

На правах рукописи



Абдуллаева Залина Мусаевна

**РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
ДВИЖЕНИЯ СУДНА НА МЕЛКОВОДЬЕ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ
ГЛУБИНЕ**

Специальность:

**05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Махачкала-2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Дагестанский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Асланов Гайдарбек Кадырбекович

Официальные оппоненты: **Целых Александр Николаевич** – доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение «Южный федеральный университет», Инженерно-технологическая академия, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, кафедра информационно-аналитических систем безопасности, заведующий кафедрой.
Курбанмагомедов Курбанмагомед Динмагомедович – кандидат технических наук, доцент, Учреждение высшего образования «Институт системных технологий», кафедра «Информационные технологии», заведующий кафедрой.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва».

Защита диссертации состоится «22» мая 2018 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.052.02 при ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», 367015, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля 70, диссертационный зал административного корпуса, кабинет 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет» www.dstu.ru. Сведения о защите и автореферат диссертации размещены на официальном сайте ВАК Министерства образования и науки РФ <http://www.vak.ed.gov.ru>.

Рассылка автореферата состоится «10» апреля 2018 года

**Ученый секретарь
диссертационного совета**



Меркухин Евгений Николаевич

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из основных путей повышения эффективности работы морского флота является определение условий безопасного плавания различных судов на мелководье с переменной глубиной. Другими словами, обеспечение безопасного плавания, например, в акваториях портов, при прохождении рек и каналов в сложных гидрометеорологических условиях является одной из актуальных проблем судовождения. Это обусловлено тем, что по статистике в перечисленных выше условиях происходит около 90% навигационных аварий, и, в первую очередь, крупнотоннажных судов. Основная причина таких аварий связана с выбором тактики маневрирования, базирующейся, в основном, на опыте судоводителей, приобретенном ими, как правило, в процессе плавания на глубокой воде, т.е. с тем, что судоводитель, фактически не обладая априорными достоверными данными, проводит маневрирование на основе субъективной оценки возникающих ситуаций.

Однако, на мелководье, необходимо объективно учитывать соотношение между глубиной и осадкой судна, т.к. в этом случае возникают силы гидродинамического взаимодействия его корпуса и грунта, приводящие к ухудшению маневренности судов, повышению уровня рыскливости, а при неизменном значении угла перекладки руля к увеличению радиуса установившейся циркуляции. Таким образом, при плавании на мелководье, особенно в условиях с изменяющейся глубиной, т.е. с изменяющимся рельефом дна необходима повышенная точность счисления траектории движения и высокая точность определения координат местоположения судна в заданной системе отчета.

Следует отметить, что решение перечисленных выше задач, связанных с безопасностью судовождения, может быть выполнено путем проведения сложных натурных экспериментов. Однако, реализация таких экспериментов в естественных условиях порой невозможна или экономически нецелесообразна. Обойти указанную трудность можно путем математического моделирования процессов движения судов на мелководье. Необходимо также отметить, что замена натурального эксперимента математическим моделированием для исследования влияния мелководья на динамику судна, кроме снижения колоссальных затрат времени и средств, позволяет обеспечить повторяемость результатов проводимых экспериментов при различных условиях плавания и обобщить получаемые в результате данные.

Таким образом, математическое моделирование является одним из эффективных способов получения достоверных данных, необходимых для принятия эффективных навигационных решений судоводителями, в процессе маневрирования судов в условиях мелководья.

Результаты математического моделирования движения судов на мелководье при переменной глубине и ходовых испытаний, позволяют получить достоверные данные в общем виде безотносительно к конкретным условиям плавания и использовать их с учетом коррекции на фактические

условия различных видов мелководья для обеспечения требуемой точности и безопасности маневров, проводимых судоводителями.

Следовательно, возникает объективная необходимость в разработке адекватных математических моделей и их программная реализация для получения достоверных данных, используемых судоводителями для принятия эффективных решений в процессе маневрирования судов на мелководье с переменной глубиной, что и определяет актуальность темы настоящей диссертационной работы.

Степень разработанности исследуемой проблемы. Объективная необходимость математического моделирования поведения судов на мелководье за последние десятилетия существенно повысилась в связи с возрастанием интенсивности мореплавания, а также с повышением объемов перевозок опасных грузов, в частности, на танкерном флоте. Автор, при проведении своего исследования опирался на результаты, полученные в рассматриваемой области следующими учеными: Аслановым Г.К., Басиным А.М., Войткунским Я.М., Гофманом А.Д., Павленко В.Г., Першицем Р.Ж., Соболевым Г.В., Федяевским К.К., Шлейером Г.Э., Острцовым Г. Э. и мн. др.

Однако использование известных линейных или частично линеаризованных моделей движения судна, разработанных различными авторами и описанных в большом количестве литературных источников по данной тематике, в настоящее время является не достаточно эффективным. Это связано с тем, что в данных математических моделях движения различных судов, при наличии возмущающих воздействий внешней среды, практически не учитывается переменная глубина акватории плавания, существенным образом влияющая на динамику их движения на мелководье.

Необходимо также отметить, что в настоящее время хотя и разработаны математические модели движения судов по криволинейной траектории на мелководье, но в них не учитываются возмущения, связанные с переменной глубиной района плавания, существенно влияющие на их маневрирование. Другими словами, вопросы, связанные с исследованием влияния изменяющегося рельефа морского дна на мелководье на гидродинамические характеристики движения судов практически остаются открытыми.

Отмеченные выше обстоятельства и определили цель, задачи и направление настоящего диссертационного исследования.

Целью диссертационного исследования является разработка математических моделей движения судов по заданной криволинейной траектории на мелководье при переменной глубине, а также разработка на их основе пакета прикладных программ для проведения компьютерных экспериментов.

В соответствии с целью исследования в диссертации поставлены и решены следующие **задачи**:

- получить аналитические зависимости влияния мелководья на гидродинамические коэффициенты уравнений гидродинамики судна, определяемые как функции отношения осадки судна к глубине акватории;

- разработать математическую модель, используя аналитические зависимости влияния мелководья на гидродинамические коэффициенты в уравнениях гидродинамики судна при его движении на мелководье с учетом переменной глубины района плавания;

- синтезировать математическую модель движения судна на мелководье при переменной глубине района плавания по заданной криволинейной траектории;

- разработать пакет прикладных программ, обеспечивающий возможность проведения исследования гидродинамики судов на мелководье с переменной глубиной, на основе разработанных математических моделей.

Направление исследования:

- *объектом исследования* являются процессы маневрирования и движения морских судов на мелководье с переменной глубиной безотносительно к конкретным условиям плавания;

- *предметом исследования* является система компьютерного моделирования гидродинамики судов и инструментальные средства управления их движением на мелководье с переменной глубиной района плавания;

-исследование проведено в рамках специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Паспорт специальности ВАК (технические науки): п.4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ вычислительного эксперимента; п.5. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современных технологий математического моделирования и вычислительного эксперимента; п.8. Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования.

Научная новизна проведенного исследования заключается в разработке математических моделей движения судов на мелководье с переменной глубиной и криволинейной траекторией плавания на основе аналитических зависимостей его влияния на гидродинамические коэффициенты уравнений гидродинамики судна, определяемые как функции отношения их осадки к глубине акватории с помощью кривых третьего порядка, с обеспечением максимальной среднеквадратической погрешности аппроксимации $\delta = 2\%$.

К новым научным результатам, выносимым на защиту, следует отнести:

- путем аппроксимации кривых влияния мелководья на гидродинамику судна, получены закономерности изменения коэффициентов при переменных в уравнениях гидродинамики движения судна на мелководье в соответствии с изменениями рельефа дна в районе плавания. Это позволяет значительным образом повысить адекватность формируемых математических моделей и сократить объем материальных и временных затрат на проведение исследований по изучению динамики судов на мелководье;

- разработаны оригинальные математические модели движения судов на мелководье при циркуляции и заданной криволинейной траектории, отличающиеся от известных моделей учетом влияния изменения глубины фарватера на коэффициенты уравнений их гидродинамики, что позволяет определить условия безопасного маневрирования судов в условиях с переменной глубиной района плавания;

- разработана программная реализация предложенных математических моделей движения судов на мелководье с изменяющимся рельефом дна, что позволяет провести исследования и на основе полученных результатов дать рекомендации судоводителям по безопасному маневрированию судов на мелководье с переменной глубиной акватории плавания.

Теоретическая значимость диссертации заключается в том, что проведенные исследования вносят вклад в получение новых знаний в области математического моделирования движения судов на мелководье при циркуляции с переменной глубиной района плавания, а также при их движении на мелководье с переменной глубиной района плавания по заданной криволинейной траектории. Программная реализация разработанных математических моделей и построенных на их основе инструментальных средств управления маневрированием морских судов на мелководье с переменной глубиной района плавания позволяет проводить дальнейшие исследования их динамических характеристик, например, в условиях с волнения морской поверхности.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработанные математические модели и построенные на их основе инструментальные средства управления движением морских судов позволяют:

- значительным образом сократить объемы материальных и временных затрат на проведение исследований по изучению динамических характеристик различного класса судов на мелководье при переменной глубине района плавания и на этой основе дать практические рекомендации по их безопасному маневрированию;

- обеспечить возможность прогнозирования результатов совершения заданного маневра в текущих внешних условиях плавания;

- получить необходимые данные для разбора причин аварий в процессе судовождения на морском транспорте;

- дать практические рекомендации судоводителям по безопасному маневрированию на мелководье.

Результаты диссертационной работы внедрены:

- в учебный процесс в ФГБОУ ВПО «Дагестанский государственный технический университет» на кафедре управления и информатики в технических системах в методических указаниях к выполнению лабораторной работы «Моделирование движения судна на мелководье» по дисциплине «Моделирование и анализ сложных систем» для магистров направления подготовки 220200.68 - Управление в технических системах;

- ряд теоретических положений и практических рекомендаций диссертационного исследования приняты к внедрению Морским филиалом ФГБУ «АМП Каспийского моря».

Методы исследований, достоверность, обоснованность и апробация результатов исследования:

- *методологические основы проведенного исследования* базируются на применении математических моделей и методов описания поведения динамических систем в нестабильной окружающей среде;

- *достоверность полученных в работе научных результатов* обоснована на эвристическом уровне строгости и подтверждается корректным использованием принципов математического моделирования динамических систем, известных уравнений гидродинамики судов, численных методов решения дифференциальных уравнений, методов Д-разбиения и аппроксимации кривых полиномами третьего порядка;

- *основные положения диссертации* докладывались и получили одобрение на: VI Всероссийской конференции по актуальным проблемам внедрения и развития сектора IT-технологий «Современные информационные технологии в проектировании, управлении и экономике» (28 – 29 сентября 2011 г., Махачкала); II Всероссийской научно-практической конференции «Молодежь, наука, инновации» (10-12 ноября 2013 года, Грозный); Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы математики, информатики в современной науке: теория и практика актуальных исследований» (19-21 октября 2016, Махачкала) и X Всероссийской научно-практической конференции «Современные информационные технологии в проектировании, управлении и экономике» - Махачкала, 2016; XXX, XXXIV итоговых научно-технических конференциях преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ «Неделя науки – 2009» и «Неделя науки – 2013».

- *оригинальность и работоспособность* разработанного на основе предложенных математических моделей комплекса программ подтверждается государственной регистрацией в реестре следующих программ для ЭВМ: «Моделирование движения судна на мелководье», регистрационный номер №2014662089 и «Моделирование движения судна на мелководье по криволинейной траектории», регистрационный номер №2016611225, а также на основе проведенных вычислительных экспериментов.

Объем и структура диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 96 наименований и приложений. Основная часть работы изложена на 93 страницах машинописного текста, включая 52 рисунка, 3 таблицы, а также 6 приложений на 167 страницах.

2. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования.

В первой главе «Теоретический анализ движения судна» произведен критический анализ возможности применения известных математических моделей движения различных судов на глубокой воде и на мелководье для математического моделирования влияния мелководья с переменным рельефом дна на гидродинамические характеристики их корпуса.

По результатам проведенного анализа за основу построения математических моделей влияния мелководья с переменным рельефом дна на гидродинамические характеристики корпуса судна взята система безразмерных дифференциальных уравнений Соболева Г.В. для малых отклонений судна от криволинейной траектории в связанной с ним системе координат:

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

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; β - угол дрейфа; ω - безразмерная угловая скорость судна

$\omega = \frac{\Omega L}{V_0}$; L - длина судна между перпендикулярами; Ω - угловая скорость

судна; m_{11} , m_{22} , m_{66} - безразмерные гидродинамические коэффициенты; n_x -

безразмерный коэффициент сопротивления движению судна; n_p -

безразмерный коэффициент тяги движителей; n_y^δ - коэффициент,

характеризующий эффективность установленных на судне средств

управления; δ - угол перекадки руля, выраженный в радианах и

отсчитываемый от диаметральной плоскости судна, причем перекадка 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, \bar{n}_y^β , \bar{m}_y^β - влияние мелководья на позиционные поперечной силы и

момента рыскания, \bar{n}_y^ω , \bar{m}_y^ω - влияние мелководья на вращательные

производные поперечной силы и момента рыскания.

Во второй главе «Аналитическое описание кривых влияния мелководья на гидродинамические коэффициенты» поставлена и решена задача аппроксимации кривых влияния мелководья на гидродинамические коэффициенты с точностью до 2%. Аппроксимация осуществлялась с использованием пакета программ MatLab с помощью полиномов 3 порядка (2):

$$k_i = A\left(\frac{T}{H}\right)^3 + B\left(\frac{T}{H}\right)^2 + C\left(\frac{T}{H}\right) + D \quad (2)$$

где T - осадка судна на мидели; H - глубина воды; A, B, C, D – коэффициенты при полиноме, аппроксимирующем влияние мелководья на i - ю гидродинамическую характеристику судна.

На Рисунке 1, в качестве примера, приведена экранная форма аппроксимации кривой влияния мелководья на коэффициент присоединенных масс жидкости k_{22} для значения присоединенных масс и инерции $\lambda = 0,093$, определяемой в функции отношения осадки судна к глубине акватории.

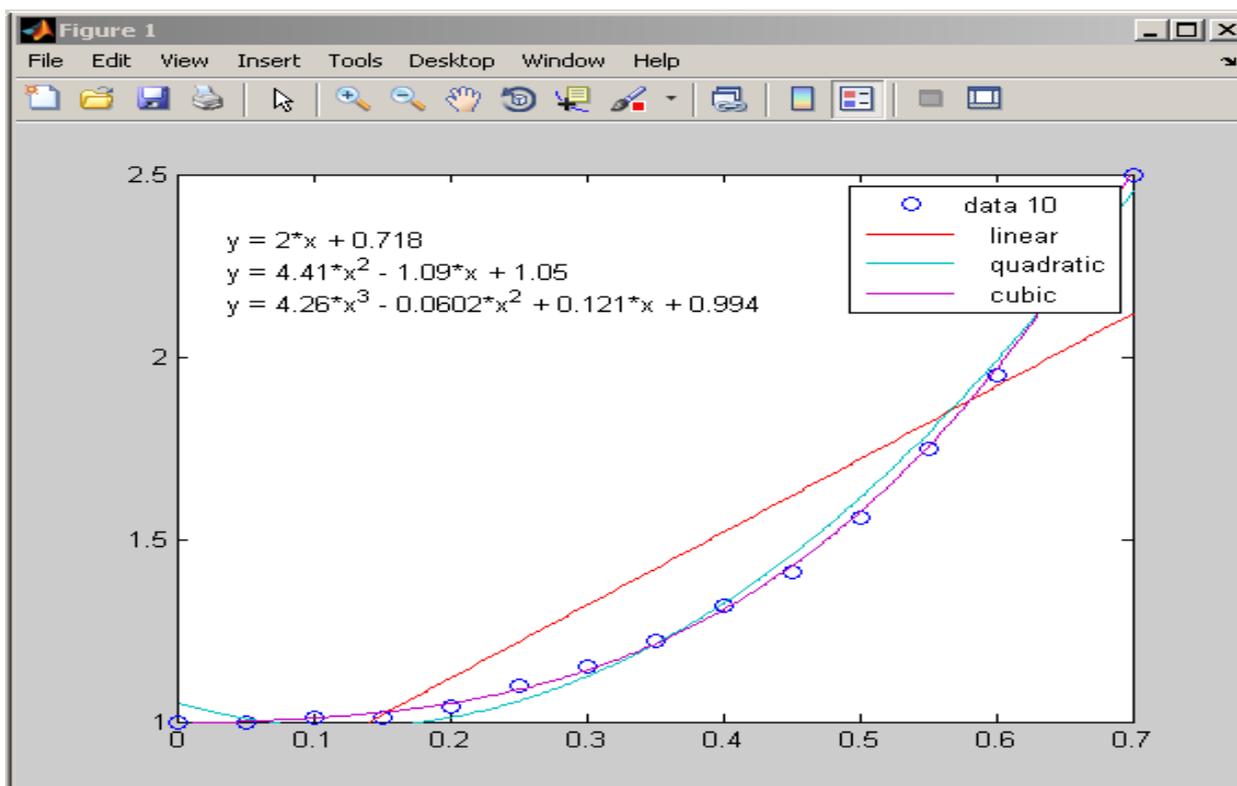


Рисунок 1 - Экранная форма аппроксимации кривой влияния мелководья на коэффициент k_{22} для значения $\lambda = 0,093$.

Далее, в работе, с учетом аппроксимированных гидродинамических коэффициентов, безразмерные уравнения движения судна на мелководье приведены к размерному виду.

В третьей главе «Математическая модель движения судна на мелководье по криволинейной траектории» разработаны математические

неподвижной системе координат, которые с учетом течения могут быть определены в следующем виде:

$$x_{um} = x_0 + \int_0^t V_L \sin K_{zk} dt + V_T \sin K_T t ; \quad (3)$$

$$y_{um} = y_0 + \int_0^t V_L \cos K_{zk} dt + V_T \cos K_T t ; \quad (4)$$

$$K_{zk} = K_{zk0} + \int_0^t \Omega dt , \quad (5)$$

где: x_0 – начальное значение абсциссы центра тяжести судна; y_0 – начальное значение ординаты центра тяжести судна; K_{zk0} – начальное значение истинного курса судна.

Боковое смещение судна l_{cm} определяется как расстояние от точки нахождения центра тяжести судна до точки пересечения нормали, опущенной из его центра тяжести на заданной траекторию движения судна.

Отклонение от заданного курса ΔK , находится как угол между диаметральной плоскостью судна и касательной к точке пересечения нормали, проведенной от центра его тяжести до пересечения нормали с заданной линией криволинейного движения.

Боковое смещение судна находится по формуле:

$$l_{cm} = \sqrt{(x_{um} - x)^2 + (y_{um} - y)^2} . \quad (6)$$

Однако, смещение судна по (6) находится с неоднозначностью. Учет знака смещения производится согласно выражению:

$$l_{cm} = \text{sign}(y_{um} - y) |l_{cmр}| , \quad (7)$$

где $l_{cmр}$ – значение l_{cm} , вычисленное по формуле (6).

Из Рисунка 2 видно, что отклонение судна от заданного курса будет определяться выражением:

$$\Delta K = \pi/2 - K_{zk} - \alpha = \pi/2 - K_{zk} - \text{arctg } f'(x) \quad (8)$$

Для маневрирования судна при наличии бокового смещения и угла отклонения от заданного курса используется следующий закон управления рулём:

$$U(t) = K_1 \Delta K + K_2 \frac{d \Delta K}{dt} + K_3 l_{cm} + K_4 \frac{dl_{cm}}{dt} . \quad (9)$$

Для управления маневрированием судна по заданной траектории движения необходимо определить параметры автоматического регулятора - авторулевого. Для этого, после линеаризации размерных уравнений

движения судна, на основании принципа суперпозиции, с использованием метода D-разбиения, определены области устойчивости отдельно для курса (на плоскости параметров $K1$ и $K2$) и бокового его смещения от заданной траектории (на плоскости параметров $K3$ и $K4$).

В четвертой главе «Программная реализация математической модели движения судна на мелководье» осуществлена программная реализация разработанных математических моделей.

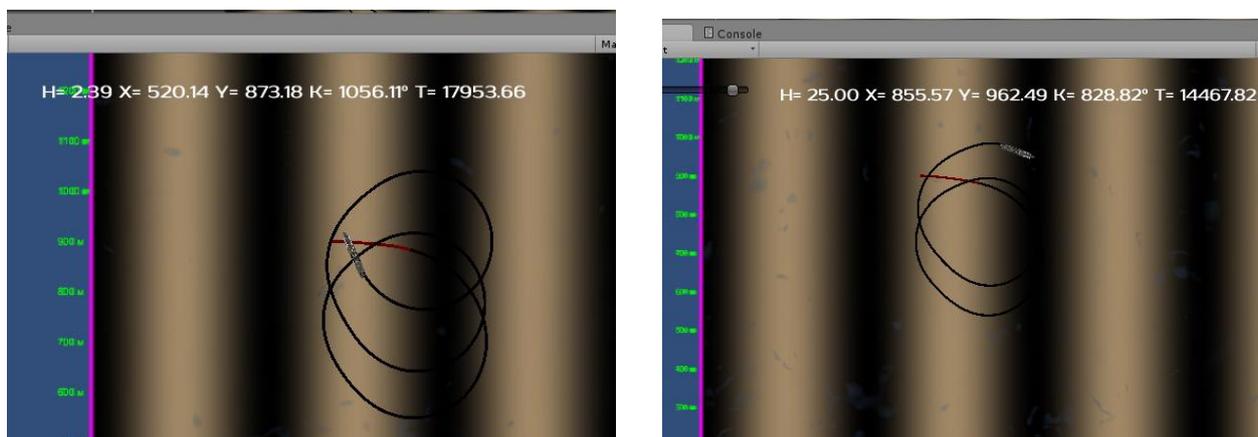
Комплекс программ разработан на основе инструментальных средств Unity с использованием языка программирования C#.

Решение системы дифференциальных уравнений, определяющих траекторию движения судов при различном характере внешних возмущений, выполняется на основе метода Рунге-Кутты.

Программная реализация разработанных моделей позволяет визуально наблюдать за траекторией движения судна на мелководье с учетом его различных характеристик.

В отличие от описанных в литературе математических моделей движения судна на мелководье, которые позволяют проводить исследования только при постоянной заданной глубине дна, разработанные в работе модели и их программная реализация, позволяют задать его изменяющийся рельеф с помощью различных наклонных плоскостей и поверхностей второго порядка. Определение и отображение рельефа дна осуществляется с помощью двумерного массива, формирование которого осуществляется по исходной алгебраической функции.

На Рисунке 3 - а и б приведены результаты моделирования при циркуляции судна на мелководье с переменной глубиной.



а)

б)

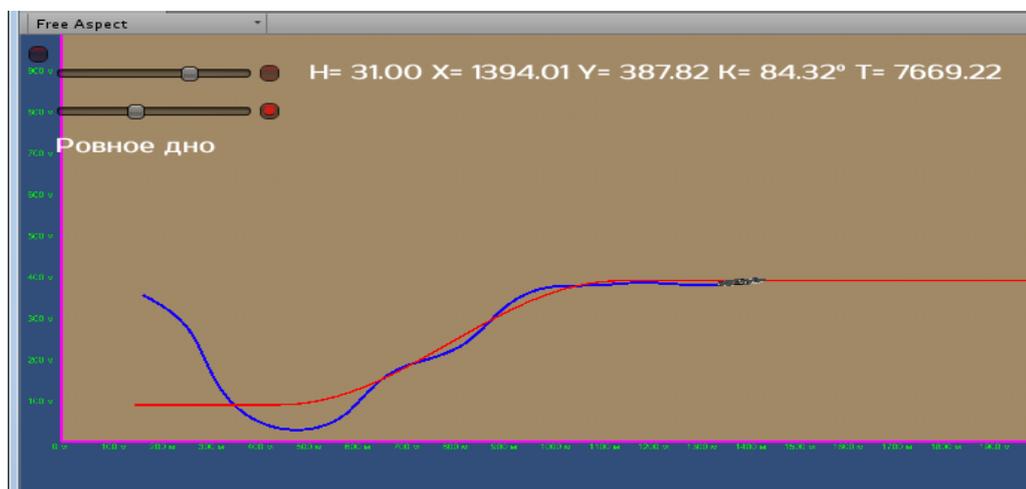
Рисунок 3 – Результаты моделирования процесса маневрирования и движения судна при неровном дне: а) при $H=27,330\text{м.}$, $X=474\text{ м.}$, $Y=899\text{м.}$, $K=91,9830$, $\delta=30.4570$, $h=0.001$, $V=5\text{м/с.}$ Параметры дна: амплитуда 25м. , полупериод 350 м ; б) при $H=27,330\text{м.}$, $X=474\text{ м.}$, $Y=899\text{м.}$, $K=91,9830$, $\delta=30.4570$, $h=0.001$, $V=5\text{м/с.}$ Параметры дна: амплитуда 25м. , полупериод 300м.

Переменная глубина задается в виде синусоиды с амплитудой 25 м и длительностью полупериодов соответственно 300 м и 350м (Для наглядности на рисунке более глубоким участкам соответствует более темный фон).

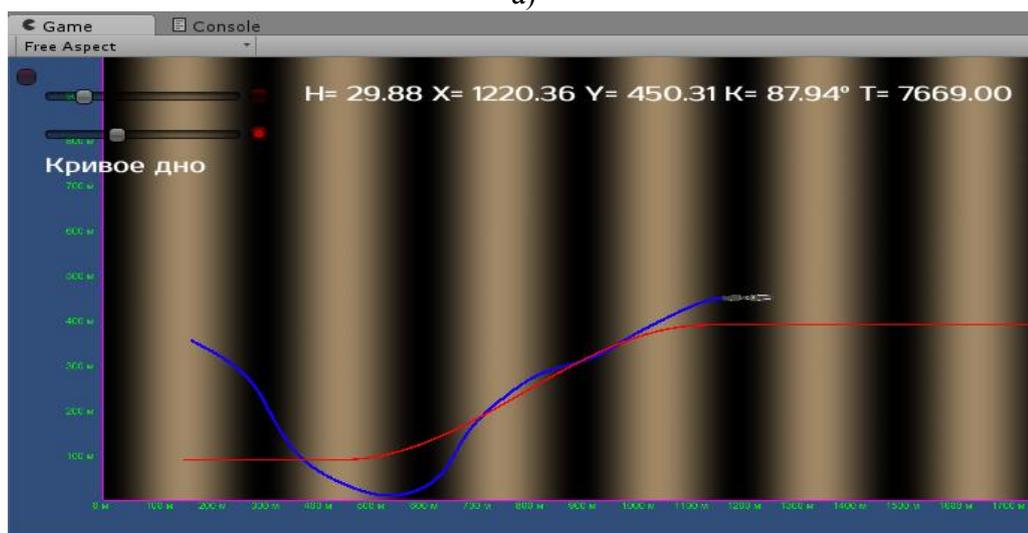
Из рисунка 3 -а и б видно, что в отличие от циркуляций на глубокой воде, на мелководье переменной глубине кривая циркуляции имеет совершенно другой вид.

В этом случае траектория движения судна приобретает вид циклоиды. В программе, при движении судна на мелководье с переменной глубиной, перед каждым шагом вычислений задается глубина, по которой производится перерасчет коэффициентов в уравнениях гидродинамики судна. Затем по этим уравнениям определяются координаты положения судна. Данная операция повторяется на каждом шаге проводимых вычислений.

На рисунке 4 – а и б приведены экранные формы результатов моделирования движения судна по криволинейной траектории: а) при постоянной глубине мелководья; б) при переменной глубине.



а)



б)

Рисунок 4 – Результаты моделирования движение судна по заданной траектории: а) при ровном дне; б) при неровном дне: $H=31$ м., $X=166$ м., $Y=356$ м., $X_T=150$ м., $Y_T=240$ м., $K=121.74^0$, $\delta=30^0$, $h=0.001$, $V=5$ м/с., $K_1=5$, $K_2=400$, $K_3=0.03$, $K_4=-0.003$.

Из Рисунка 4 б) видно, что при движении судна на мелководье при переменной глубине мелководья по заданной траектории получается достаточно большое отклонение (выброс) от заданной траектории, что можно объяснить ухудшением управляемости судна.

Исследования процессов маневрирования и движения судов на основе предложенных в работе математических моделей подтверждают известную из практики истину о том, что на мелководье при переменной глубине значительным образом ухудшается управляемость судна.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе и даны рекомендации по их использованию.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проведении исследования автором получены следующие основные научные результаты и даны рекомендации по их практическому применению:

1. Обоснована необходимость учета в разрабатываемых математических моделях движения судов по заданной криволинейной траектории на мелководье изменяющейся поверхности дна. Программная реализация таких моделей позволяет значительным образом сократить объем материальных и временных затрат, связанных с «ручным» проведением исследования поверхности дна для обеспечения адекватных динамических характеристик судов на мелководье с переменной глубиной его расположения.

2. Проведен анализ математических моделей, по результатам которого определены основные их достоинства и недостатки, связанные с моделированием процесса движения судов на мелководье.

3. Получены аналитические зависимости (представленные в виде кривых третьего порядка) влияния мелководья на гидродинамические коэффициенты в уравнениях гидродинамики судна, определяемые как функции отношения осадки судна к глубине расположения дна, что позволяет осуществить программную реализацию математической модели движения судна на мелководье при переменной глубине района плавания, без многократного перерасчета значений этих коэффициентов.

4. Разработана математическая модель циркуляции судна на мелководье при переменной глубине и выполнена ее программная реализация, что обеспечивает более широкие возможности моделирования, в частности, позволяет заменить натурные и физические эксперименты математическим моделированием и проведением исследований на ЭВМ и, как следствие, сократить на этой основе материальные и временные затраты.

5. Разработана математическая модель движения судна на мелководье при переменной глубине района плавания, с учетом аналитических зависимостей влияния изменения глубины мелководья на гидродинамические коэффициенты в уравнениях гидродинамики судна,

определяемые как функции отношения осадки судна к глубине мелководья, что позволяет проводить исследования динамических характеристик судов на мелководье при переменной глубине района плавания.

6. Разработана программа расчета для построения кривых *D*-разбиения, что позволило выбирать параметры авторулевого в области устойчивости системы автоматического управления движением судов.

7. Выполнена программная реализация разработанных математических моделей на мелководье с переменной глубиной. Это позволяет проводить дальнейшие исследования по изучению динамических характеристик судов на мелководье с неровным рельефом дна, а также использовать разработанный комплекс программ для выяснения поведения проектируемого судна в той или иной ситуации и при выполнении того или иного маневра, а также определять причины аварий, связанных с неэффективным маневрированием на морском и речном транспорте.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

Дальнейшее развитие предложенных математических моделей гидродинамики движения судов на мелководье с переменной глубиной может быть связано с необходимостью учета волнения водной поверхности на мелководье при переменной глубине при управлении судном по заданной криволинейной траектории.

Основные положения и результаты диссертационного исследования опубликованы в следующих работах:

I. Статьи опубликованные в научных журналах и изданиях, определенных в Перечне ВАК РФ:

1. Абдуллаева, З.М. Моделирование влияния мелководья на гидродинамические коэффициенты при уравнениях гидродинамики судна / Г.К. Асланов, З.М. Абдуллаева // Вестник Дагестанского государственного технического университета. - 2011. - № 3 (Т.22). – С.54-58. (0,5/0,25 п.л.)

2. Абдуллаева, З.М. Математическая модель движения судна на мелководье / Г. К.. Асланов З. М. Абдуллаева // Вестник Дагестанского государственного технического университета. - 2012. - № 4 (Т.27). – С.36-41. (0,5/0,25 п.л.)

3. Абдуллаева, З.М. Результаты моделирования движения судна на мелководье / Г.К. Асланов, З.М. Абдуллаева, М.Л. Яхьяев // Вестник Дагестанского государственного технического университета. - 2015. - № 1 (Т.36). – С.45-53. (0,9/0,3 п.л.)

4. Абдуллаева, З.М. Моделирование движения судна на мелководье по заданной траектории при переменной глубине / З.М. Абдуллаева // Вестник Дагестанского государственного технического университета. - 2017. - № 3 (Т.44). – С.93-102. (0,8 п.л.)

II. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

5. Абдуллаева, З. М. Моделирование движения судна на мелководье / З. М. Абдуллаева, М. Л. Яхьяев // Свидетельство о государственной

регистрации программы для ЭВМ №2014662089. Заявл. №2014614843 от 23.05.2014г: опубл. 21.11.2014г.

6. Абдуллаева, З. М. Моделирование движения судна на мелководье по криволинейной траектории / Г.К. Асланов, З. М. Абдуллаева, М. Л. Яхьяев// Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016611225. Заявл. №2015615208: опубл.28.01.2016г.

III. Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:

7. Магомедова, З. М. Особенности гидродинамики судна на мелководье/ З.М. Магомедова // Современные информационные технологии в проектировании, управлении и экономике: материалы III Всероссийской конференции по актуальным проблемам внедрения и развития сектора IT-технологий, 22-25 сентября 2008г. - Махачкала: ДГТУ, 2008.- С. 77-85. (0,44 п.л.)

8. Магомедова, З.М. Аналитическое описание кривых влияния мелководья на гидродинамику судна / Г. К. Асланов, З.М. Магомедова // Современные информационные технологии в проектировании, управлении и экономике: материалы шестой Всероссийской конференции по актуальным проблемам внедрения и развития сектора IT-технологий, 28 – 29 сентября 2011 г. – Махачкала: ДГТУ, 2011. – С.83-85. (0,125/0,06 п.л.)

9. Абдуллаева, З. М. Влияние мелководья на гидродинамические характеристики корпуса судна / З. М.Абдуллаева // Системные технологии. –2013.-№9.-С.66-72. (0,7 п.л.)

10. Абдуллаева, З. М. Математическая модель движения судна по криволинейной траектории / Г. К. Асланов, З. М. Абдуллаева // Молодежь, наука, инновации: материалы II Всероссийской научно-практической конференции. – Грозный: ГГНТУ имени М. Д. Миллионщикова, 2013. – С. 27-34. (0,8/0,4 п.л.)

11. Абдуллаева, З. М. Анализ результатов моделирования движения судна на мелководье / Г. К. Асланов, З. М. Абдуллаева // Молодежь, наука, инновации: материалы II Всероссийской научно-практической конференции. – Грозный: ГГНТУ имени М. Д. Миллионщикова, 2013. – С. 44-50. (0,8/0,4 п.л.)

12. Абдуллаева, З.М. Особенности циркуляции судна на мелководье при неровном дне/ З. М. Абдуллаева // Фундаментальные и прикладные проблемы математики, информатики в современной науке: теория и практика актуальных исследований: материалы Всероссийской научно-технической конференции, 19-21 октября 2016. – Махачкала: ДГТУ. - С. 89-92. (0,37 п.л.)

13. Абдуллаева, З.М. Разработка и реализация методов управления движения судна на мелководье по заданной траектории при неровном дне / З. М. Абдуллаева // Современные информационные технологии в проектировании, управлении и экономике: материалы X Всероссийской научно-практической конференции. – Махачкала: ДГТУ, 2016.- С.113-119. (0,32 п.л.)