

УДК 681.142

А.Ю.Каверинский¹, С.Л.Карлинский¹

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДВИЖЕНИЯ ПЛ ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ВЫПОЛНЕНИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ МАНЕВРОВ

Компьютерное моделирование является важным методом анализа качества управления и безопасности движения кораблей и подводных лодок. В последние годы численное моделирование является основой методологии, применяемой при проектировании подводных лодок, а также создании алгоритмов управления движением (режимы стабилизации, маневрирования). Вместе с тем, очевидно, что доказательство адекватности компьютерной модели может быть получено путем сопоставления результатов выполнения заданного в эксперименте маневра подводной лодки с результатами компьютерного моделирования того же маневра. Методология сопоставления результатов (идентификации математического описания характеристик корпуса и органов управления) и критерии адекватности являются предметом настоящей статьи. Применение метода демонстрируется на экспериментальных данных, полученных при вертикальных маневрах подводной лодки.

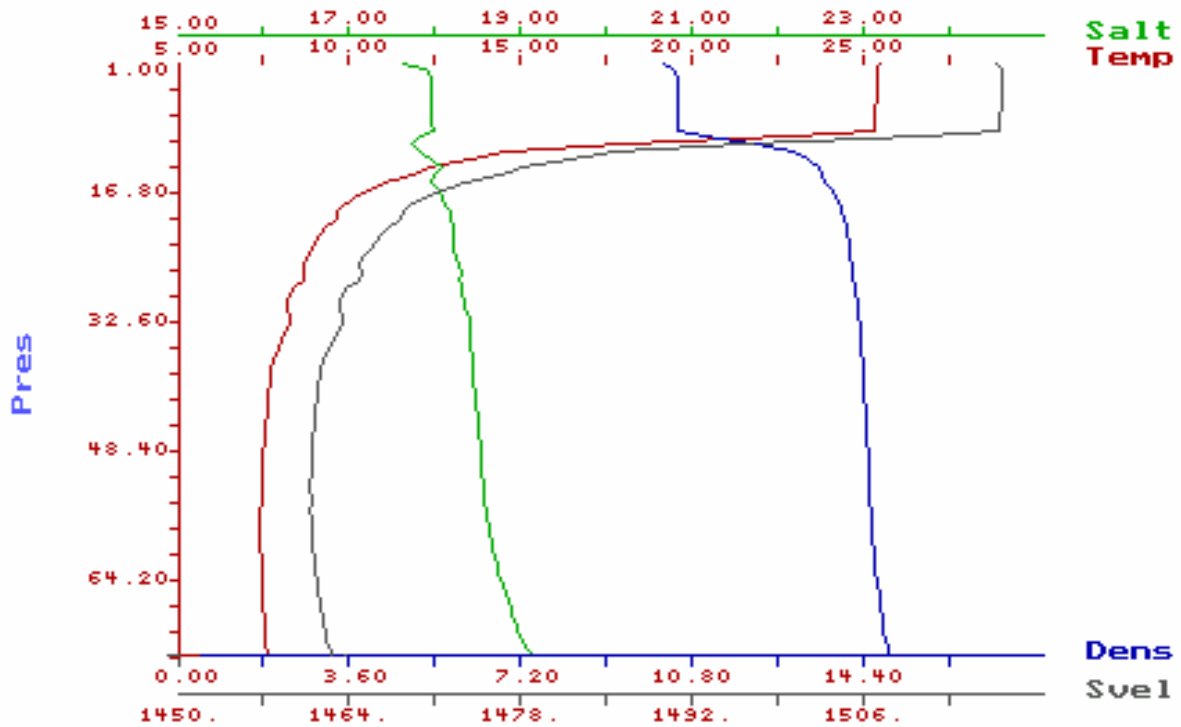
Компьютерное моделирование является важным методом анализа качества управления и безопасности движения кораблей и подводных лодок. В последние годы численное моделирование является основой методологии, применяемой при создании алгоритмов управления движением подводных лодок (режимы стабилизации, маневрирования) и проверки эффективности противоаварийных мероприятий. С 60-х годов прошлого века создан ряд математических моделей движения подводных лодок (Патрашев, Калачева, Мазор, Рождественский, Митрофанов и др.), предназначенных для моделирования в области малых углов атаки и дрейфа, больших углов атаки и дрейфа (движение без хода). Многообразие и сложность задач описания движения подводных лодок привели к тому, что ни одна математическая модель не претендует на охват всех возможных режимов движения, но и при этом слабым местом всех существующих моделей является отсутствие или ненадежность доказательства их адекватности в оговоренной области применения. Вместе с тем, очевидно, что доказательство адекватности компьютерной модели может быть получено путем сопоставления результатов выполнения заданного в эксперименте маневра подводной лодки с результатами компьютерного моделирования того же маневра. Способ сопоставления и критерии адекватности являются предметом настоящей статьи. В настоящей статье не рассматриваются детали математического представления (например, разложения в ряд) гидродинамических характеристик и идентификации коэффициентов разложения, а математическая модель принимается в законченном виде, реализованная как компьютерная модель в программе «Динамика» ЦКБ МТ «Рубин» (см. [1]).

Натурный эксперимент. Для верификации математической модели «Динамика» и реализующей ее компьютерной программы моделирования было проведено сопоставление расчетных результатов с данными натурального эксперимента. Натурные данные были получены в ходе эксперимента на подводной лодке проекта 877 на Феодосийском полигоне Черного моря 1 - 7 августа 2005 г. Гидрологические условия характеризовались сильной стратификацией моря по температуре и плотности (см. рис. 1). Для процедуры вери-

¹ ФГУП ЦКБ МТ «Рубин»

© А.Ю.Каверинский, С.Л.Карлинский, 2008

фикации были взяты данные, полученные при вертикальном маневре утром 5 августа 2005 г. Упомянутый маневр выполнен с целью снятия гидрологического разреза и включал погружение на глубину на 10 м большую, чем заданная глубина движения на основном режиме, всплытие на глубину 15 м и, далее, погружение на заданную глубину. Записи параметров движения в процессе эксперимента показаны на рис. 2. Графики показывают, что подводная лодка начала погружение с перископной глубины 15 м и достигла глубины 61 м; затем подвсплыла на глубину 15 м. Всплыв до 14.5 м, подводная лодка выполнила погружение на заданную глубину 50 м. Весь оцениваемый маневр занял 18 мин 20 с.



Станция 30 05.08.2005
 Широта 44°37' Долгота 35°35'

Рис. 1. Параметры гидрологического разреза моря по глубине на Феодосийском полигоне 5 августа 2005 г.

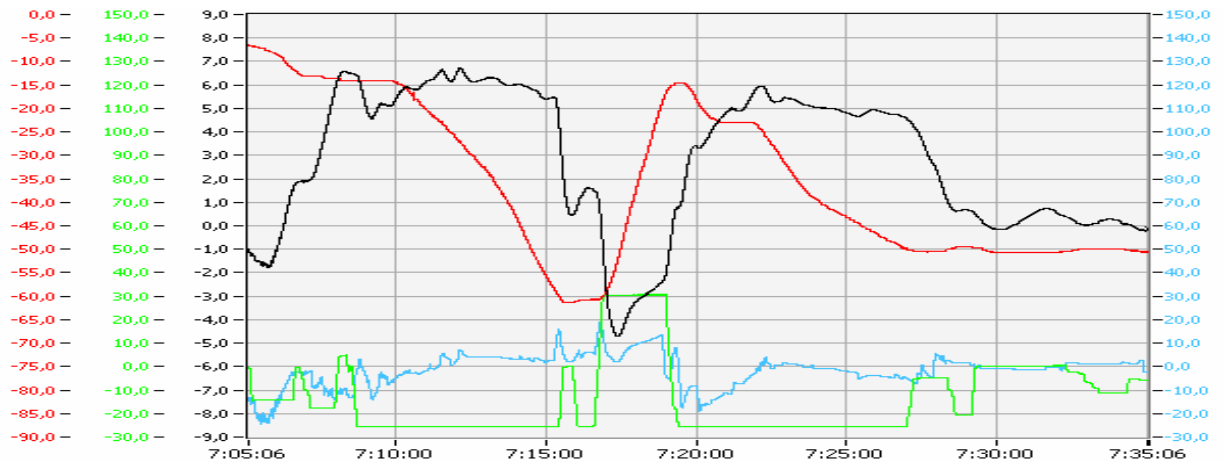


Рис. 2. Экспериментальная запись вертикального маневра, принятого для процедуры верификации: в верхней части графика изменение глубины погружения и дифферента; в нижней части – перекладки горизонтальных рулей

Обработка цифровых записей результатов записей с построением графиков выполнялась с помощью программы обработки результатов морских испытаний «ОРМИС». На рис. 3 приведены отдельные графики параметров движения. Скорость хода подводной лодки изменялась в процессе маневра (что достигалось изменением числа оборотов гребного вала от 40 до 140 об/мин) для поддержания эффективности горизонтальных рулей. Для компенсации вариаций плавучести ПЛ, возникающих вследствие обжатия корпуса (см. рис. 4) и вертикального градиента плотности морской воды (рис. 1) применялись прием/откачка воды уравнивательной цистерны. Регистрация изменения оборотов вала и операций с водяным балластом уравнивательной цистерны производилась по сигналам, отражавшим выполнение команд командира и инженер-механика.

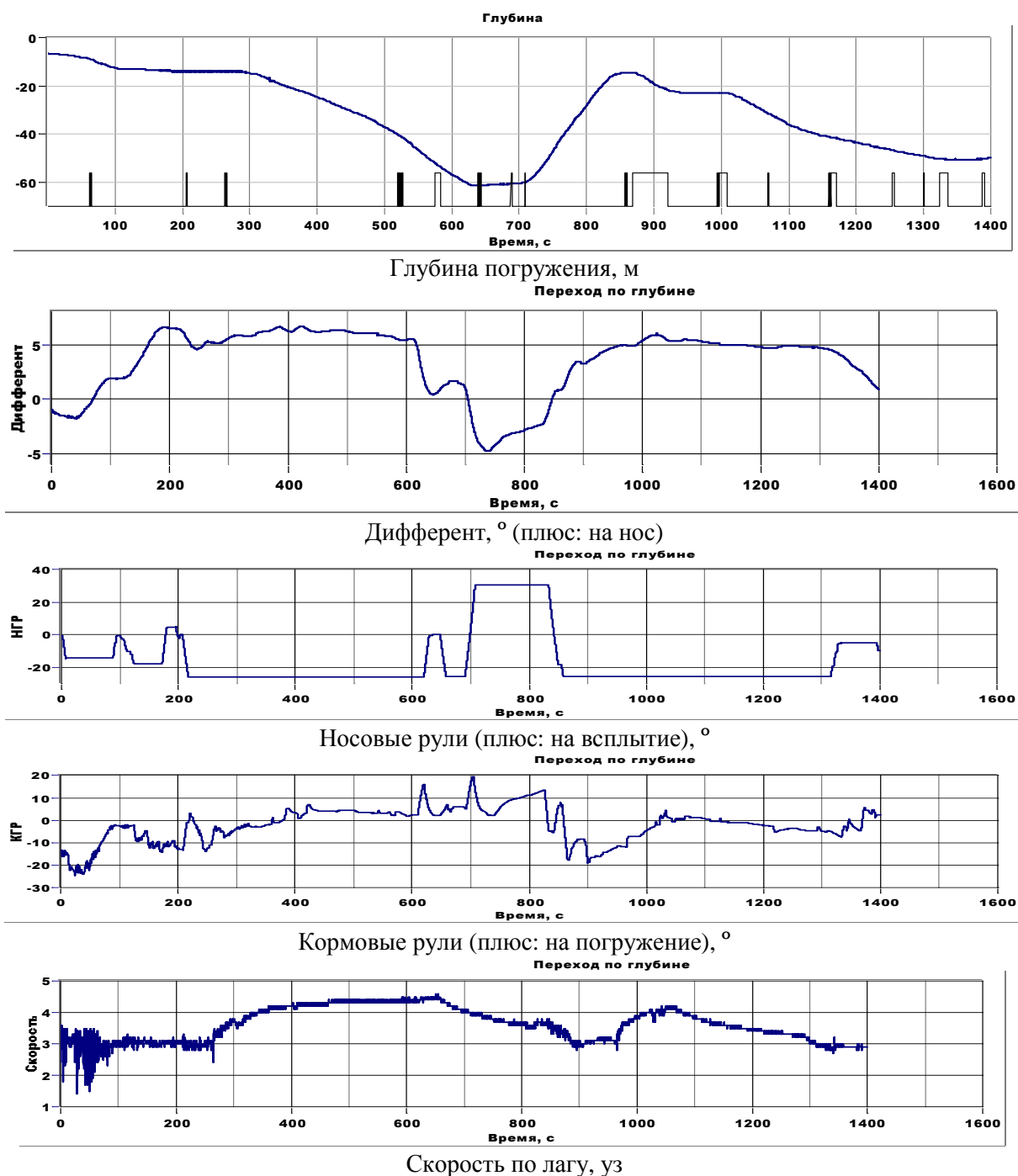


Рис. 3. Раздельные графики параметров движения подводной лодки в эксперименте

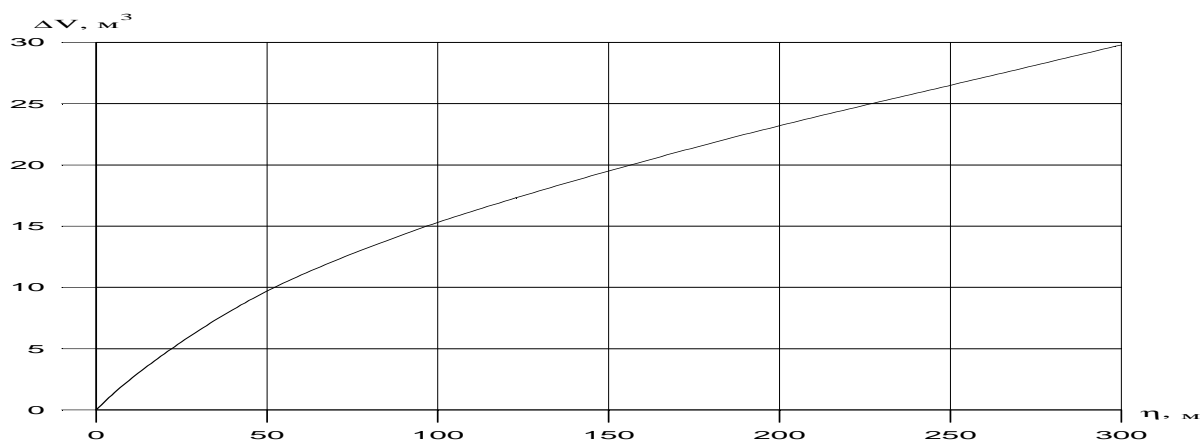


Рис. 4. Обжатие корпуса подводной лодки пр. 877 – уменьшение водоизмещения в функции от глубины погружения

Вычислительный эксперимент на основе компьютерной модели по программе «Динамика»

Состав математической модели. Математическая модель динамики подводной лодки в программе «Динамика» ЦКБ МТ «Рубин», функционирования ее технических средств и внешних возмущений содержит следующие элементы:

- уравнения пространственного движения;
- уравнения кинематических связей;
- выражения для гидродинамических сил и моментов на корпусе при малых углах атаки и дрейфа;
- выражения для гидродинамических сил и моментов на рулях;
- модель сил гидрологической природы;
- модель сил, связанных с обжатием корпуса;
- модель работы движителя на прямом ходу, при реализации режимов разгона, выбега и реверса;
- модель заполнения-продувания ЦГБ (по группам) с учетом характеристик системы ВВД;
- модель заполнения-осушения УЦ;
- модель работы дифференциальной системы;
- модель приводов рулей;
- модель возмущающих сил при движении заказа вблизи взволнованной поверхности моря.

Описание математической модели. Математическая модель пространственного движения ПЛ представляет собой систему дифференциальных уравнений, характеризующих динамическое равновесие ПЛ в системе координат $O1-X-Y-Z$:

$$\begin{aligned}
 1) & (M+\lambda_{11}) \cdot dV_x/dt + M \cdot Z_G \cdot d\omega_y/dt - M \cdot Y_G \cdot d\omega_z/dt - (M+\lambda_{22}) \cdot V_y \cdot \omega_z + \\
 & + (M \cdot Y_G + \lambda_{34}) \cdot \omega_x \cdot \omega_y - (M \cdot X_G + \lambda_{26}) \cdot \omega_z^2 - (M \cdot X_G - \lambda_{35}) \cdot \omega_y^2 + M \cdot Z_G \cdot \omega_x \cdot \omega_z = \\
 & = (\rho \nabla - M_0) \cdot g \cdot \sin \psi + T_x - F_{xg} + F_{xe} + F_{xs} + F_{xw} + F_{2x}; \\
 2) & (M+\lambda_{22}) \cdot dV_y/dt - M \cdot Z_G \cdot d\omega_x/dt + (M \cdot X_G + \lambda_{26}) \cdot d\omega_z/dt + (M+\lambda_{11}) \cdot V_x \cdot \omega_z - \\
 & - (M+\lambda_{33}) \cdot V_z \cdot \omega_x - \lambda_{34} \cdot \omega_x^2 + (-M \cdot X_G + \lambda_{35}) \cdot \omega_x \cdot \omega_y + M \cdot Z_G \cdot \omega_y \cdot \omega_z - M \cdot Y_G \cdot (\omega_z^2 + \omega_x^2) = \\
 & = (\rho \nabla - M_0) \cdot g \cdot \cos \psi \cdot \cos \theta + F_{yg} - F_{ye} + F_{ys} + F_{yw} + F_1 + F_{2y}; \\
 3) & (M+\lambda_{33}) \cdot dV_z/dt + (M \cdot Y_G + \lambda_{34}) \cdot d\omega_x/dt + (-M \cdot X_G + \lambda_{35}) \cdot d\omega_y/dt -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - (M + \lambda_{11}) \cdot V_x \cdot \omega_y + (M + \lambda_{22}) \cdot V_y \cdot \omega_x + (M \cdot X_g + \lambda_{26}) \cdot \omega_x \cdot \omega_z + M \cdot Y_G \cdot \omega_y \cdot \omega_z - \\
& - M \cdot Z_G \cdot (\omega_y^2 + \omega_x^2) = -(\rho \nabla - M_0) \cdot g \cdot \cos \psi \cdot \sin \theta + F_{zg} + F_{ze} + F_{zw} + F_{2z}; \\
4) & (J_x + \lambda_{44}) \cdot d\omega_x/dt - M \cdot Z_G \cdot dV_y/dt + (M \cdot Y_g + \lambda_{34}) \cdot dV_z/dt - \\
& - (\lambda_{26} + \lambda_{35}) \cdot V_z \cdot \omega_x - (J_y + \lambda_{35} - J_z + \lambda_{66}) \cdot \omega_y \cdot \omega_z - \lambda_{34} \cdot V_y \cdot \omega_x + \\
& + M \cdot Y_G \cdot (V_x \cdot \omega_y + V_y \cdot \omega_x) - M \cdot Z_G \cdot (V_x \cdot \omega_z + V_z \cdot \omega_x) + (\lambda_{26} + \lambda_{35}) \cdot V_y \cdot \omega_y = \\
& = M_0 \cdot g \cdot (Y_g \cdot \sin \theta + Z_g \cdot \cos \psi) \cdot \cos \psi + M_{xg} + M_{xe} + M_{xs} + M_{xw} + M_{2x}; \\
5) & (J_y + \lambda_{55}) \cdot d\omega_y/dt + M \cdot Z_G \cdot dV_x/dt + (-M \cdot X_g + \lambda_{35}) \cdot dV_z/dt - \\
& - (M \cdot X_g + \lambda_{26}) \cdot V_y \cdot \omega_x - (J_y + \lambda_{35} - J_z + \lambda_{66}) \cdot \omega_y \cdot \omega_z - \lambda_{34} \cdot V_y \cdot \omega_x + M \cdot Y_G \cdot (V_x \cdot \omega_y + \\
& + V_y \cdot \omega_x) - M \cdot Z_G \cdot (V_x \cdot \omega_z + V_z \cdot \omega_x) + (\lambda_{26} + \lambda_{35}) \cdot V_y \cdot \omega_y = \\
& = M_0 \cdot g \cdot (Y_g \cdot \sin \theta \cdot \cos \psi + Z_g \cdot \sin \psi) + M_{yg} + M_{ye} + M_{yw} + M_{2y}; \\
6) & (J_z + \lambda_{66}) \cdot d\omega_z/dt - M \cdot Y_G \cdot dV_x/dt + (M \cdot X_g + \lambda_{26}) \cdot dV_y/dt - \\
& - (M \cdot X_g + \lambda_{26}) \cdot V_x \cdot \omega_z - (M \cdot X_g - \lambda_{35}) \cdot V_z \cdot \omega_x - (J_x + \lambda_{44} - J_y - \lambda_{55}) \cdot \omega_x \cdot \omega_y - \\
& - M \cdot Y_G \cdot (V_z \cdot \omega_y - V_y \cdot \omega_z) = \\
& = M_0 \cdot g \cdot (X_g \cdot \cos \theta \cdot \cos \psi - Y_g \cdot \sin \psi) + M_{zg} + M_{ze} + M_{zs} + M_{zw} + M_{zd} + M_{2z},
\end{aligned}$$

где V - скорость ПЛ; V_x, V_y, V_z - проекции вектора поступательной скорости на оси связанной системы координат, м/с; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ - проекции вектора угловой скорости на оси связанной системы координат, 1/с; M - масса ПЛ, тс·с²/м; J_x, J_y, J_z - моменты инерции массы ПЛ, тс·с²/м; $\lambda_{11}, \lambda_{22}, \lambda_{33}$ - присоединенные массы ПЛ, тс·с²/м; $\lambda_{26}, \lambda_{34}, \lambda_{35}$ - присоединенные статические моменты ПЛ, тс·с²; $\lambda_{44}, \lambda_{55}, \lambda_{66}$ - присоединенные моменты инерции ПЛ, тс·м·с²; ρ - массовая плотность воды, тс·с²/м⁴; ∇ - полное подводное водоизмещение, м³; g - ускорение свободного падения, м/с²; θ, ψ - крен и дифферент, °.

Приведенная выше система дифференциальных уравнений для связи связанной и неподвижной систем координат дополняется следующими *кинематическими соотношениями*:

$$\begin{aligned}
d\xi/dt &= V_x \cdot \cos \varphi \cdot \cos \psi + V_y \cdot (\sin \theta \cdot \sin \varphi - \cos \theta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \psi) + \\
& + V_z \cdot (\cos \theta \cdot \sin \varphi + \sin \theta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \psi); \\
d\eta/dt &= V_x \cdot \sin \psi + (V_y \cdot \cos \theta - V_z \cdot \sin \theta) \cdot \cos \psi; \\
d\zeta/dt &= -V_x \cdot \sin \varphi \cdot \cos \psi + V_y \cdot (\sin \theta \cdot \cos \varphi + \cos \theta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \psi) + \\
& + V_z \cdot (\cos \theta \cdot \cos \varphi - \sin \theta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \psi); \\
d\theta/dt &= \omega_x - (\omega_y \cdot \cos \theta - \omega_z \cdot \sin \theta) \cdot \operatorname{tg} \psi; \\
d\varphi/dt &= (\omega_y \cdot \cos \theta - \omega_z \cdot \sin \theta) / \cos \psi; \\
d\psi/dt &= \omega_y \cdot \sin \theta + \omega_z \cdot \cos \theta.
\end{aligned}$$

Выражения для проекций гидродинамических сил и моментов, действующих на объект, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
F_{ig} &= (C_{ip} + C_{iv} + C_{i\delta j}) \cdot \rho / 2 \cdot V^2 \cdot \nabla^{2/3}; \\
M_{ig} &= (M_{ip} + M_{iv} + M_{i\delta j}) \cdot \rho / 2 \cdot V^2 \cdot \nabla;
\end{aligned}$$

где $i = x, y, z; j = f, s, v$ - носовые, кормовые и вертикальные гидродинамические рули; C_{ip}, M_{ip} - коэффициенты позиционных составляющих гидродинамических сил и моментов; C_{iv}, M_{iv} - коэффициенты вращательных составляющих гидродинамических сил и моментов; $C_{i\delta j}, M_{i\delta j}$ - коэффициенты гидродинамических сил и моментов, обусловленных действием рулей.

Вариации водоизмещения. При маневрировании по глубине водоизмещение ПЛ меняется в связи с обжатием прочного корпуса и резинового покрытия:

$$\nabla = \nabla_0 + d\nabla_{\text{обж}}(\eta);$$

где ∇ - водоизмещение ПЛ; ∇_0 - начальное водоизмещение ПЛ; $d\nabla_{\text{обж}}(\eta)$ - зависимость ве-

личины обжатия от глубины ПЛ.

Вариации массы ПЛ. Прием/удаление воды в/из цистерны приводит к изменению массы и моментов инерции ПЛ:

$$M = M_0 + \sum V_{\text{пви}} \cdot \rho / g;$$

$$J_x = J_{x0} + \sum V_{\text{пви}} \cdot \rho / g \cdot (Y_i^2 + Z_i^2);$$

$$J_y = J_{y0} + \sum V_{\text{пви}} \cdot \rho / g \cdot (X_i^2 + Z_i^2);$$

$$J_z = J_{z0} + \sum V_{\text{пви}} \cdot \rho / g \cdot (X_i^2 + Y_i^2);$$

где M - масса ПЛ; M_0 - начальная масса ПЛ; $J_{x,y,z}$ - моменты инерции массы ПЛ; $J_{x0,y0,z0}$ - начальные моменты инерции массы ПЛ; $V_{\text{пви}}$ - объем принятой в i -ю цистерну воды; X_i, Y_i, Z_i - плечи цистерн от центра величины ПЛ.

Принятая методика моделирования. Особенности ввода начальных условий и заданных значений параметров управления в программе «Динамика» позволяют моделировать неустановившееся движение (маневр) подводной лодки по элементам (погружение, всплытие, циркуляция и т.д.), разделив маневр на участки. При этом режим управления рулями на участке задается неизменным (например, «автомат» НГР и КГР), а скорость задается как средняя на участке с учетом фактических изменений оборотов гребного вала. Манипуляции с водяным балластом задаются вручную по факту. Как видно из графика на рис. 3, маневр можно разделить на три участка (с разбиением режима по секундам):

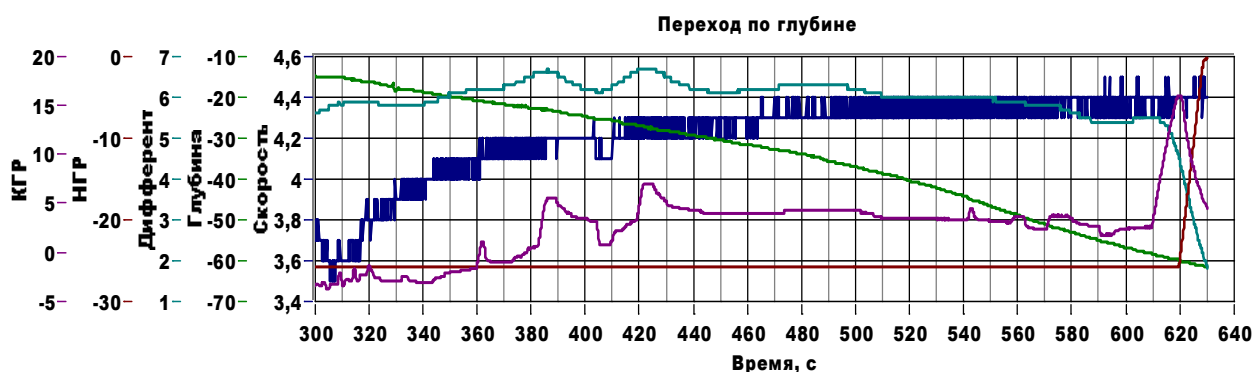
- погружение с 15 м на 61 м (от 07:10:00 до 07:15:30 или от 300 с до 630 с записи);
- всплытие с 60 м до 14.5 м (от 07:16:50 до 07:19:10 или от 631 до 850 с);
- погружение с 14.5 м на 50 м (от 07:19:40 до 07:28:20 или от 880 с до 1400 с).

Примечание. При записи натуральных параметров положительным принят дифферент на нос, а при математическом моделировании – на корму.

В процессе выполнения переходов по глубине программа отслеживает изменения плавучести подводной лодки в зависимости от обжатия корпуса и градиента плотности воды. При моделировании подводная лодка считается удифферентованной в начале и конце каждого участка.

Моделирование первого участка. Погружение с 15 м на 61 м

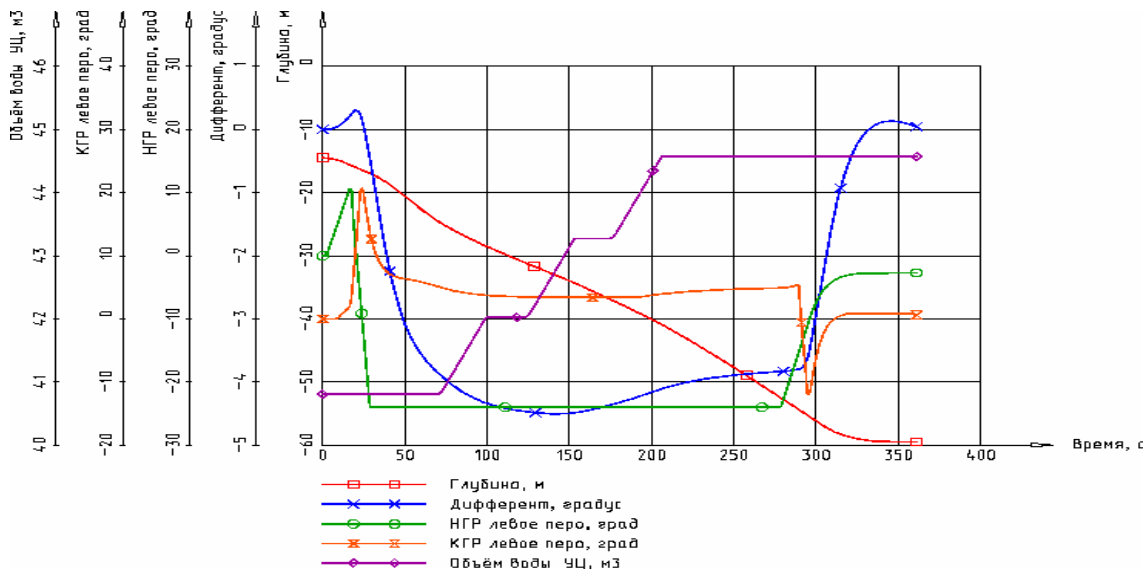
На первом участке принято в уравнительную цистерну 3.8 т балласта тремя порциями. Скорость вращения гребного вала варьировалась от 60 до 140 об/мин, а средняя скорость ПЛ на участке составила 4.4 уз. Запись натуральных параметров на участке 1, отформатированная по программе ОРМИС, отдельно показана на рис. 5.



Максимальные и минимальные значения параметров на участке 1: скорость - 4,50-3,50 уз; глубина - 14,80-61,40 м; дифферент - 6,70-1,80°; перекладка НГР - 0,20-25,70°; перекладка КГР - 16,00-3,80°; время перехода - 330,0 с

Рис. 5. Зарегистрированные экспериментальные параметры при погружении на участке 1 (от 300 до 630 с)

Результаты моделирования для воспроизведения движения ПЛ на первом участке по программе «Динамика» показаны на рис. 6. Из рисунка видно, что в процессе моделирования, как и в натуре, в УЦ было принято 3.8 т балласта тремя порциями (объем воды в УЦ составил от начального 40.8 до 44 м³). Производительность приема-откачки соответствовала натурной. В автоматы управления рулями были введены параметры: НГР - глубина 60 м, КГР - дифферент 5° на нос (с отводом за 5 м до заданной глубины).

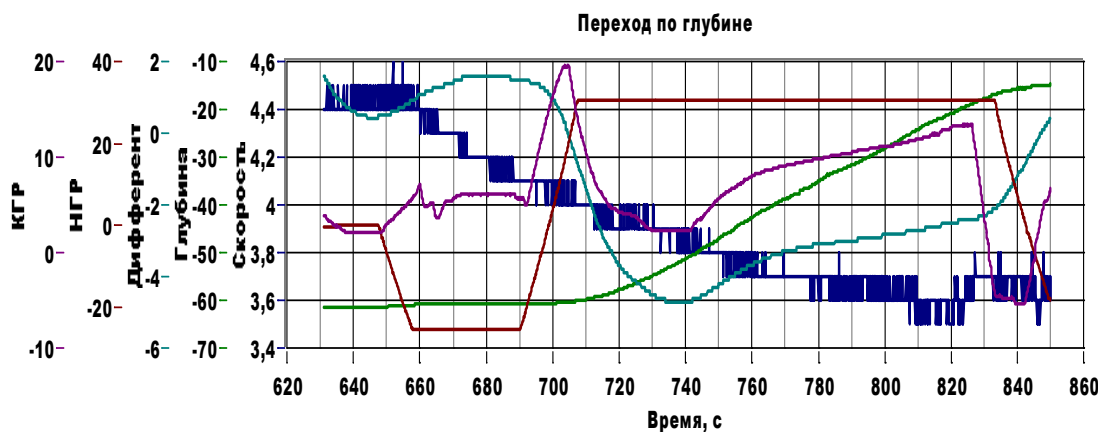


В записи натуральных параметров принят знак дифферента + на нос, а при моделировании + на корму

Рис. 6. Результаты моделирования движения ПЛ при погружении на участке 1 (от 0 до 330 с)

Моделирование второго участка. Всплытие с 60 м до 14.5 м

Согласно отметкам явлений в записи результатов 05.08.05 г. на втором участке откачано из УЦ 4.4 т балласта четырьмя порциями. Скорость вращения гребного вала варьировалась от 60 до 140 об/мин, а средняя скорость ПЛ на участке составила 4.4 узла. Запись натуральных параметров на втором участке отдельно показана на рис. 7.



Максимальные и минимальные значения параметров на участке: скорость - 4,60-3,50 уз; глубина - 14,80-61,40 м; дифферент - 1,60-4,70°; перекладка НГР - 30,60-25,60°; перекладка КГР - 19,60-5,40°; время перехода - 219,0 с

Рис. 7. Зарегистрированные экспериментальные параметры ПЛ при всплытии на участке 2 (от 631 до 850 с)

Результаты моделирования для воспроизведения движения ПЛ на втором участке по программе «Динамика» показаны на рис. 8. В процессе моделирования, как и в натуре, откачено из УЦ 4.4 т балласта четырьмя порциями (объем воды в УЦ составил от начального 40.8 до 36.4 м³). В автоматы управления рулями были введены параметры: НГР - глубина 15 м, КГР - дифферент 4° на корму (с отводом за 5 м до заданной глубины).

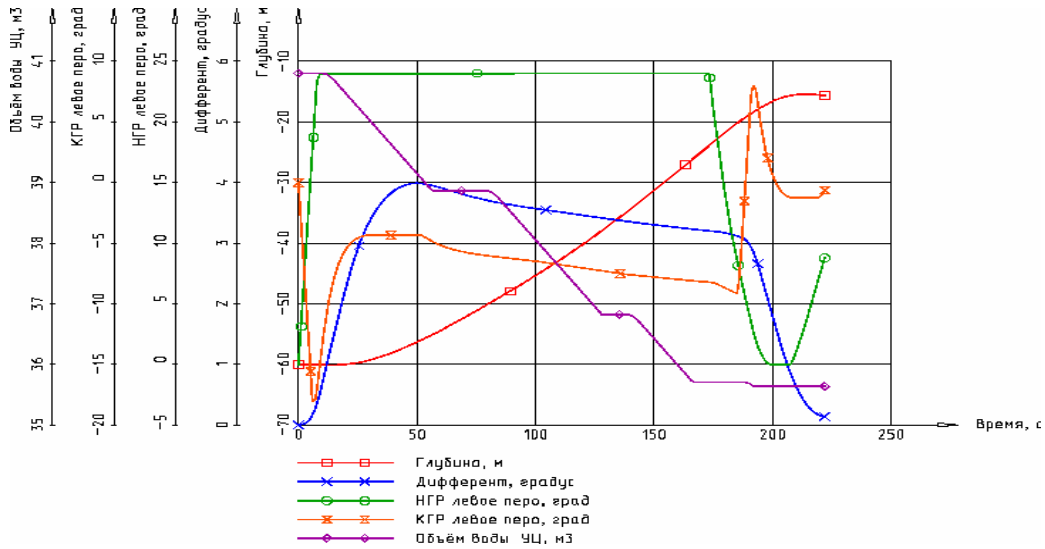
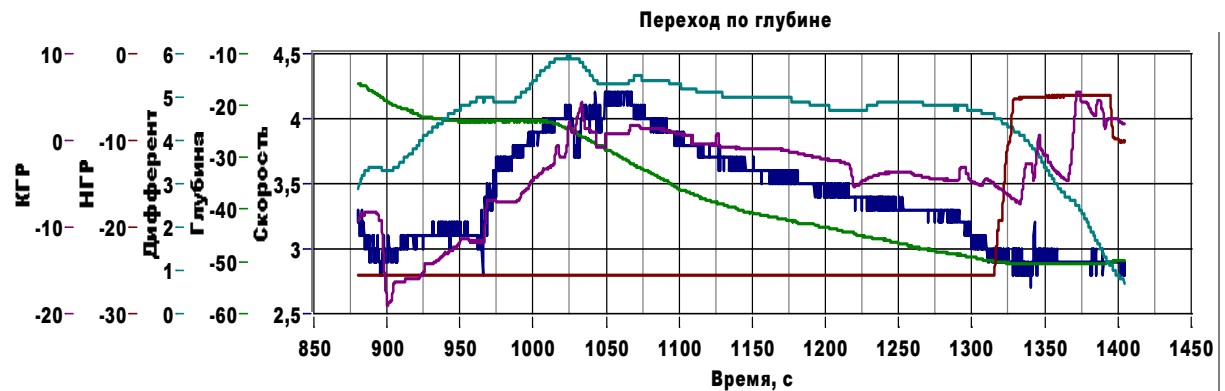


Рис. 8. Результаты моделирования движения ПЛ при всплытии на участке 2 (от 0 до 219 с)

Моделирование третьего участка. Погружение с 14.5 м на 50 м

Согласно отметкам явлений в записи результатов 05.08.05 г. на третьем участке принято УЦ около 4 т балласта несколькими порциями. Скорость вращения гребного вала варьировалась от 60 до 140 об/мин, а средняя скорость ПЛ на участке составила 4.0 уз. Запись натуральных параметров на третьем участке отдельно показана на рис. 9.



Максимальные и минимальные значения параметров на участке: скорость - 4,20-2,70 уз; глубина - 15,70-50,60 м; дифферент - 6,00-0,70°; перекладка НГР - 4,80-25,60°; перекладка КГР - 5,60-19,00°; время перехода - 525,0 с

Рис. 9. Зарегистрированные экспериментальные параметры ПЛ при погружении на участке 3 (от 880 до 1400 с)

Результаты моделирования для воспроизведения движения ПЛ на третьем участке по программе «Динамика» показаны на рис. 10. В процессе моделирования, как и в натуре, принято в уравнительную цистерну 4.0 т балласта шестью порциями (объем воды в УЦ составил от начального 40.8 м³ до 36.8 м³). В автоматы управления рулями были введены

параметры: НГР - глубина 15 м, КГР - дифферент 5 гр. на нос (с отводом за 5 м до заданной глубины).

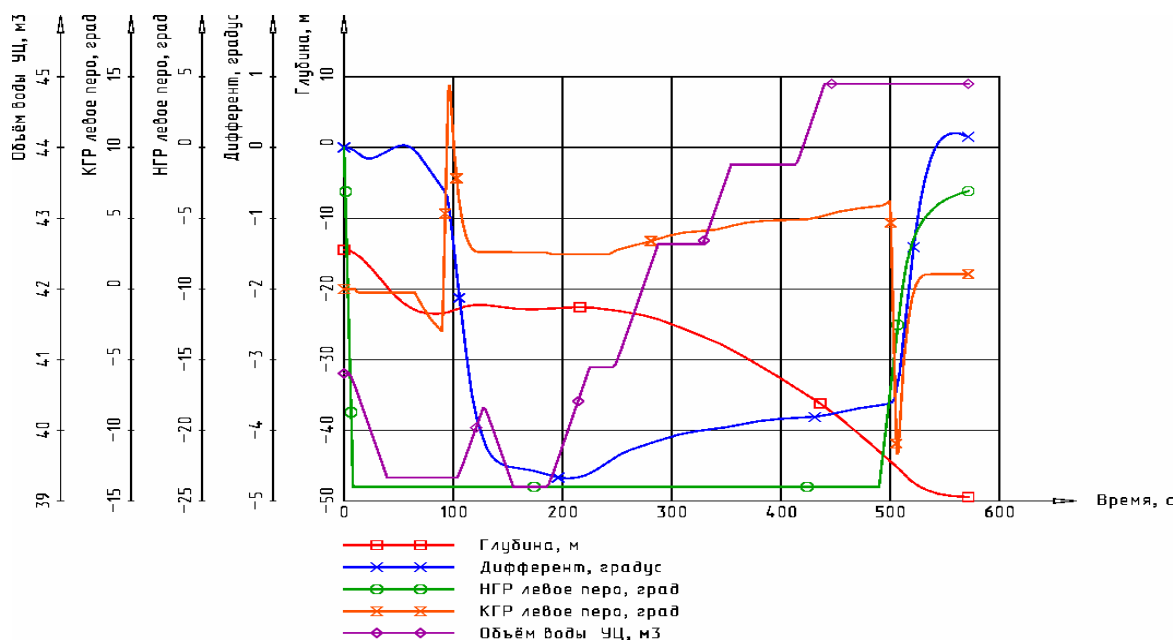


Рис. 10. Результаты моделирования движения ПЛ при погружении на участке 3 (от 15 до 540 с)

Сопоставление и анализ результатов натурального эксперимента и компьютерного моделирования

Методология сопоставления и анализа. Для сопоставления результатов натурального эксперимента и компьютерного моделирования при вертикальном маневре необходимо из многообразия фиксируемых кинематических параметров движения ПЛ выбрать те, которые в наибольшей степени характеризуют управляемость и позволяют тем самым оценить адекватность предлагаемой модели. В качестве таких параметров были приняты глубина погружения и дифферент ПЛ. Оценка адекватности проводилась по величине максимальных расхождений (в %) расчетных и натуральных значений глубины погружения и дифферента в процессе перехода, а также времени, затраченного на этот переход. Эти величины являются интегральными критериями, которые лучше всего характеризуют управляемость.

При сопоставлении результатов натурального и вычислительного эксперимента следует учитывать следующие особенности в задании управления при компьютерном моделировании и в натурном эксперименте. В процессе испытаний для переходов по глубине применялся ручной режим управления с присущими ему субъективными многократными переключками рулей и ручное управление водяным балластом уравнительной цистерны. Однако, как видно из записей переключек рулей, буквальное их воспроизведение при моделировании чрезвычайно сложно и вряд ли целесообразно. Поэтому при математическом моделировании было использовано автоматическое управление. Такая замена существенно упрощает процесс моделирования и, вместе с тем, систематизирует его, сохраняя характер управления. Вследствие указанной замены имеют место отличия в результатах, которые отражаются преимущественно в крайних значениях глубины и дифферента, мало влияя на процесс управления в целом.

Анализ результатов и адекватность модели. Сопоставление указанных выше параметров, полученных экспериментальным и расчетным путем, позволяет сделать следующие выводы.

- 1). Продолжительность переходов по глубине отличается не более, чем на ± 10 с (от 2

до 5 %).

2). Расхождение графиков глубины погружения в процессе перехода не превышает 20 % при сохранении формы изменения кривой.

3). Различие крайних устойчивых величин дифферента не превышает 25 %, а расхождение графиков изменения дифферента в процессе перехода не превышает 50 % при сохранении формы изменения кривой.

Таким образом, сопоставление результатов свидетельствует о приемлемой адекватности компьютерной модели программы «Динамика» натурным данным и возможности ее применения для анализа движения ПЛ.

Проведенные испытания позволяют также сделать определенные выводы по управлению ПЛ при выполнении вертикальных маневров.

1. При погружении/всплытии с глубины 15 до 60 м в соответствии с кривой обжатия на рис. 4 ПЛ теряет/приобретает 8 м^3 объема или около 80 кН остаточной плавучести, подлежащей замещению при плавании в однородном море.

2. Изменение плотности морской воды примерно на 3 - 3.5 у.е. ($3 - 3.5 \text{ кг/м}^3$), происходящее в этом же диапазоне глубин при погружении/всплытии приводит к тому, что ПЛ (при игнорировании эффекта обжатия) приобретает/теряет 115 – 13 кН остаточной плавучести, также подлежащей замещению.

3. Таким образом, при управлении балластом ПЛ при погружении/всплытии с глубины 15 до 60 м достаточно принять/откачать от 3 до 5.5 т воды в уравнительной цистерны. Однако, такое быстрое и экономное управление возможно только при условии наличия информации о распределении плотности морской воды по глубине. В нашем случае такая информация была получена по результатам предыдущих маневров.

Summary

Computer simulation is an important method for the analysis of the control quality and safety of ship and submarine motion. Recently, the computational simulation appears as a basis of methodology used in submarine design, also, in a motion control algorithm development (stabilization as well, as manoeuvring). At the same time, it is evident that a proof of the computer model adequacy may be obtained by comparison of the results of implementation of the pre-set experimental maneuver of the submarine with the results of the computer simulation for the same maneuver. The methodology of comparison of the results (identification of the mathematical description of the characteristics of the hull and control devices) and criteria of adequacy are the subject of the paper presented. The proposed method application is demonstrated by the test data obtained in the submarine vertical manoeuvres.

Статья поступила в редакцию 01.11.2007 г.