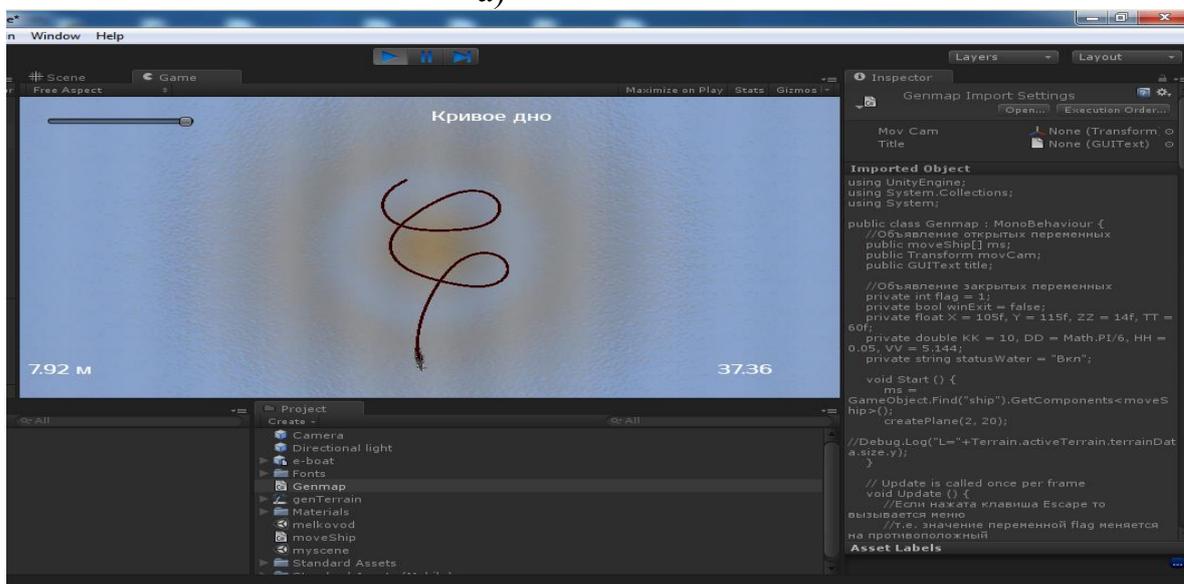
$x_0, y_0$  – координаты судна в начальный момент времени.

По приведенным выше уравнениям была осуществлена их программная реализация.

В доступной нам литературе моделирование движения судна на мелководье осуществлялось при постоянной заданной глубине акватории. Разработанная нами модель позволяет задать профиль дна с помощью различных наклонных плоскостей и поверхностей второго порядка. Если руль удерживать под постоянным углом перекладки, то судно будет двигаться по некоторой криволинейной траектории, называемой циркуляцией. Проведенный сравнительный анализ движения судна на мелкой и глубокой воде показал, что при движении судна на мелководье, в частности, увеличивается радиус циркуляции. Как видно из рисунка 2, кривая циркуляции при переменной глубине получается совершенно иной, т. е. при переходе от глубокой воды на мелководье радиус циркуляции увеличивается, и траектория движения судна приобретает вид циклоиды.



а)

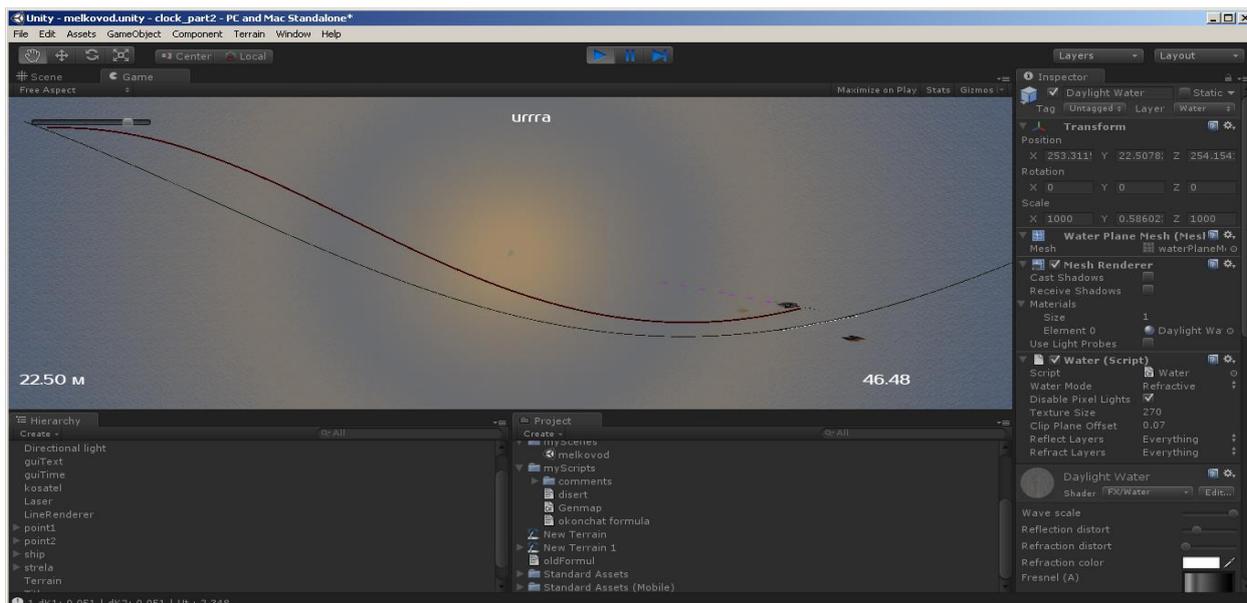


б)

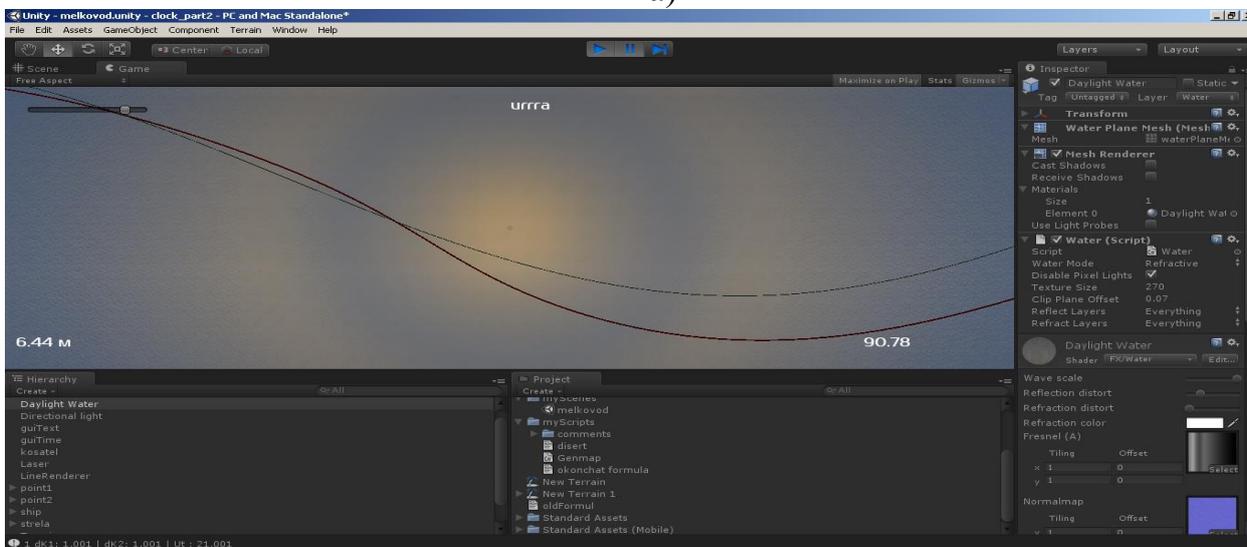
**Рисунок 2 - Циркуляция судна на мелководье:**  
 а) при постоянной глубине б) при переменной глубине

На рисунке 2 а) приведены результаты моделирования циркуляции судна на мелководье при постоянной глубине, а на рисунке 2 б) на мелководье при переменной глубине. На рисунке 2 б) цифры рядом с моделью судна показывают глубину под судном.

В программе, при движении судна в акватории с переменной глубиной перед каждым шагом вычислений определяется глубина, по которой производится перерасчет коэффициентов при уравнениях гидродинамики судна, по этим уравнениям определяются координаты судна. Эта операция повторяется при каждом шаге. На рисунке 3 приведены экранные формы результатов моделирования движения судна по заданной криволинейной траектории а) при постоянной и б) переменной глубине акватории.



а)



б)

**Рисунок 3 - Экранные формы результатов моделирования движения судна по криволинейной траектории а) при постоянной и б) переменной глубине акватории**

Из рисунка 3 б) видно, что при движении судна на мелководье при переменной глубине по заданной траектории получается большой выброс от заданной траектории, что можно объяснить ухудшением управляемости судна на мелководье.

Исследование модели подтверждают известную из практики истину о том, что на мелководье при переменной глубине значительно ухудшается управляемость судна.

### **Библиографический список:**

1. Соболев Г. В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения: Учебник для вузов. Л.: Судостроение, 1976.
2. Асланов Г. К. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему: «Исследование систем автоматического вождения судов по ведущему кабелю». Ленинградское высшее инженерное морское училище им. адмирала Макарова, Ленинград, 1981. 124с.
3. Асланов Г.К., Абдуллаева З.М. Моделирование влияния мелководья на гидродинамические коэффициенты при уравнениях гидродинамики судна // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки -2011. - №22. – С.54-58.
4. Асланов Г.К., Абдуллаева З.М. Математическая модель движения судна на мелководье // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки - 2012. - №27. – С.36-41.

**УДК 556.382**

*Акаев А.И., Ниналалов А.И.*

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕПЛОТДАЧИ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ**

*Акаев А.И., Ninalalov A.I.*

## **METHOD OF CALCULATING THE OPTIMAL HEAT EMISSION GEOTHERMAL WELLS**

*В работе дается упрощенная методика расчета оптимальных режимов фонтанной и насосной эксплуатации геотермальных скважин, уменьшающая солеотложение и коррозию при эксплуатации. Приводится сравнительная характеристика по количественной оценке теплоотдачи пласта для указанных способов эксплуатации при одинаковых давлениях на устье скважины. Задача решается графоаналитическим методом на основе баланса давлений в скважине с учетом термолифта.*