

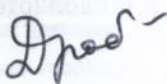
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
ОДЕССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ДРОБЫШЕВСКИЙ
Юрий Евгеньевич

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И КИНЕМАТИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ МАНЕВРИРОВАНИЯ СУДОВ
В СТЕСНЕННЫХ АКВАТОРИЯХ

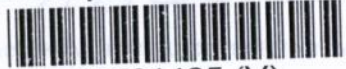
Специальность 05.08.01 — Теория корабля



А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса — 1995

29.5.01



00761485 (V)

Работа выполнена в университете (ОГМУ).

ОМ

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор **ВОРОБЬЕВ Ю. Л.**

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор **ДЫХТА Л. М.**, Украинский государственный морской технический университет;
- кандидат технических наук, доцент **КРЫЛОВ О. Н.**, Государственная судоходная компания «Черноморское морское пароходство».

Ведущая организация — Одесская государственная морская академия.

Защита состоится 22 ноября 1995 года в 14.00 в аудитории № 309 (конференцзал) на заседании специализированного совета К 05.11.02 при ОГМУ по адресу: 270029, Одесса, ул. Мечникова, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан « 20 » октября 1995 г.
ЛНБ України
АН України

Ученый секретарь
 специализированного совета
 кандидат технических наук,
 доцент

КНЯЗЕВ Л. В.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Проблемы обеспечения навигационной безопасности судов в последние годы находятся в центре внимания судоводителей, судовладельцев и ученых. Этот интерес обусловлен увеличением размеров судов, особенно перевозящих опасные грузы, а также трагическим опытом аварий и связанным с ними огромным ущербом. Во многих случаях аварии происходят из-за недостаточных маневренных качеств судна или неверных действий судоводителей в связи с недооценкой влияния условий плавания на управляемость судов. Характеристики, принятые обычно в качестве показателей управляемости на глубокой воде, не отражают в полной мере маневренных качеств судна при движении в стесненной акватории - на мелководье, вблизи других судов и препятствий. Элементы движения судна выступают в качестве определяющих факторов при проектировании водных путей и акваторий портов. Указанные обстоятельства обуславливают необходимость разработки надежных методов прогнозирования движения судна при маневрировании в различных гидрометеорологических условиях на ограниченной по глубине и ширине акватории. Такая задача может быть решена путем имитационного моделирования движения судна на ЭВМ. Для разработки математической модели необходимо определить силы различных категорий, действующие на судно. Определение гидродинамических сил, действующих на корпус судна, представляет сложную задачу гидромеханики; ее решение в общем виде в настоящее время затруднительно. В особой степени это относится к плаванию на мелководье и "сильным" маневрам, когда движение судна характеризуется большими углами дрейфа и угловой скоростью вращения.

В настоящей диссертационной работе рассмотрена актуаль-

ная проблема определения гидродинамических характеристик (ГДХ) корпуса судна, маневрирующего на мелководье. На основе выполненного исследования разработана математическая модель управляемого движения судна в стесненной акватории.

Цель работы заключается в :

- теоретическом исследовании ГДХ корпуса для двух характерных режимов движения судна - "слабых" и "предельно сильных" маневров, различие между которыми в гидродинамическом смысле состоит в наличии либо отсутствии несущих свойств корпуса как крыла малого удлинения ;
- экспериментальном исследовании закономерностей отрывного обтекания поперечных сечений корпуса на мелководье ;
- разработке метода расчета ГДХ корпуса, применимого при любых значениях угла дрейфа и угловой скорости вращения ;
- создании математической модели управляемого движения судна в стесненной акватории и ее реализации в виде комплекса программы для имитационного моделирования.

Научная новизна работы.

Методологической основой работы явилась модель удлиненного тела; ее использование в задачах управляемости связано с исследованиями К.К.Федяевского и Г.В.Соболева, предложивших метод расчета ГДХ корпуса на глубокой воде, известный как "циркуляционно-отрывная теория". Случай мелководья рассмотрен в 1969 г. Ньюманом, который, используя метод сравнимых асимптотических разложений, исследовал задачу о движении удлиненного тела в идеальной жидкости между двумя параллельными стенками. Однако последние результаты не учитывали нелинейные составляющие поперечной силы и момента, обусловленные эффектами вязкости, и поэтому не получили распро-

странения для практических расчетов.

Научная новизна работы заключается в :

- разработке теоретико-экспериментального метода расчета ГДХ корпуса, применимого при любых значениях угла дрейфа и угловой скорости вращения; метод является обобщением "циркуляционно-отрывной теории" на случай мелководья;
- теоретическом исследовании особенностей плоской краевой задачи о потенциале скоростей при обтекании контура между двумя параллельными стенками; изучено важное свойство комплексного потенциала, используемое при решении гидродинамических задач для мелководья ;
- экспериментальном определении позиционных ГДХ управляемости моделей судов, а также гидродинамического момента, действующего на модель при вращении без хода, на глубокой воде и мелководье при относительной глубине до $H/T = 1.2$;
- экспериментальном исследовании влияния мелководья на коэффициенты сопротивления цилиндров большого удлинения. При этом установлено, что относительное увеличение сопротивления на мелководье существенно зависят от формы поперечного сечения цилиндра; оно является наибольшим для контуров без фиксированных точек отрыва. С уменьшением относительной глубины ($H/T < 1.3$) коэффициенты сопротивления для контуров различной формы принимают близкие значения.

Практическая ценность работы состоит в создании математической модели управляемого движения судна в стесненной акватории. Модель реализована в виде пакета программ для имитационного моделирования, который позволяет проводить численные эксперименты по определению элементов движения судна как на мелководье, так и на глубокой воде, с учетом ветра,

течения и ограниченной акватории по ширине. Пакет программ практически использован при разработке информационных документов о маневренных элементах для 48 типов судов Черноморского морского и Украинского Дунайского пароходств в соответствии с резолюцией ИМО А.601(15); применяется при выполнении научно-исследовательских работ и решении практических проблем, связанных с расчетами маневрирования, анализом аварийных ситуаций и аварий судов, а также в учебном процессе на кораблестроительном факультете ОГМУ.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на Всесоюзных научно-технических конференциях "Крыловские чтения" в 1989, 1991 г., на международном научно-методическом семинаре по гидродинамике судна в 1990 г. (Варна, Болгария), на международной конференции САДМО/94 в 1994 г. (Саутгемтон, Великобритания), на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ОГМУ в 1991, 1992, 1993, 1994, 1995 г.г.

Публикации. Результаты исследований по теме диссертационной работы отражены в 5 публикациях, перечисленных в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Общий объем работы составляет 177 страниц машинописного текста, включая 39 рисунков, 4 таблицы, библиографический список из 105 источников и 2 приложения.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность разработки надежных методов математического моделирования движения судна в стес-

ненной акватории; приведена краткая характеристика метода исследования и полученных результатов.

В первой главе рассмотрена проблема определения характеристик движения судна при маневрировании.

Математическое моделирование движения судна выполняется на основе системы трех дифференциальных уравнений, описывающих движение судна в плоскости ватерлинии: кинематическими параметрами движения являются угол дрейфа β , линейная скорость U и угловая скорость вращения ω . Система дополняется уравнениями, описывающими работу двигателей и гребных винтов. Обоснование структуры математической модели и анализ соответствующих гидродинамических проблем содержатся в работах А.М.Басина, Г.В.Соболева, Р.Я.Першица, В.Г.Павленко, А.Д.Гормана, Норрина, Нычмана, Яну и других авторов.

Методы расчета неинерционных гидродинамических сил, действующих на корпус судна при движении на мелководье, пригодные во всем диапазоне углов дрейфа и угловой скорости, до настоящего времени не разработаны; наиболее распространены зависимости в виде разложений коэффициентов C_x , C_y , C_z в ряды Тейлора по степеням β , ω , U . При моделировании "сильных" маневров такой подход не обеспечивает необходимой точности расчетов. В проблеме определения ГДК корпуса можно выделить три группы исследований. Известные теоретические решения получены в рамках теории идеальной жидкости и базируются на замене корпуса системой особенностей. Отдельное направление составляют работы, основанные на модели удлиненного судна и методе сравнимых асимптотических разложений (САР). Метод САР показал высокую эффективность при решении задач гидродинамики судна на значительном мелководье (когда глубина аква-

тории близка к осадке), а также на экватории, ограниченной по ширине. Основные исследования в этой области выполнены Ньманом, Таксом, Д.И.Воробьевым; ряд важных задач решен К.В.Роздественским, Хессом, Бекон, Янгом. Однако для поперечной силы и момента рыскания, обусловленных углом дрейфа и угловой скоростью, как правило, удается достичь лишь качественного соответствия экспериментальным данным. Это связано, главным образом, с линейным характером решений, причем эффекты вязкости жидкости при поперечном обтекании корпуса судна не учитываются. Циркуляционно - отрывная теория, развитая К.К.Федяевским и Г.В.Соболевым, сочетает теоретические результаты гидродинамики удлиненных тел и экспериментальные данные о сопротивлении цилиндров большого удлинения. Раздельное вычисление "циркуляционной" и "отрывной" составляющих ГДХ и их последующее суммирование использовано рядом авторов для построения расчетных методик и интерпретации результатов экспериментов. Обширные экспериментальные исследования выполнены Р.Я.Першицем и Н.И.Анисимовой, М.Х.Тилевичем и В.И.Коганом, В.Г.Павленко, Ю.М.Мастушкиным, Инум, Шарма, Фулжино, Эда и другими авторами. Однако эксперименты на мелководье немногочисленны, а испытания моделей на значительном мелководье ($H/T < 1.5$) во всем диапазоне углов дрейфа - единичны.

На основании выполненного обзора определены задача и метод исследования темы диссертационной работы.

Во второй главе рассмотрена задача об определении ГДХ корпуса судна при маневрировании на мелководье.

Рассмотрим судно, совершающее движение на мелководье глубиной H , так, что вектор скорости судна \vec{U} лежит в плоскости ватерлинии. Для описания движения используем две

системы координат : неподвижную $O_1 \xi \eta \zeta$ и жестко связанную с корпусом $Oxuz$. Будем считать корпус судна удлиненным, т.е.

$$\frac{B}{L} = O(\varepsilon); \quad \frac{T}{L} = O(\varepsilon); \quad \frac{d\Omega}{dx} = O(\varepsilon); \quad \varepsilon \ll 1. \quad (1)$$

где L , B , T - длина, ширина и осадка судна; $\Omega = \Omega(x)$ - уравнение строевой по шпангоутам. Предполагая жидкость маловязкой, рассмотрим два характерных режима движения. В случае "слабых" маневров поперечную скорость сечений корпуса будем полагать малой, а продольную - конечной $(\bar{v}_y + \omega \cdot x) / \bar{v}_x = O(\varepsilon)$; $\bar{v}_y = -\bar{v} \sin \beta$; $\varepsilon \ll 1$. Под "предельно сильным" маневром будем понимать движение судна, при котором продольная скорость мала по сравнению с поперечной, т.е. $\bar{v}_x / (\bar{v}_y + \omega \cdot x) = O(\varepsilon)$. Последний случай практически соответствует перемещению судна с углами дрейфа, близкими к 90° , или вращению без хода.

При "слабых" маневрах вязкостные эффекты будем считать локализованными в области пограничной. Следуя подходу И.Г.Лойцянского, вместо реального судна рассмотрим движение в идеальной жидкости "эффективного" судна, образованного наращиванием толщины вытеснения на поверхность корпуса S (рис.1). Полагая пограничный слой относительно тонким, определение гидродинамических сил можно производить интегрированием давления по поверхности "эффективного" корпуса. За его кормой поверхность S^* переходит в поверхность C^* , образованную наращиванием толщины вытеснения на нулевую поверхность тока C в гидродинамическом следе судна. Такая схематизация обтекания корпуса переходит в схему линейной теории крыла, если рассмотреть предельный переход $\varepsilon \rightarrow 0$.

В случае "предельно сильных" маневров вследствие удлиненности корпуса возмущенное движение жидкости вблизи него

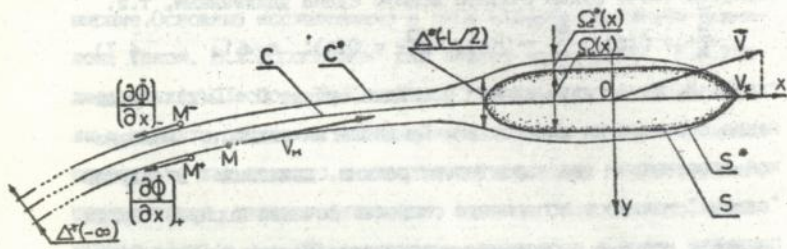


Рис. I. Схема "эффективного" корпуса

происходит в плоскостях шпангоутов. Погонная поперечная сила, обусловленная обтеканием части корпуса единичной длины потоком вязкой жидкости, может быть представлена в виде

$$\frac{dY}{dx} = \frac{\rho}{2} C_d(x) T(x) U(x) |U(x)|. \quad (2)$$

Здесь $C_d(x)$ - коэффициент сопротивления шпангоутного контура; $U(x)$ - поперечная скорость потока, обтекающего шпангоут с абсциссой x . При движении на глубокой воде $U(x) = -(U_y + \omega x)$, а на мелководье скорость $U(x)$ подлежит определению путем решения гидродинамической задачи для потенциала скоростей.

Жидкость, в которой плавает судно, считаем идеальной и несжимаемой, ее возмущенное движение - потенциальным. Краевую задачу для потенциала $\Phi(\xi, \eta, \zeta, t)$ рассмотрим в предположениях линейной теории волн. Введя полуподвижную систему координат $O_x x_0 y_0 z_0$, связанную с неподвижной соотношениями $\xi = U_x t + x_0$; $\eta = y_0$; $\zeta = z_0$, получим следующую краевую задачу для потенциала возмущенных скоростей $\Phi(x_0, y_0, z_0)$, описывающего поперечное обтекание корпуса при "слабых" маневрах:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x_0^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_0^2} + \frac{\partial^2}{\partial z_0^2} \right) \Phi = 0; \quad (x_0, y_0, z_0) \in V^*; \quad (3)$$

$$\left[\frac{c^2}{\partial x_0^2} - \frac{g}{v_x^2} \frac{\partial}{\partial z_0} \right] \Phi = 0; \quad z_0 = 0; \quad (x_0, y_0) \in \Sigma^* ; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z_0} = 0; \quad z_0 = H; \quad -\infty < x_0 < +\infty; \quad -\infty < y_0 < +\infty ; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = v_x \cos(n, x_0); \quad (x_0, y_0, z_0) \in S^* \cup C^* ; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \begin{cases} (v_y + \omega z) \cos(n, y_0); & (x_0, y_0, z_0) \in S^* \\ 0 & ; (x_0, y_0, z_0) \in C^* \end{cases} ; \quad (7)$$

$$|\vec{\text{grad}} \Phi| \rightarrow 0; \quad R = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \rightarrow \infty \quad (8)$$

Здесь Σ^* - плоскость $O_2 x_0 y_0$ с исключенной ватерлинией "эффективного" корпуса и проекция поверхности C^* на эту плоскость. Область определения потенциала E^* ограничена поверхностью S^* , свободной поверхностью жидкости Σ^* и дном водоема $\zeta = H$.

Область, занятую жидкостью, условно разделим на две зоны: внешнюю, где $y_0/L = O(1)$, $z_0/L = O(1)$, и внутреннюю, где $y_0/L = O(\epsilon)$, $z_0/L = O(\epsilon)$. Краевую задачу рассмотрим в каждой из зон отдельно, причем мелководье будем считать "значительным", т.е. $H/T = O(1)$; $H/L = O(\epsilon)$; $\epsilon \ll 1$. Обратимся к внешней зоне. Разлагая функцию $\Phi(x_0, y_0, z_0)$ в ряд по степеням $(z_0 - H) = O(\epsilon)$ и удерживая члены, порядок которых не выше ϵ^2 , получим следующую краевую задачу для потенциала $\Phi(x_0, y_0, z_0) = \Phi(x_0, y_0) + O(\epsilon^2)$:

$$\left[x^2 \frac{\partial^2}{\partial x_0^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_0^2} \right] \Phi(x_0, y_0) = 0, \quad (x_0, y_0) \in \Sigma_0 ; \quad (9)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y_0} = v^0(x_0); \quad |x_0| \leq \frac{L}{2}; \quad y_0 = \pm 0 ; \quad (10)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0; \quad r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} ; \quad (11)$$

где $\alpha^2 = 1 - F_n^2$; $F_n = U_n / \sqrt{gH}$.

Область определения Σ_0 потенциала $\Phi(x_0, y_0)$ - плоскость $O_2 x_0 y_0$ с исключенным отрезком $[-L/2; +L/2]$ оси $O_2 x_0$. $U^0(x_0)$ - неизвестная функция, представляющая во внешней зоне поперечную скорость возмущенного движения жидкости. Во внешней зоне движение жидкости двумерно и происходит в горизонтальной плоскости. "Эффективный" корпус S^* представляется отрезком $[-L/2; +L/2]$ оси $O_2 x_0$, а поверхность Φ^* - лучом $(-\infty; -L/2)$. При $x_0 = -L/2$ имеет место условие Лувского - Чельгина:

$$\left. \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_0} \right)_{y_0 = +0} = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_0} \right)_{y_0 = -0} \quad (12)$$

Для исследования течения во внутренней зоне введем "растянутые" координаты $Y_0 = y_0/\epsilon$, $Z_0 = z_0/\epsilon$. Тогда, с точностью до малых второго порядка, течение жидкости двумерно и происходит в плоскостях эллиптов. Обозначим $V_y = U_y + \omega x$, и введем потенциал Φ^* , который описывает возмущенное движение жидкости в системе координат (Y, Z) , жестко связанной с контуром α^* : $\Phi^* = \Phi - V \cdot Y$. Тогда получим следующую краевую задачу во внутренней зоне:

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2}{\partial Z^2} \right] \Phi^*(x; Y, Z) = 0; \quad (Y, Z) \in \mathbb{R}_0; \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial Z} \Phi^*(x; Y, Z) = 0; \quad z = 0; \quad |Y| > \frac{1}{2} b^*(x); \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial Z} \Phi^*(x; Y, Z) = 0; \quad z = h; \quad -\infty < Y < +\infty; \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial N} \Phi^*(x; Y, Z) = 0; \quad (Y, Z) \in \alpha^*(x); \quad (16)$$

$$\lim_{Y \rightarrow \pm \infty} \Phi^* = U(x)(Y \pm C(x)); \quad 0 \leq Z \leq h; \quad (17)$$

Здесь E_0 - полоса $\{-\infty < Y < +\infty; 0 \leq Z \leq h\}$ с исключенным контуром z^* ; $h = H/\varepsilon$ - глубина воды, а $b^*(x) = B(x)/\varepsilon$ - ширина шпангоутного контура с абсциссой x в "растянутой" системе координат; координата x рассматривается как параметр. функция $U(x)$ - неизвестная скорость потока, обтекающего контур z^* во внутренней зоне. "Коэффициент блокировки" $C(x)$ - постоянная, определяемая формой контура z^* и глубиной воды h .

В случае "предельно сильных" маневров краевая задача для $\Phi(x_0, y_0, z_0)$ получается из предыдущей, если положить $U_x = 0$. Граничное условие (7) выполняется на поверхности корпуса S , а поверхность C^* отсутствует. Поэтому во внешней зоне имеет место задача (9) - (II), причем $\varkappa = 1$. Условие (I2) не используется, а поведение потенциала вблизи конечностей корпуса должно быть специально оговорено. Краевая задача во внутренней зоне имеет вид (I3) - (I7), однако контур сечения "эффективного" корпуса z^* заменяется контуром шпангоута z .

Точное решение краевой задачи (I3) - (I7) не требуется; необходима лишь его асимптотика при $Y \rightarrow \pm \infty$. Такая асимптотика дается соотношением (I7), которое впервые было получено Л.И.Селовым. В настоящей работе выполнено исследование плоской задачи об обтекании контура z идеальной жидкостью со скоростью U между двумя параллельными стенками, расстояние между которыми равно $2h$. Представив потенциал в виде $\Phi = U(y + \phi)$ и применяя к комплексному потенциалу $\mathbb{W}(\zeta) = \Phi + i\psi$; ($\zeta = y + iz$) теорему Коши, можно показать следующие свойства единичных потенциала и функции тока

$$\begin{aligned} \psi_{\pm} &= \lim_{y \rightarrow \pm\infty} \phi = \pm C_{\phi} ; & \psi_{\pm} &= \lim_{y \rightarrow \pm\infty} \psi = \pm C_{\psi} ; \\ C_{\phi} &= \frac{1}{4h} \left[\Omega + \frac{\lambda_y}{\rho} \right]; & C_{\psi} &= \frac{1}{4h} \frac{\lambda_{yz}}{\rho} \end{aligned} \quad (I8)$$

Здесь Ω - площадь контура z ; λ_y, λ_{yz} - присоединенная масса контура при поперечном движении и коэффициент связи соответственно. Применяя (18) к краевой задаче во внутренней зоне и переходя к полууподвижной системе координат, находим

$$\Phi(x_0; Y_0, Z_0) \sim \int_{Y \rightarrow \pm \infty} [U(x_0) + V_y(x_0)] \cdot Y_0 \pm U(x_0) G(x_0), \quad (19)$$

где

$$G(x) = \frac{1}{2h} \left[\Omega(x) + \frac{\lambda_{yz}(x)}{\rho} \right].$$

Решение задачи во внешней зоне, следуя Ньману, удобно выполнить введя комплексную скорость $W(\zeta) = u - iV$ и представляя ее интегралом типа Коши. Используя свойства предельных значений интеграла типа Коши, можно получить выражения для скорости $u(x_0; \pm 0), V(x_0; \pm 0)$ на "берегах" разреза $[-L/2; L/2]$ оси $O_2 x_0$, которые содержат неизвестную постоянную Q и функцию $V^0(x_0)$. Указанные выражения представляют собой решение внешней задачи на внутренней границе внешней зоны. Решение внутренней задачи на внешней границе внутренней зоны получим из (19). "Сравнение" решений задач на границах зон приводит к уравнению:

$$\frac{d}{dx_0} [U(x_0) G(x_0)] = - \frac{1}{\pi \sqrt{\left(\frac{L^2}{4} - x_0^2\right)^{1/2}}} \text{v.p.} \int_{-L/2}^{L/2} [U(\xi) + V_y(\xi)] \cdot x \frac{\left(\frac{L^2}{4} - \xi^2\right)^{1/2}}{\xi - x_0} d\xi + \frac{Q}{\left(\frac{L^2}{4} - x_0^2\right)^{1/2}} \quad (20)$$

Для решения интегро-дифференциального уравнения (20) относительно скорости $U(x_0)$ необходимо использовать условия о поведении функции $U(x_0)$ вблизи конечностей кортуса.

Для "слабых" маневров в кормовой конечности должно выполняться условие (12), которое с учетом (19) имеет вид:

$$\frac{d}{dx} [U(x)C(x)] = 0; \quad x = -\frac{L}{2}. \quad (21)$$

В носовой оконечности используем условие $U(L/2)C(L/2)=0$.

Введя функцию $V(x) = U(x) + V_y(x)$ и преобразуя (20), получим интегральное уравнение в безразмерной форме:

$$\alpha V(x)C(x) = \left[\frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1+x}{1-x}} - 1 \right] \int_{-1}^1 V(\xi) \left[\frac{1-\xi}{1+\xi} \right]^{1/2} d\xi -$$

(22)

$$- \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 V(\xi) \operatorname{arctg} \left| \frac{x-\xi}{1-x\xi - \sqrt{(1-x^2)(1-\xi^2)}} \right| d\xi + \alpha V_y(x)C(x).$$

В случае "предельно сильных" маневров, преобразуя (20) при $\alpha = 1$, и применяя условия $U(x)C(x) = 0; \quad x = \pm L/2$, получим следующее интегральное уравнение относительно $V(x)$

$$V(x)C(x) = - \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 V(\xi) K(x, \xi) d\xi + V_y(x)C(x); \quad (23)$$

$$K(x, \xi) = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left| \frac{1-x\xi + \sqrt{(1-\xi^2)(1-x^2)}}{1-x\xi - \sqrt{(1-\xi^2)(1-x^2)}} \right|. \quad (24)$$

Для решения интегральных уравнений (22), (23) в работе использован эффективный итерационный процесс. Учитывая линейность уравнений, решение $U(x)$, соответствующее движению судна с углом дрейфа β и угловой скоростью ω , запишем в виде

$$U(x) = -v \sin \beta \cdot U_\beta(x) + \omega \cdot U_\omega(x), \quad (25)$$

где $U_\beta(x)$, $U_\omega(x)$ - решения уравнения при $V_y = 1$ и $V_y = x$ соответственно. При определении функции $U(x)$ в случае "слабых" маневров коэффициент блокировки $C(x)$ вычисляется для поперечного сечения "эффективного" корпуса; для "предельно сильных" маневров $C(x)$ соответствует реальному контуру шпан-

гоута. Обратимся к вычислению поперечной силы и момента рыскания. Используя предположение об удлиненности корпуса, для погонной поперечной силы на мелководье получим

$$\frac{dY}{dx} = \rho \left[\frac{\partial}{\partial t} - v_x \frac{\partial}{\partial x} \right] \left[V_y(x) \Omega(x) + 2Hv(x)C(x) \right]. \quad (26)$$

В случае глубокой воды

$$\frac{dY}{dx} = \rho \left[\frac{\partial}{\partial t} - v_x \frac{\partial}{\partial x} \right] \left[-V_y(x) \lambda_{22}(x) \right]. \quad (27)$$

Подставим в (26) решение уравнения (25), введем функции

$$\lambda_\beta(x) = -2\rho HC(x)U_\beta(x) - \rho\Omega(x); \quad \lambda_\omega(x) = -2\rho HC(x)U_\omega(x) - \rho\Omega(x)$$

и определим поперечную силу и момент рыскания интегрируя (26) по длине судна. Опуская члены, соответствующие инерционным силам, и используя безразмерные величины

$$\lambda = \frac{2T}{L}; \quad \bar{x} = \frac{2x}{L}; \quad t(\bar{x}) = \frac{T(x)}{T}; \quad \bar{\omega} = \frac{\omega \cdot L}{v}$$

$$K_\beta(\bar{x}) = \frac{\lambda_\beta(x)}{2 \rho \pi T^2(x)}; \quad K_\omega(\bar{x}) = \frac{\lambda_\omega(x)}{4 \rho \pi T^2(x) L} \quad (28)$$

получим формулы для коэффициентов поперечной силы и момента

$$C_Y = \frac{2Y}{\rho v^2 L^2 \sigma} = A_\beta \sin\beta \cos\beta + A_\omega \bar{\omega} \cos\beta; \quad (29)$$

$$C_M = \frac{2M}{\rho v^2 L^2 \sigma} = B_\beta \sin\beta \cos\beta + B_\omega \bar{\omega} \cos\beta, \quad (30)$$

где

$$A_\beta = \frac{\pi\lambda}{2\sigma} K_\beta^*(-1) \cdot t^2(-1); \quad A_\omega = -\frac{\pi\lambda}{4\sigma} K_\omega^*(-1) \cdot t^2(-1); \quad (31)$$

$$B_\beta = \frac{\pi\lambda}{4\sigma} \left[\int_{-1}^1 t^2(x) K_\beta^*(x) dx - K_\beta^*(-1) \cdot t^2(-1) \right];$$

$$B_\omega = -\frac{\pi\lambda}{8\sigma} \left[\int_{-1}^1 t^2(x) K_\omega^*(x) dx - K_\omega^*(-1) \cdot t^2(-1) \right].$$

σ - коэффициент полноты погруженной части диаметра судна. Коэффициенты C_y , C_m на глубокой воде найдем, используя (27); при этом формулы (29), (30) сохраняют силу, а в выражениях для A_p , A_w , B_p , B_w фигурирует коэффициент присоединенной массы контура.

Полученные выражения позволяют найти поперечную силу и момент, если известна поверхность S^* , для чего необходимо определить характеристики пограничного слоя. Учитывая, что в носовой части корпуса толщина пограничного слоя мала, а эффект оттеснения внешнего потока проявляется главным образом в кормовой части, введем упрощенную форму "эффективного" корпуса

$$\Omega^*(x) = \begin{cases} \Omega(x); & x_0 \leq x \leq L/2 \\ \Omega(x_0); & -L/2 \leq x < x_0 \end{cases} \quad (32)$$

где x_0 - абсцисса некоторого "характерного" сечения. В этом случае формулы для A_p , A_w , B_p , B_w на глубокой воде можно преобразовать к виду, в котором фигурирует x_0 и коэффициент присоединенной массы эллиптического контура корпуса. Эти формулы по структуре аналогичны выражениям, предложенным Г.В.Соболевым, формулы (31), определяющие ГДХ на малковалье, в общем случае не допускают такого упрощения.

В случае "предельно сильных" маневров поперечную силу и момент, обусловленные вязкостью жидкости, найдем, подставляя решение уравнения (23) в (2) и выполняя интегрирование по длине корпуса

$$C_y = \frac{1}{2\sigma} \int_{-1}^1 t(x) C_d(x) f(x) |f(x)| dx; \quad (33)$$

$$C_m = \frac{1}{4\sigma} \int_{-1}^1 xt(x) C_d(x) f(x) |f(x)| dx. \quad (34)$$

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

$$\text{где } f(x) = \bar{\omega} \frac{U_{\omega}(x)}{L} - U_{\beta}(x) \cdot \sin \beta ; \quad (35)$$

$\bar{\omega}(x)$ - коэффициент сопротивления дублированного шпангоутного контура, движущегося между двумя параллельными стенками. Для случая глубокой воды $f(x) = \bar{\omega} \frac{x}{2} - \sin \beta$, а коэффициент C_d соответствует движению контура в безграничной жидкости.

Форма оконечностей многих судов такова, что их обтекание в горизонтальной плоскости, имеющее отрывной характер, является источником дополнительных гидродинамических сил. Для их оценки в работе использован приближенный прием, основанный на аналогии между судном на предельном мелководье ($H/T = 1$) и крылом бесконечно большого удлинения.

Третья глава посвящена описанию экспериментов по определению ГДХ управляемости моделей судов, выполненных в опытовом бассейне ОГМУ по инициативе и при участии автора с целью накопления фактического материала о ГДХ управляемости судов, а также разработки и проверки метода расчета. Объекты исследования: модели танкера "Крым", речного пассажирского судна "Украина", танкера "В.Правик" и модель 60 серии Талда с коэффициентом общей подпюты 0.70. Определены позиционные характеристики управляемости (поперечная сила и момент рыскания) в диапазоне углов дрейфа $0^{\circ} - 180^{\circ}$, а также гидродинамический момент, действующий на модель при вращательном движении без хода. Эксперименты выполнялись на глубокой воде и мелководье при $H/T = 1.2, 1.5, 2.0$; их результаты приведены в приложении I к диссертационной работе.

Для оценки коэффициентов сопротивления шпангоутных контуров выполнены эксперименты по определению сопротивления пяти цилиндрических моделей: прямоугольного цилиндра с

острой и скругленной скуловой линией, треугольного цилиндра с острой и скругленной килевой линией, а также кругового цилиндра. Все модели имели относительную ширину $B/T = 2$. Измерение сопротивления проводилось при буксировке моделей с углом дрейфа 90° . В экспериментах на мелководье цилиндрическая модель буксировалась лагом в прямоугольном канале, для чего в спытовом бассейне были установлены неподвижные боковые экраны. Такая постановка экспериментов позволила исключить влияние пространственного обтекания. Полученные в опытах коэффициенты сопротивления на глубокой воде хорошо согласуются с известными данными других авторов. Экспериментальные значения коэффициентов сопротивления приведены на рис. 2. Установлено, что относительное увеличение сопротивления на мелководье су-

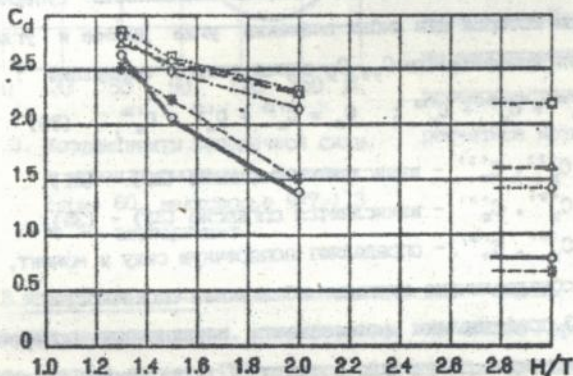


Рис. 2. Коэффициенты сопротивления, шпангоутных контуров при движении на мелководье

- полукруг ; ——*— прямоугольник $R_{sk}/B = 0.167$
- прямоугольник ; ——◇— треугольник $R_{sk}/B = 0.152$
- △— треугольник .

Примечание : При $H/T = 3.0$ условно показаны значения коэффициентов, соответствующие глубокой воде ($H = \infty$)

щественно зависит от формы контура; оно является наибольшим для контуров без фиксированных точек отрыва. С уменьшением глубины коэффициенты сопротивления для контуров различной формы принимают близкие значения; так при $H/T = 1.3$ значения C_d для всех контуров лежат в диапазоне 2.6 - 2.9.

На основании результатов экспериментов создана методика определения коэффициентов сопротивления шпангоутных контуров и теоретико-экспериментальный метод расчета ГДХ корпуса судна. Сопоставительными расчетами подтверждена возможность использования упрощенной формы "эффективного" корпуса (34), а также установлены закономерности для выбора абсциссы X_0 в зависимости от особенностей формы корпуса.

Анализ результатов расчетов ГДХ корпуса при "слабых" и "предельно сильных" маневрах показал возможность суперпозиции, при которой для любых значений угла дрейфа и угловой скорости коэффициенты C_y , C_m определяются формулами:

$$C_y = C_y^{(1)} + C_y^{(2)} + C_y^{(3)}; \quad C_m = C_m^{(1)} + C_m^{(2)} + C_m^{(3)}, \quad (36)$$

причем $C_y^{(1)}$, $C_m^{(1)}$ - вычисляются согласно (29) - (31);

$C_y^{(2)}$, $C_m^{(2)}$ - вычисляются согласно (33) - (35);

$C_y^{(3)}$, $C_m^{(3)}$ - определяют поперечную силу и момент,

обусловленные отрывным обтеканием оконечностей.

На рис.3 представлены коэффициенты позиционной поперечной силы и момента, полученные расчетом, а также данные модельного эксперимента для модели 60 серии Тода при относительной глубине $H/T = 1.3$. Расчетные результаты для глубокой воды хорошо согласуются с экспериментальными для всех испытанных моделей. Изменение ГДХ на маловозле также хорошо описывается расчетными зависимостями, однако расчет несколько занижает

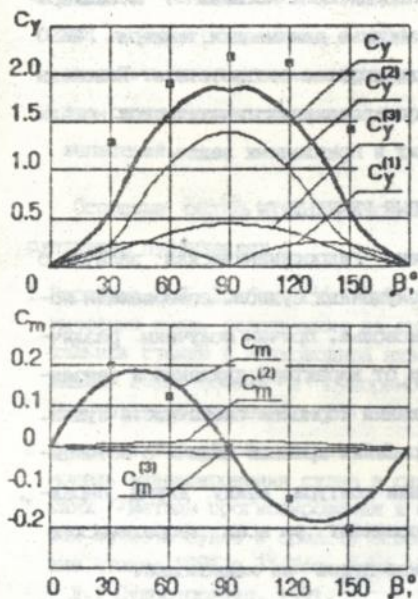


Рис.3. Коэффициенты поперечной силы и момента рыскания. Модель серии 60, мелководье $H/T=1.3$
 □ - эксперимент

величину поперечной силы при больших углах дрейфа. Расхождения обусловлены масштабным эффектом, просадкой моделей, а также, возможно, существенным увеличением сопротивления трения для широких шпангоутных контуров на мелководье. Намечены направления для усовершенствования расчетной методики.

В четвертой главе описана математическая модель управляемого движения судна, разработанная на основе предложенного метода расчета ГДХ корпуса. Для вычисления сил других категорий обобщены и использованы результаты известных теоретических и экспериментальных исследований. Описана структура программы для имитационного моделирования на персональной ЭВМ движения судна, приведены результаты расчетов стандартных маневров. Для сопоставления использованы данные натуральных испытаний, выполненных сотрудниками ОГУУ на лите-

ровозе "Индир Ганди" (типа "Алексей Косыгин") и балкере "Механик Дрен", а также известные данные для танкера "ESSO OSAKA"; результаты обнаружили хорошее соответствие. Изложены направления и примеры использования математической модели для решения исследовательских и прикладных задач.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. С помощью метода САР решена гидродинамическая задача о потенциале скоростей, возмущенных судном, совершающим поперечные движения на мелководье, причем получены различные решения в зависимости от характера движения и связанного с этим условия обтекания кормовой оконечности судна.
2. Изучено важное свойство решений краевой задачи о потенциале скоростей при обтекании контура между двумя параллельными стенками: она возникает во всех теоретических исследованиях гидродинамики судна на мелководье.
3. Проведены экспериментальные исследования позиционных ГДХ управляемости моделей судов различных типов на мелководье при относительной глубине до $H/T = 1.2$, а также гидродинамического момента, действующего на модель, совершающую вращение вокруг вертикальной оси без хода.
4. Выполнено экспериментальное исследование влияния мелководья на сопротивление цилиндров большого удлинения. Получены новые результаты о влиянии формы поперечного сечения цилиндра на коэффициент сопротивления на мелководье.
5. Предложен метод расчета ГДХ корпуса судна, маневрирующего на мелководье при любых углах дрейфа и угловой скорости вращения. Результаты расчетов обнаружили удовлетворительное соответствие с данными модельных экспериментов.

6. Создана математическая модель управляемого движения судна, которая реализована в виде пакета программ для имитационного моделирования. Проведена верификация модели путем сопоставления результатов расчетов с данными натурных испытаний.

Основные результаты диссертационной работы отражены в следующих публикациях :

1. Воробьев Ю.Л., Дробышевский Ю.Е., Евтихевич Ю.В. Гидродинамические силы, действующие на судно при подходе к вертикальной стенке в мелководной акватории // Современные проблемы судостроения и судоремонта. Сб. ОИИИФ: - М.: в/о "Мортехинформреклама", 1991. С. 10-15.

2. Воробьев Ю.Л., Дробышевский Ю.Е., Коханов Э.В. Имитационная модель маневрирования судна в сложных навигационных условиях // Методы прогнозирования и способы повышения мореходных качеств судов и средств освоения океана (XXXV Крыловские чтения 1991 г.): Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Л.: Судостроение, 1991.

3. Дробышевский Ю.Е., Коханов Э.В. Имитационная модель для исследования маневрирования судна в портовой акватории // Физико-математическое моделирование при решении проблем гидроаэромеханики и динамики судов и средств освоения океана (XXXIV Крыловские чтения 1989 г.): Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Л.: Судостроение, 1989.

4. Vorobiov Y.L., Drobishevskiy Y.E., Kokhanov E.V. Computer Simulation of a Ship Manoeuvres While Entering the Harbour // Scientific and Methodological Seminar on Ship Hydrodynamics. 19th Session.- 1990. - Varna.

5. Vorobyow Y.L., Drobyshevskiy Y.E. Mathematical simulation of ship manoeuvres in unbounded and restricted seas // Marine, Offshore and Ice Technology. Fifth International Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation In Ice (CADMO/94 and ITC/94). Southampton.- Computer Mechanics Publication.- 1994.- pp. 205 - 213.

Drobyshevskiy Y.E. Hydrodynamic and kinematic characteristics of ships manoeuvring in restricted waters. PhD thesis presented for Ship Theory 05.08.01, Odessa State Marine University, Odessa, 1995.

Method, based on the slender body theory, is proposed for evaluation of hydrodynamic forces acting on a ship manoeuvring in shallow water. Solutions for the boundary value problem for the velocity potential are obtained using matched asymptotic expansion method and then combined with results of experimental studies of a drag force acting on a hull cross sections moving in shallow water. Mathematical model of ship manoeuvres in restricted waters and the programme package are worked out for solving navigational safety problems by computer simulation.

Дробышевский Ю.Е. Гидродинамические и кинематические характеристики маневрирования судов в стесненных акваториях. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.01 - теория корабля, Одесский государственный морской университет, Одесса, 1995.

Предложен метод расчета гидродинамических сил, действующих на судно при маневрировании на мелководье, основанный на модели удлиненного тела. Решения краевых задач для потенциала скоростей получены методом сшиваемых асимптотических разложений и комбинируются с результатами экспериментального исследования сопротивления шпангоутных контуров при движении на мелководье. Разработана математическая модель маневрирования судна в стесненной акватории и комплекс программ для решения задач безопасности мореплавания методом имитационного моделирования.

Ключові слова :

Гідродинамічні характеристики, маневрування, мелководдя.

Зак. 1420, тир. 100, подл. к печ. 04.10.95г.
Усл. печ. лист 45. КМПУ Одесса
ул. Мечникова, 34

5.08 23

446204

AB 33.239