



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО МЕТАЛОЗНАНИЕ, СЪОРЪЖЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ „АКАД. А. БАЛЕВСКИ”
ЦЕНТЪР ПО ХИДРО- И АЕРОДИНАМИКА – ВАРНА

Секция “КОРАБНА ХИДРОДИНАМИКА И АЕРОДИНАМИКА”

Златко Златков Златев

**Числено моделиране на течението около
високоскоростен катамаран на дълбока
вода и плитководие**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация

за придобиване на образователната и научна степен „доктор”
в област 5 „Технически науки”,
професионално направление 5.5 „Транспорт, корабоплаване и
авиация”,
докторска програма „Теория на кораба”
(научна специалност 02.03.01)

Варна
май, 2012

Дисертационната работа е в обем 118 страници и съдържа 99 страници основен текст (от които 4 страници са списък на цитираната литература от 70 заглавия), 70 фигури и 20 таблици. Приложенията съдържат допълнително 18 страници.

Защитата на дисертацията се състоя наотчаса в зала.....на.....на разширено заседание на..... Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в Научно-техническата библиотека на ИМСТЦХА, етаж 5, стая....., адрес: ул.Уйлям Фруд, 1, кв.Аспарухово, Варна 9003, тел 052-370501.

ИНСТИТУТ ПО МЕТАЛОЗНАНИЕ, СЪОРЪЖЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ
„АКАД. А. БАЛЕВСКИ”
ЦЕНТЪР ПО ХИДРО- И АЕРОДИНАМИКА – ВАРНА
Секция “КОРАБНА ХИДРОДИНАМИКА И АЕРОДИНАМИКА”

Златко Златков Златев

**Числено моделиране на течението около
високоскоростен катамаран на дълбока
вода и плитководие**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация
за придобиване на образователната и научна степен „доктор”
в област 5 „Технически науки”,
професионално направление 5.5 „Транспорт, корабоплаване и
авиация”,
докторска програма „Теория на кораба”
(научна специалност 02.03.01)

Научен ръководител: *Доц., д-р, инж. Иван Василев Иванов, ТУ-Варна*

Научни консултанти: *Проф., д-р, инж. Евгени Методиев Миланов,
ИМСТЦХА-БАН, Варна*

*Проф., д-р Фредерик Стърн, Университет на
Айова, САЩ*

Варна
май, 2012

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита от Научния съвет на ИМСТЦХА-БАН по предложение на Специализирания колоквиум „Хидро- и аеродинамика” на ЦХА към ИМСТЦХА-БАН.

Докторантът работи в ИМСТЦХА-БАН-Варна .

Изследванията и разработването на дисертацията са осъществени в Института за Хидравлични изследвания на Айова към Университета на щат Айова, САЩ и в ИМСТЦХА-БАН-Варна

Автор: Златко Златков Златев

Заглавие: Числено моделиране на течението около високоскоростен катамаран
на дълбока вода и плитководие

Технически редактор:

Тираж: 60 бр.

Излязъл от печат:

Печат

Съдържание

CONTENTS	6
SUMMARY	7
ВЪВЕДЕНИЕ И ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА РАБОТАТА	9
ГЛАВА 1. СЪВРЕМЕНО СЪСТОЯНИЕ НА МЕТОДИТЕ ЗА СИМУЛАЦИЯ НА МАНЕВРЕНТО ДВИЖЕНИЕ НА КОРАБА	10
ГЛАВА 2. ОПИСАНИЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИТЕ ИЗСЛЕДВАНИЯ	11
ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛ НА МАНЕВРНОСТТА И ХИДРОДИНАМИЧНИ ПРОИЗВОДНИ	14
ГЛАВА 4. МАТЕМАТИЧЕСКА ПОСТАНОВКА И ЧИСЛЕН МЕТОД	17
ГЛАВА 5. СИМУЛАЦИОНЕН МОДЕЛ, ПЛАН НА СИМУЛАЦИИТЕ И СИМУЛАЦИОННА МАТРИЦА	21
ГЛАВА 6. ПРОЦЕДУРА ЗА ВАЛИДАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ НА РЕЗУЛТАТИ ОТ КОМПЮТЪРНИ СИМУЛАЦИИ	25
ГЛАВА 7. РЕЗУЛТАТИ ОТ ЧИСЛЕНИТЕ СИМУЛАЦИИ ПРИ ДВИЖЕНИЕ НА ПРАВ КУРС	26
ГЛАВА 8. РЕЗУЛТАТИ ОТ ЧИСЛЕНИТЕ СИМУЛАЦИИ ПРИ ДВИЖЕНИЕ СЪС СТАТИЧЕН ДРЕЙФ	28
ГЛАВА 9. РЕЗУЛТАТИ ОТ СИМУЛАЦИИТЕ НА ДИНАМИЧНИ ИЗПИТАНИЯ	30
ГЛАВА 10	33
ОБОБЩЕНИЕ НА ЧИСЛЕНИТЕ ИЗСЛЕДВАНИЯ. ОСНОВНИ ПРИНОСИ	33
ДЕКЛАРАЦИЯ ЗА ОРИГИНАЛНОСТ	35
ПРИЛОЖЕНИЕ А	36
СТАТИИ И ДОКЛАДИ, РАЗРАБОТЕНИ И ПУБЛИКУВАНИ В РАМКИТЕ НА ДИСЕРТАЦИЯТА	36
ПРЕЗЕНТАЦИИ И ПУБЛИЧНИ ИЗЯВИ, СВЪРЗАНИ С РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ДЕЙНОСТИ В РАМКИТЕ НА ДИСЕРТАЦИЯТА	36
БИБЛИОГРАФИЯ	37

Contents

SUMMARY	7
Introduction. General outline and main goal of the thesis.....	9
CHAPTER 1. State of the art in maneuvering simulation	11
CHAPTER 2. Description of the experimental investigations	12
CHAPTER 3. Mathematical maneuvering model and hydrodynamic derivatives	14
CHAPTER 4. Mathematical background and numerical method.....	17
CHAPTER 5. Simulation model. Simulation plan and matrix	21
CHAPTER 6. Validation and verification methodology	25
CHAPTER 7. Straight-course simulation results.....	26
CHAPTER 8. Drift angle simulation results.....	28
CHAPTER 9. Dynamic captive model test simulation results	30
CHAPTER 10. Conclusions. Basic contributions. Statement of originality	33
APPENDIX A. Papers and reports, developed and published in relation to the thesis.....	36
REFERENCES	37

Summary

The thesis summarizes the results from CFD studies of the Delft 372 Catamaran bare hull based on results from an experimental programme for this object, realized in the BSHC shallow water towing tank by means of a PMM. The experimental programme included four identical series of experiments at different h/T ratios, namely $h/T = 8.21$ (“deep water” case), 2.5, 2.0 and 1.5 in calm water. Each experimental series comprised three different groups of tests, including (1) measurement of component hydrodynamic reactions, sinkage and trim at straight course (zero drift angle), (2) the same at a number of fixed drift angles, within a wide range of the Froude number both for (1) and (2), including critical and supercritical flow conditions with respect to the depth Froude number Fn_h , as well as (3) ‘pure sway’, ‘pure yaw’ and ‘yaw with drift’ PMM dynamic tests. The CFD simulations were performed with the general purpose URANS/DES CFD parallel finite volume solver CFDSHIP-IOWA, version 4, which uses dynamic overset grids, single-phase level set free surface capturing approach, blended $k-\epsilon/k-\omega$ turbulence modeling, and 6-DOF motions predictor.

The thesis is organized as follows. The introduction is a short overview of the state of the art in CFD and its important applications in ship flow analyses. The main goal of the thesis is outlined, stressing on maneuvering simulations in varying depth shallow water and very high Froude numbers. In Chapter 1 a brief overview of the state of the art of maneuvering simulation methods according recent ITTC classification is presented. Chapter 2 contains a short description of the well known types of hydrodynamic PMM model experiments for maneuvering qualities' assessment. Chapter 3 reveals the physical approach to the ship model as a rigid body moving generally with six degrees of freedom, further reduced to three within the frames of the usual theory of maneuverability. The classical parametric model of Abkowitz and its basic equations are described. The hydrodynamic derivatives, appearing as coefficients of those equations and whose determination is among the main targets of the present CFD simulation, are also discussed herewith. Chapter 4 is a description of mathematical background of CFDSHIP-IOWA with emphasis on the basic URANS equations of motion, blended $k-\epsilon/k-\omega$ isotropic turbulence model and a LSM method for free-surface capturing, together with a brief description of the numerical methods adopted. Chapter 5 contains description of the practical application of the selected code including the construction of numerical grids and simulation matrix. Chapter 6 is dedicated to the contemporary methodology of $V \& V$ in computer simulations according to the theory of Stern et al.

The static simulation results, described in Chapters 7 & 8 of the thesis, included resistance, sinkage and trim at straight course within a range of Froude numbers, including supercritical regimes ($Fn_h > 1$), drag and lift forces X and Y , yaw moment N about CG, and sinkage and trim within a range of drift angles β ($\beta < \pm 10^\circ$) at three particular Fn . The results for the “ $h/T=8.21$ ” and “ $h/T=1.5$ ” cases, were covered completely and showed very good EFD-CFD comparison. The remaining two cases (i.e. $h/T=2.5$ and 2.0) were tackled by control calculations and comparisons in a random point-wise manner only.

The dynamic simulations, described in Chapter 9, (pure sway & pure yaw) were performed at two different water depths, $h/T = 8.21 (Fn=0.45)$ and $1.5 (Fn=0.35)$. The hull was free to heave and pitch, as in the static cases, but otherwise forced to follow predefined paths and motion kinematics – linear and/or angular displacements, velocities and accelerations. The values predicted were the two hydrodynamic reactions, yaw moment, heave and pitch motions, and linear hydrodynamic derivatives.

The results for the simulated hydrodynamic characteristics of the particular catamaran hullform presented in the thesis demonstrate very good correspondence in terms of direct EFD-CFD comparison, which should be considered as an evidence of good CFD simulation and experimental quality. Most of the static EFD data are predicted well within 10%. The linear hydrodynamic derivatives and stability levers are predicted well within 10%. which is a confirmation that the code CFDSHIP-IOWA can be used readily for prediction of the hydrodynamic characteristics and flow patterns for catamaran forms at different h/T ratios and Froude numbers

Списък на основните означения

m	[kg]	Маса на модела
h	[m]	Дълбочина на водата в опитния басейн
T	[m]	Газене на модела [m]
T_0	[s]	Период на колебание на РММ
\bar{T}_0	[-]	Безразмерен период на колебание на РММ
$L (L_{pp})$	[m]	Базова дължина на модела (Дължина между перпендикулярите)
B	[m]	Ширина на монокорпуса на модела в мидела.
R_t	[N]	Пълно съпротивление на модела
X	[N], [m]	Надлъжна сила, надлъжна координата в ГКС
Y	[N], [m]	Напречна сила, напречна координата в ГКС
$Fn_h = U_c / \sqrt{gh}$	[-]	Число на Фруд по дълбочина
$Fn_h = U_c / \sqrt{gL}$	[-]	Число на Фруд по дължина
$Re = U_c L / \nu$	[-]	Число на Рейнолдс
U_c, U_0	[m/s]	Скорост на буксировъчната количка; скорост на безкрайност пред модела
z_{CG}	[m]	Апликата на центъра на масата на модела спрямо МКС на модела
g	[m/s ²]	Земно ускорение
ψ	[rad]	Ъгъл на диферент; Ойлеров ъгъл на въртене на КС
$\hat{p} = \frac{p - p_\infty}{\rho U_0^2} + \frac{z}{Fr^2}$	[-]	Коефициент на пиезометрично налягане
$\hat{p} = \frac{p - p_\infty}{\rho U_0^2} + \frac{z}{Fr^2} + \frac{2}{3}k$	[-]	Коефициент на пиезометрично налягане с отчитане енергията на турбулентните пулсации
p_∞	[N.m ⁻²]	Налягане на безкрайност пред модела
$\tau = t / (L / U_0)$	[-]	Безразмерно време
ν	[m/s]	Кинематичен вискозитет
A_o	[m ²]	площ на потопената част на корпуса
I_z	[kg.m ²]	Главен инерционен момент на модела спрямо ос „z”.
k	[-]	Безразмерна кинетична енергия на турбулентните пулсации
ω	[-]	Безразмерна скорост на турбулентна дисипация
$\frac{1}{Re_{eff}} = \frac{1}{Re} + \nu_t$	[-]	Ефективно число на Рейнолдс
J, b_i^j		Якобиан и метрични коефициенти на трансформацията на криволинейния базис

Съкращения

CAD	Компютърно проектиране
CFD	Компютърна динамика на флуидите
CG	Център на масата
EFD	Експериментална динамика на флуидите
АКС/ГКС	Абсолютна/Глобална координатна система
МКС	Местна координатна система
ТГС	Турбулентен граничен слой
ТКЕ	Турбулентна кинетична енергия
ЦМ	Център на масата

Въведение и обща характеристика на работата

Актуалност. Навлизането на компютърните технологии и компютърната динамика на флуидите (Computational Fluid Dynamics, CFD) в изследванията по хидродинамика на кораба през 70-те и 80-те години на миналия век предложи алтернатива на традиционните експериментални подходи, използвани в тази област, като изработката и изпитанията на мащабни корабни модели в специализирани хидродинамични съоръжения (опитни басейни). Идеята за *проектиране на базата на компютърно симулиране* (Simulation Based Design), като следствие от по-общата идея за *създаване на виртуални прототипи* (Virtual Prototyping) или т.нар. “*числен опитен басейн*” (Numerical Towing Tank) става все по-популярна поради безспорния факт, че физическото моделиране е скъпо, трудоемко, отнема много време, особено при необходимост от вариантни изследвания на формата на обтечното тяло. През последните години точността при прогнозиране чрез CFD на хидродинамичните качества на еднокорпусните кораби и корабните двигатели бележи рязко повишаване вследствие на появата на усъвършенствани паралелни числени методи и алгоритми за решаване на уравненията на движение на флуида, моделиране на турбулентността, технологиите за геометрично моделиране и изграждане на големи изчислителни мрежи. Навлизането на CFD в инженерната практика направи възможно решаването на изключително сложни хидродинамични задачи в обозрими за изследователите срокове, които доскоро бяха практически немислими.

В последно време се наблюдава процес на интензивно коопериране на научните усилия в световен мащаб под егидата на организации със световно значение, като например работната група по усъвършенствани средства за транспорт NATO AVT-161 "Assessment of Stability and Control Prediction for NATO Air & Sea Vehicles" ("Оценка на методите за прогнозиране на устойчивостта и управлението на въздушните и морски транспортни средства на НАТО"), чиято основна цел е оценката на пригодността на различните изчислителни средства за проектиране на модерни въздушни, наземни и морски транспортни средства. При морските обекти основния фокус на тази група е върху валидирането на средствата за прогнозиране на маневрените и мореходни характеристики, и в частност – маневрирането на корабите от катамаранен тип при различни условия на плитководие. Като еталонен обект за изследванията в това направление е избран модел на високоскоростен двукорпусен катамаран DELFT372, първоначално проектиран и тестван в Техническият университет на гр.Делфт, Холандия [14] (гол корпус, без стърчащи части и средства за пропульсия и управление). В областта на високоскоростните кораби, към които спада и обектът на настоящото изследване – кораб от тип "двукорпусен катамаран", надеждните експериментални данни все още са голяма рядкост. Ето защо, през годините 2008 и 2009, в Центъра по Хидро-и Аеродинамика към ИМСТ-БАН (Бивш Институт по Хидро- и аеродинамика (ИХА) към БАН, Варна), бе реализирана една обемна програма за експериментално изследване на маневрените характеристики на модела DELFT372, построен в мащаб 1:1.21 спрямо оригинала. Тази програма включваше различни видове изпитания, с акцент върху маневрените характеристики и представляваше нашата част от дейностите, предвидени за извършване в контракт между ИМСТЦХА-БАН-Варна и Отдела за морски изследвания (ONR) към Министерството на отбраната на САЩ, грантов проект N00014-07-1-0543 "High-Speed Multihull Maneuvering Including Effects of Shallow Water and Waves" (Маневреност на високоскоростен многокорпусник включая ефектите от плитководие и вълнение). Изпитанията бяха проведени с помощта на *механизъм за планарно движение* (Planar Motion Mechanism, PMM) в плитководния басейн на ИМСТЦХА-Варна.

Обща методика на изследването. Компютърните симулации бяха осъществени с компютърната програма CFDShip-IOWA, версия 4.0, 2008 год., която е паралелен код за CFD анализ, предвиден за изпълнение на мултипроцесорни клъстери, в които се използват мултиблокови динамични препокриващи се структурни мрежи, трасиране на свободната повърхност по

метода на множествата на ниво (level set method), комбиниран $k-\omega/k-\varepsilon$ модел на турбулентност и предиктор на движения със шест степени на свобода.

Цел на работата. Основната цел на дисертацията е оценка на *границите на приложимост и способността* на избраният софтуер за CFD-анализ за надеждно *прогнозиране* на характеристиките на маневреността в моделни условия за конкретният изпитван хидродинамичен обект. Понеже същият е бил проектиран като високоскоростен кораб, то основно ударение при симулациите е обърнато върху критичните и надкритични режими на обтичане, т.е при числа на Фруд по дълбочина F_{nh} около и над 1.

Публикации. Резултатите от дисертацията са представени в 5 публикации и 4 презентации и публични докладвания.

Съдържание на работата. Дисертационната работа съдържа 99 страници основен текст (от които 4 страници са списък на цитираната литература от 70 заглавия), 70 фигури и 20 таблици, разпределени в 10 отделни глави. Приложенията съдържат допълнително 18 страници, формулирани в 4 отделни глави.

Глава 1. Съвременно състояние на методите за симулация на маневреното движение на кораба

Съвременните методи за прогнозиране на маневреността са групирани в три основни категории, според систематизацията на Комитета по маневреност към 25^{та} Международна Конференция на Опитните басейни (ITTC).

При *методите без симулация* липсва математически модел и неговите елементи – хидродинамичните коефициенти (производни) и характеристиките на маневреното движение се измерват директно от провеждани натурни или автономни моделни изпитания.

Системно-базираните методи симулират кинематиката на маневрите на кораба посредством подходящо математическо моделиране въз основа на уравненията на движение с използване на хидродинамични коефициенти, извлечени от съществуващи бази с натурни данни, принудени динамични изпитания на корабни модели или методи за системна идентификация. Тези методи са сравнително прости и бързи, но техният диапазон на валидност е ограничен от диапазоните на изменение на хидродинамичните параметри в използваните бази данни или експерименти, които трябва да са достатъчно широки. Така например, данни, получени от изпитания с автономен корабен модел при $10^\circ/10^\circ$ "зиг-заг" маневри не могат да се използват за симулиране на подобни маневри при $20^\circ/20^\circ$. Все пак, едно голямо предимство на тези методи е, че те могат да бъдат използвани за симулиране както в моделен, така и в натурен мащаб.

Прогнозирането, основано на моделни изпитания с принудени колебания, е един от традиционните и най-разпространени в момента методи. Предствителни за този вид динамични изпитания са изпитанията с механизъм за планарно движение (Planar Motion Mechanism, PMM): буксировката със статичен ъгъл на дрейф/рул, установената циркуляция и установеното напредване с различни ъгли на фиксиране на руля се категоризират като *статични* PPM изпитания, докато чистите принудени напречни колебания, чистите принудени ъглови колебания и ъгловите колебания с начален дрейф се категоризират като *динамични* PPM изпитания. Известно е, обаче, че провеждането на тези видове изпитания в специализираните хидродинамични съоръжения е скъпо и времеемко. Налице е също така и мащабен ефект поради невъзможността да се осигури моделиране по числата на Фруд и Рейнолдс едновременно, характерен по правило за моделните изпитания в конвенционалните опитни басейни. Един общ недостатък на горепосочените методи е невъзможността да се добие детайлно физическо разбиране за скоростното поле.

Прогнозирането чрез използване на компютърната динамика на флуидите, което се характеризира като “Симулация на основата на CFD”, значително допринасят за преодоляване на горепосочените недостатъци. Понеже е доказано, че вискозните ефекти са много важни за коректното предсказване на маневрените характеристики, методите URANS и LES {DES} са за предпочитане пред безвискозните методи. При този подход URANS/LES/DES се явяват алтернатива на моделните експерименти при получаването на коефициентите на математическия модел, а освен това предоставят и полезна информация за локалните характеристики на течението. Налице са вече и моделни симулации на еднокорпусни кораби, снабдени с работещ винт и движещ се рул. Резултатите от такива симулации показват, че хидродинамичните производни, определяни чрез URANS/DES са годни за предсказване траекторията на кораба с точност, достатъчна при сравненията с резултатите от стандартни моделни изпитания с автономни модели.

Според обобщените изводи от международната конференция по верификация и валидация на методите за симулация на маневреността на кораба SIMMAN [11], най-реалистичният подход при прогнозирането на маневреността на кораба в момента е съчетаването на URANS/DES със системно-базираните подходи.

Процесът на използване на CFD има два ясно определени етапа: (а) избор/разработка на определен програмен код, и (б) прилагане на избрания CFD-код за решаване на конкретен проблем, представляващ практически интерес. Докато етап (а) може да възниква периодично на нерегулярни интервали в зависимост от евентуални големи или решаващи скокове в числените или компютърните технологии, то етап (б) е актуален при всяко текущо изследване. Този етап включва минимум пет задължителни стъпки, а именно:

1. Формулиране на математическата задача.
2. Планиране на симулационната матрица.
3. Генериране на файлове с входна информация.
4. Машинно изпълнение на програмата. Пост-обработка и документиране на резултатите
5. Валидация, верификация и неопределеност на резултатите от симулациите.

Процесът започва с формулирането на математическата задача, в рамките на която се дефинират необходимите частни диференциални уравнения описващи процесите, физическите модели и началните и гранични условия на задачата. Освен това, дефинират се геометрията на областта на течението, вида на числените мрежи и подхода за тяхното изграждане, както и работните координатни системи. Използваният CFD код следва да е достатъчно гъвкав и да допуска евентуални промени на тази стъпка при разумен разход на време и труд на по-късни етапи от изследването. Следващата стъпка представлява генериране на симулационната матрица (т.е. броя и вида на симулациите, необходими за изследване на явлението и добиването на увереност във възможностите на CFD кода. В зависимост от условията и възможностите (материални и финансови), обикновено само част от възможните стойности на ключови параметри или физически условия могат да бъдат използвани за оценка на неопределеността при сравнението с еталонни експериментални данни.

Глава 2. Описание на експерименталните изследвания

Както беше споменато, през годините 2008 и 2009 , в ИМСТЦХА-БАН бе реализирана една обемна програма за експериментално изследване на маневрените характеристики на модел на високоскоростен катамаран, първоначално проектиран и тестван в Техническият университет на гр.Делфт, Холандия [14] (гол корпус, без стърчащи части и средства за пропулсия и управление). Изпитанията бяха проведени с помощта на механизъм за планарно движение (РММ) в плитководния басейн на ЦХА. Програмата включваше три типа

изпитания, а именно:

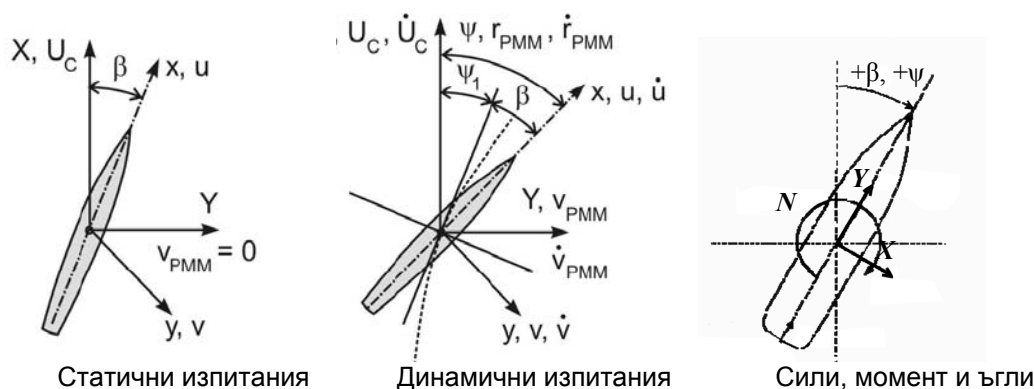
(1) статични изпитания на прав курс, тиха вода в широк диапазон от стойности на числото на Фруд, включващ докритични, критични и надкритични режими на обтичане в условията на вариращо плитководие,

(2) статични изпитания на тиха вода при различни ъгли на дрейф, при същите режими на обтичане като в (1),

(3) динамични изпитания - „чисти принудени странични колебания”, „чисти принудени ъглови колебания (рискане)”, и „рискане с начален дрейф” за определени предварително избрани стойности на числото на Фруд.

Гореуказаните три групи изпитания бяха реализирани за четири отделни стойности на параметъра на плитководие $h/T = 8.21$ („дълбока вода”), 2.5, 2.0 и 1.5. Ч Във всички изследвани случаи моделът бе свободен да извършва вертикални премествания (потопяне/изплаване) и въртене около хоризонтална напречна ос (диферент). Измерваните величини включваха хоризонталните силови реакции (сили и въртящ момент), както и динамичното потопяне и изплаване на модела в носа и в кърмата. Схемата на експерименталната постановка, пълно описание на главните размери и формата на модела, както и на реализираната експериментална програма, са приведени в Приложение Б на дисертационния труд.

Изпитания с механизъм за планарно движение (РММ). РММ представлява електро-механично съоръжение, закрепвано неподвижно към основната количка на буксировъчния басейн, която извършва постъпателно движение с постоянна скорост по оста на басейна. Изпитваният модел се закрепва неподвижно към рамото на РММ, което може да извършва три вида движения в равнината, а именно: постъпателно по оста на басейна, напречно на нея, и въртливо движение около ос, перпендикулярна на хоризонталната равнина. По този начин, чрез подходящ избор на законите, управляващи тези три движения, моделът може да бъде заставен да следва определена траектория със зададени кинематични характеристики – премествания, скорости и ускорения – линейни и ъглови.



Фигура 2.1. Глобална и местна координатни системи и конвенции за посоките

На фиг.2.1 са показани координатните системи, възприети и използвани от Комитета по маневреност на ИТТС за провеждане на статични и динамични изпитания с РММ, възприети също така и от международната конференция SIMMAN'2008 [11]. На същата фигура са показани конвенциите за положителните посоки на силите и въртящия момент.

Статични изпитания. При статичните изпитания моделът се буксира с постоянна скорост U_C (скорост на буксировъчната количка), съответстваща на зададено число на Фруд (F_{nL} или F_{nH}) и зададен постоянен ъгъл на дрейф β между ДП на кораба и оста на басейна.

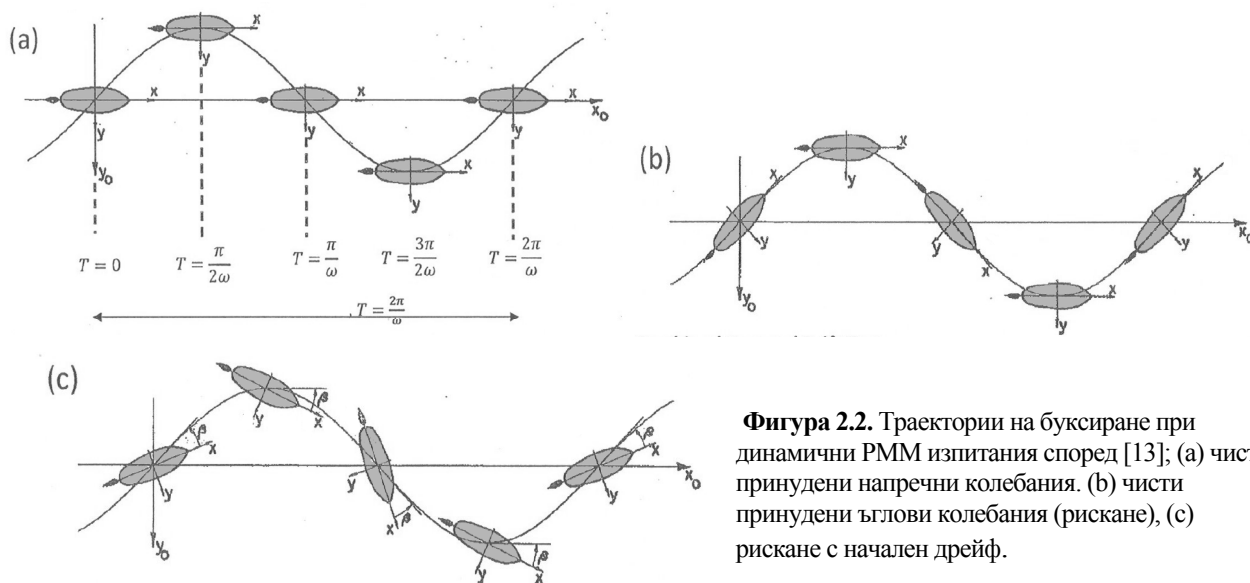
Динамични принудени колебания. При динамичните принудени колебания моделът е заставен да следва зададена траектория в хоризонтална равнина, съвпадаща с несмутената водна повърхност на басейна, със зададени кинематични параметри (скорости и ускорения), видове премествания (чисто постъпателно или смесено постъпателно-ротационно) и ориентация спрямо описваната от него траектория (ъгъл на дрейф).

Чисти принудени напречни колебания. При чистите принудени напречни колебания (Фиг.2.2 (а)) оста на модела остава винаги успоредна на оста на басейна, а се задават законите на изменение на напречно преместване y , скорост $v = \dot{y}$ и ускорение $\dot{v} = \ddot{y}$ във функция от времето.

Чисти принудени ъглови колебания. При чистите принудени ъглови колебания (рискане-Фиг.2.2 (б)) модела се буксира по траектория, при която неговата надлъжна ос остава винаги колинеарна с тангентата към траекторията (т.е. с нулев ъгъл на дрейф), а се задава законите на изменение на курсовия ъгъл ψ , скоростта на въртене Γ и ъгловото му ускорение $\dot{\Gamma}$ спрямо РММ

Принудени ъглови колебания с начален дрейф. Този вид изпитания (Фиг.2.2 (с)) се получават, когато преди началото на движение на модела се придава някакъв начален дрейф. Законите за скоростта на въртене и ъгловото ускорение на модела са аналогични на тези при чистите принудени ъглови колебания.

При провеждане на изпитанията с РММ е прието всички параметри и променливи, описващи принудените движения, да се обезразмеряват по определен начин [6].

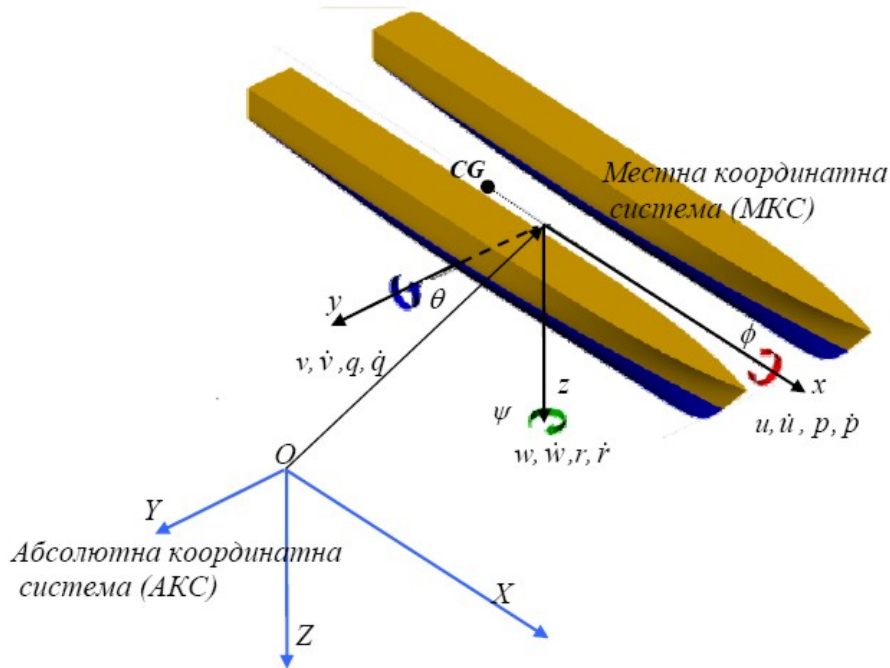


Фигура 2.2. Траектории на буксиране при динамични РММ изпитания според [13]; (а) чисти принудени напречни колебания. (б) чисти принудени ъглови колебания (рискане), (с) рискане с начален дрейф.

Глава 3. Математически модел на маневреността и хидродинамични производни

Структурен параметричен модел на Абковиц

Корабът се разглежда като твърдо тяло, извършващо движение с шест степени на свобода, а именно: надлъжно, напречно, вертикално премествания и ротации спрямо трите оси на МКС. Уравненията на движение спрямо МКС (Фиг.3.1) на тиха вода имат следния вид:



Фигура 3.1. Абсолютна (AKC) и относителна, свързана с кораба (MKS) координатни системи за математическото описание на движението с 6 степени на свобода

$$\begin{aligned}
 X &= m \left[\dot{u} + qw - rv + \dot{q}z_G - \dot{r}y_G + (qy_G + rz_G)p - (q^2 + r^2) x_G \right] \\
 Y &= m \left[\dot{v} + ru - pw + \dot{r}x_G - \dot{p}z_G + (rz_G + px_G)q - (r^2 + p^2) y_G \right] \\
 Z &= m \left[\dot{w} + pv - qu + \dot{p}y_G - \dot{q}x_G + (px_G + qy_G)r - (p^2 + q^2) z_G \right]
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\begin{aligned}
 K &= I_{xx}\dot{p} + I_{xy}\dot{q} + I_{xz}\dot{r} + \\
 &\quad (I_{zz} - I_{yy})rq + I_{yz}(q^2 - r^2) + I_{xz}pq - I_{xy}pr + \\
 &\quad m[y_G(\dot{w} + pv - qu) - z_G(\dot{v} + ru - pw)] \\
 M &= I_{yx}\dot{p} + I_{yy}\dot{q} + I_{yz}\dot{r} + \\
 &\quad (I_{xx} - I_{zz})pr + I_{xz}(r^2 - p^2) + I_{xy}qr - I_{yz}qp + \\
 &\quad m[z_G(\dot{u} + qw - rv) - x_G(\dot{w} + pv - qu)]
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned}
 N &= I_{zx}\dot{p} + I_{zy}\dot{q} + I_{zz}\dot{r} + \\
 &\quad (I_{yy} - I_{xx})pq + I_{xy}(p^2 - q^2) + I_{yz}pr - I_{xz}qr + \\
 &\quad m[x_G(\dot{v} + ru - pw) - y_G(\dot{u} + qw - rv)].
 \end{aligned}$$

В горните уравнения в дясната част се съдържат инерционните сили и моменти, а в лявата – хидродинамичните и външни сили и моменти, действащи на кораба при маневриране. В теорията на управляемостта на кораба се предполага, че някои от степените на свобода при маневриране на кораба на тиха вода могат да бъдат игнорирани, в резултат на което (3.1)-(3.2) се редуцират до:

$$\begin{aligned} m(\dot{u} - rv - x_G r^2) &= X \\ m(\dot{v} + ru + x_G \dot{r}) &= Y \\ I_z \dot{r} + mx_G(\dot{v} + ru) &= N \end{aligned} \quad (3.3)$$

Предполага се, че уравненията (3.3) са обезразмерени съгласно конвенциите, възприети в [5]. В параметричния модел на Абковиц [1] се предполага, че лявата част на (3.3) може да се запише в следния общ функционален вид:

$$\| X \quad Y \quad N \| = F(\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, u, v, r, \delta) \quad (3.4)$$

Предполагайки, че силите и моментите притежават съответна симетрия/антисиметрия, характерна при обтичането на корабоподобни тела с една равнина на симетрия; членове свързани с ускоренията над 2^{ри} ред, липсват; корелацията между членовете, свързани със скоростта и ускорението, може да бъде пренебрегната, и развивайки (3.4) в ред на Тейлър с членове до 3^{ти} ред включително, се получават следните представяния на силите и момента във вид на отсечени степенни редове около нулевите стойности на кинематичните параметри на движение:

$$X = X_* + X_{\dot{u}} \dot{u} + X_u u + \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} &+ \frac{1}{2} X_{uu} \Delta u^2 + \frac{1}{6} X_{uuu} \Delta u^3 + \frac{1}{2} X_{vv} v^2 + \frac{1}{2} X_{rr} r^2 + \\ &+ \frac{1}{2} X_{\delta\delta} \delta^2 + \frac{1}{2} X_{vuu} v^2 \Delta u + \frac{1}{2} X_{rru} r^2 \Delta u + \frac{1}{2} X_{\delta\delta u} \delta^2 \Delta u + \\ &+ X_{vr} vr + X_{v\delta} v\delta + X_{r\delta} r\delta + X_{vru} vr \Delta u + X_{v\delta u} v\delta \Delta u + X_{r\delta u} r\delta \Delta u \end{aligned}$$

$$Y = Y_* + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{*u} \Delta u + Y_{*uu} \Delta u^2 + \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} &+ Y_v v + \frac{1}{6} Y_{vvv} v^3 + \frac{1}{2} Y_{vrr} vr^2 + \frac{1}{2} Y_{v\delta\delta} v\delta^2 + Y_{vu} v \Delta u + \frac{1}{2} Y_{vuu} v \Delta u^2 + \\ &+ Y_r r + \frac{1}{6} Y_{rrr} r^3 + \frac{1}{2} Y_{rvv} rv^2 + \frac{1}{2} Y_{r\delta\delta} r\delta^2 + Y_{ru} r \Delta u + \frac{1}{2} Y_{ruu} r \Delta u^2 + \\ &+ Y_v \delta + \frac{1}{6} Y_{\delta\delta\delta} \delta^3 + \frac{1}{2} Y_{\delta vv} \delta v^2 + \frac{1}{2} Y_{\delta rr} \delta r^2 + Y_{\delta u} \delta \Delta u + \frac{1}{2} Y_{\delta uu} \delta \Delta u^2 + Y_{vr\delta} vr\delta \end{aligned}$$

$$N = N_* + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{*u} \Delta u + N_{*uu} \Delta u^2 + \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} &+ N_v v + \frac{1}{6} N_{vvv} v^3 + \frac{1}{2} N_{vrr} vr^2 + \frac{1}{2} N_{v\delta\delta} v\delta^2 + N_{vu} v \Delta u + \frac{1}{2} N_{vuu} v \Delta u^2 + \\ &+ N_r r + \frac{1}{6} N_{rrr} r^3 + \frac{1}{2} N_{rvv} rv^2 + \frac{1}{2} N_{r\delta\delta} r\delta^2 + N_{ru} r \Delta u + \frac{1}{2} N_{ruu} r \Delta u^2 + \\ &+ N_v \delta + \frac{1}{6} N_{\delta\delta\delta} \delta^3 + \frac{1}{2} N_{\delta vv} \delta v^2 + \frac{1}{2} N_{\delta rr} \delta r^2 + N_{\delta u} \delta \Delta u + \frac{1}{2} N_{\delta uu} \delta \Delta u^2 + N_{vr\delta} vr\delta \end{aligned}$$

където $\Delta u = u - U_0$ е произволно (малко) смущение в надлъжната скорост, а членовете X_* , Y_* и N_* са базови стационарни стойности. Обикновено, при установено праволинейно движение с постоянна скорост X_* е равно на нула, понеже пълното съпротивление се балансира от упора на гребния винт, но Y_* и N_* може да са отлични от нула, ако корабът е едновинтов или двувинтов с винтове, въртящи с в една и съща посока.

В (3.4) и (3.5)-(3.7) за пълнота е включена и променливата δ - ъгълът на отклонение на руля въпреки, че в конкретния случай същия липсва, тъй като се разглежда гол корпус, лишен от средства за управление.

В теорията на кораба коефициентите пред степените на независимите променливи в уравненията (3.5)-(3.7) са известни като *хидродинамични производни* и обикновено се определят експериментално чрез статичните и динамични изпитания, описани в Глава 2.

Вследствие на ограниченията в експерименталната постановка, в настоящия случай уравненията (3.1) с отчитане на (3.5)-(3.7) се опростяват и добиват следния вид:

$$m(\ddot{x} - rv - x_G r^2) = X_* + X_{vv}v^2 + X_{rr}r^2 + X_{vr}vr \quad (3.8)$$

$$m(\dot{y} + ru + x_G \dot{r}) = Y_r \dot{r} + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_v v + Y_{vvv}v^3 + Y_{vrr}vr^2 + Y_r r + Y_{rrr}r^3 + Y_{rvv}rv^2 \quad (3.9)$$

$$I_z \dot{r} + mx_G(\dot{y} + ru) = N_r \dot{r} + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_v v + N_{vvv}v^3 + N_{vrr}vr^2 + N_r r + N_{rrr}r^3 + N_{rvv}rv^2 \quad (3.10)$$

Хидродинамичните производни, определяни в конкретния цикъл от изпитания на модела на катамарана, са приведени в Таблица 3.1.

Таблица 3.1. Хидродинамични производни, определяни в рамките на настоящата експериментална програма

Изпитание	Производни		
	едноименни		смесени
	линейни	нелинейни	
Съпротивление на прав курс	X_*		-
Статичен дрейф	Y_v, N_v	X_{vv}, Y_{vvv}, N_{vvv}	
Чисти напречни колебания	$Y_{\dot{v}}, N_{\dot{v}}, Y_v, N_v$	X_{vv}, Y_{vvv}, N_{vvv}	-
Чисти ъглови колебания	$Y_r, Y_{\dot{r}}, N_r, N_{\dot{r}}$	X_{rr}, Y_{rrr}, N_{rrr}	-
Рискане с начален дрейф		-	$X_{vr}, Y_{rv}, Y_{vrr}, N_{rvv}, N_{vrr}$

Метод за определяне на хидродинамичните производни

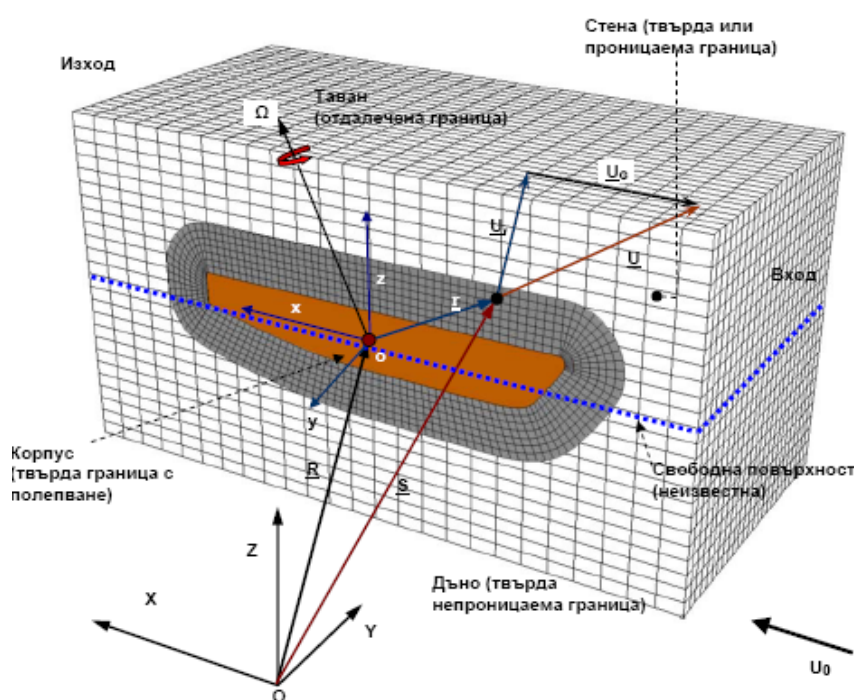
Вграденият софтуер на РММ установката позволява директно определяне на хидродинамичните производни в хода на експеримента. Когато временните редове на хидродинамичните усилия се получават по друг начин, например чрез CFD, както е в настоящия случай, е необходим друг подход. Sakamoto [10] предлага един доста удобен и прост подход, основан на отсечен Фурие-анализ и полиномиална апроксимация по метода на най-малките квадрати (МНК) на временните редове на решенията, описан в Гл.2 на дисертацията.

Нелинейни и смесени производни .Когато амплитудите и скоростите на маневриране не са малки, линеаризираната форма на уравненията (3.22)-(3.24) престава да бъде валидна; нелинейните и смесените производни също придобиват значение за точното прогнозиране на траекторията на кораба, и за по-пълнен анализ на маневреността е по-коректно да се използва системата (3.8)-(3.10).

Глава 4. Математическа постановка и числен метод

Компютърната програма за CFD анализ CFDSHIP-IOWA-V.4 [8] се основава на алгоритъм, разработен специално за целите на корабната хидродинамика. Той се основава на решаването на осреднените по Рейнолдс нестационарни уравнения на Навие-Стокс (URANS) или на хибридни (RANS/LES) метод на отделените крупни вихри (DES) в областта, заемана от течната фаза на течение със свободна повърхност, по която може да възникват гравитационни вълни, предизвиквани от потопени или полупотопени тела.

Предполага се, че флуидът е двуфазен, съставен от две несмесваеми фази – вода и въздух. Допълнително се предполага, че плътността и вискозитета на въздуха са пренебрежимо малки и че налягането на интерфейса вода/въздух е винаги постоянно и равно на атмосферното. Предполага се, че влиянието на повърхностното напрежение е малко и също може да бъде пренебрегнато.



Фигура 4.1. Дефиниции на основните координатни системи при числената постановка (Xing et al [16]).

Основните диференциални уравнения на движение могат да бъдат дефинирани и решавани в както в абсолютна декартова инерциална координатна система OXYZ с оси, паралелни на главните оси на басейна, така и в МКС $oxyz$, свързана неподвижно с кораба, за произволно движещ се недеформируем контролен обем обхващащ твърдото тяло (кораба) и

останалата част, също недеформируема, от областта на течението.

Диференциални уравнения на движение. Уравненията на движение- уравнението за непрекъснатост и нестационарните уравнения на Навие-Стокс, представляващи форма за закона за съхранение на импулса в поток на вискозна несвиваема течност, с отчитане на скоростта на движение на контролния обем имат следния тензорен вид [16]:

$$\nabla \cdot \underline{U} = 0 \quad (4.2)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \underline{U}}{\partial \tau} + (\underline{U} - \underline{U}_G) \cdot \nabla \underline{U} \right] = -\nabla(\hat{p}) + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \underline{U} \quad (4.3)$$

в абсолютни инерциални декартови координати (АКС).

Тези уравнения се обезрамеряват посредством някаква еталонна скорост U_0 , дължина L^* (обикновено L_{pp}), плътност на водата ρ^* и кинематичен вискозитет ν^* .

Уравненията (4.2)-(4.3) са валидни и в произволна инерциална координатна система, (X,Y,Z) извършваща праволинейно равномерно движение със скорост \underline{U}_C спрямо АКС; трансформирани в *относителните*, свързани с кораба координати (МКС), те придобиват

следния малко по-различен вид:

$$\rho \left[\frac{\partial \underline{U}_r}{\partial t} + \underline{U}_r \cdot \nabla \underline{U}_r \right] = \underbrace{-\rho a_r}_{\substack{\text{масови} \\ \text{сили}}} - \nabla(p + \gamma z) + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \underline{U}_r \quad (4.4)$$

където: $a_r = \ddot{\underline{R}} + 2\underline{\Omega} \times \underline{U}_r + \underline{\Omega} \times (\underline{\Omega} \times \underline{r}) + \dot{\underline{\Omega}} \times \underline{r}$ са, съответно, транслационно, кориолисово, центростремително и тангенциално ускорения.

Осреднени уравнения на Навие-Стокс. Моделиране на турбулентността. Прилагайки стандартната процедура за осредняване по времето към уравненията на движение на флуида (4.2)-(4.3) се получава т.нар. *осреднени по Рейнолдс* уравнения на Навие-Стокс, които имат следния вид (в абсолютни Декартови координати):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + (\bar{u}_j - U_{Gj}) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}_{eff}} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{u_i u_j} \quad (4.8)$$

$$\bar{p} = \frac{p - p_\infty}{\rho U_0^2} + \frac{z}{Fr^2} + \frac{2}{3} k - \text{коэффициент на пиезOMETрично налягане, допълнен с приноса}$$

на турбулентните пулсации; $\frac{1}{\text{Re}_{eff}} = \frac{1}{\text{Re}} + \nu_t$ - ефективно число на Рейнолдс.

Осреднените уравнения на Навие-Стокс (4.8) съдържат члена $-\overline{u_i u_j}$, известен като тензор на Рейнолдсовите напрежения, който е директно следствие от турбулентните пулсации в течението. Неговото моделиране е класически проблем при методите за анализ на турбулентни течения. Разнообразието в тази област е особено голямо и през годините са били разработени множество методи за неговото решаване, защото това прави системата (4.7)-(4.8) решима със съвременните изчислителни средства. Част от най-популярните в момента подходи за моделиране на турбулентността, фигуриращи като отделни опции в използвания софтуер, са описани в Приложение В на дисертацията.

Използваният комбиниран $k-\varepsilon/k-\omega$ модел на турбулентност се основава на две диференциални уравнения на пренос на ТКЕ и скоростта на турбулентна дисипация ω . Техническите детайли, свързани със самия модел и неговото приложение в рамките на софтуера CFDShip-IOWA, както и стойностите на моделните константи са описани подробно в [8] и в дисертационния труд.

Ламинарно-турбулентен преход (KWT модел). Прилаганият комбиниран модел на турбулентност е модифициран на базата на $k-\omega$ модела на Уилкокс [15] за моделиране на ламинарно-турбулентния преход по начин, който да му позволява да работи като чист $k-\omega$ или $k-\varepsilon$ в различните области на течението в зависимост от разстоянията до твърдите стени. Механизмът на действие на този модел е описан подробно в [8] и в дисертационния труд..

При конкретните пресмятания, системата от уравнения (4.7)÷ (4.8) се трансформира от правоъгълни декартови координати (x, y, z, t) в неортогонални криволинейни координати (ξ, η, ζ, τ) , свързани с повърхнините на обтечените тела (в случая – корпусите на катамарана – Фиг.5.3, Глава 5). С отчитане на трансформационните зависимости, описани подробно в [8], основните уравнения на движение на флуида – уравнението за непрекъснатост (4.7) и съхранение на импулса (4.8) придобиват следния вид в обобщени криволинейни неортогонални координати:

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^j} (b_i^j U_i) = 0 \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial \tau} + \frac{1}{J} b_j^k (U_j - U_{Gj}) \frac{\partial U_i}{\partial \xi^k} = -\frac{1}{J} b_i^k \frac{\partial \hat{p}}{\partial \xi^k} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi^j} \left(\frac{b_i^j b_i^k}{J Re_{eff}} \frac{\partial U_i}{\partial \xi^k} \right) + \frac{b_j^k}{J} \frac{\partial v_t}{\partial \xi^k} \frac{b_i^l}{J} \frac{\partial U_j}{\partial \xi^l} + S_i \quad (4.10)$$

Уравненията (4.9) и (4.10) се дискретизират по метода на крайните разлики. За конвективните членове се използва схема от втори ред с разлики напред, а за дифузионните – централни разлики от втори ред. За производните по времето се използват разлики назад от втори ред, от следния вид: $\partial \phi / \partial \tau = 1 / \Delta \tau (1.5 \phi^n - 2 \phi^{n-1} + 0.5 \phi^{n-2})$. Дискретизираните импулсни уравнения (4.10) за произволна вътрешна точка от областта на решението имат следния общ вид:

$$U_i = -\frac{\sum_{n,b} a_{n,b} U_{i,nb} - S_i}{a_{ijk}} - \frac{b_i^k}{Ja_{ijk}} \frac{\partial p}{\partial \xi^k} \quad (4.11)$$

където a_{ijk} и a_{nb} са, съответно, коефициентите на централния и съседните възли на диференчния (крайно-разностния) шаблон, който е 25-точков.

Очевидно е, че уравнението (4.11), при задаване на някакво поле на налягането, би дало като решение скоростно поле, което в общия случай не би удовлетворявало условието за нулева дивергенция (4.13). Налагане на условието (4.9) се осъществява чрез вземане на оператор дивергенция от импулсното уравнение (4.10) и последващо отчитане на условието (4.9). Това се постига чрез неявния стъпков алгоритъм PISO за съгласуване на скоростта с налягането. Използването на дискретизираната форма на импулсното уравнение (4.10) води до следното уравнение от тип Поасон относно налягането при някакво зададено скоростно поле [8]:

$$\frac{\partial}{\partial \xi^j} \left(\frac{b_i^j b_i^k}{Ja_{ijk}} \frac{\partial p}{\partial \xi^k} \right) = \frac{\partial}{\partial \xi^j} \frac{b_i^j}{a_{ijk}} \left(\sum_{nb} a_{nb} U_{i,nb} - S_i \right) \quad (4.12)$$

Подробностите относно реализацията на алгоритъма PISO са отдавана известни и добре описани в специализираната литература по CFD.

Кинематика на движението

Уравненията на движение на флуида (4.7) и (4.8) са силно свързани с уравненията за движение на твърдото тяло (корабния корпус), притежаващо шест степени на свобода (6DOF). След решаване на основната система от уравнения на задачата, силите от динамично налягане \mathbf{F}_p , триене \mathbf{F}_f и хидростатика \mathbf{B} спрямо АКС, действащи върху корабния корпус, се пресмятат чрез интегриране на налягането и напреженията от триене върху потопената част на корпуса. Пълната сила е сумата $\mathbf{F}_t = \mathbf{F}_p + \mathbf{B} + \mathbf{F}_f$. Пълният момент \mathbf{M}_t се определя чрез интегриране на моментите на елементарните сили с рамена \mathbf{r}_{CG} спрямо ЦМ на кораба.

\mathbf{F}_t и \mathbf{M}_t се проектират в относителната МКС посредством следната матрица на Ойлеровите ъгли на въртене, \mathbf{J}_1 :

$$\mathbf{J}_1 = \begin{vmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \cos \phi + \cos \psi \sin \theta \sin \phi & \sin \psi \sin \phi + \cos \psi \cos \phi \sin \theta \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & -\cos \psi \sin \phi + \sin \theta \sin \psi \cos \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{vmatrix} \quad (4.13)$$

Тука $\sigma = (\phi, \theta, \psi)$ е подредената тройка от Ойлерови ъгли, представляващи ъглите на въртене при крен, диферент и рискане спрямо МКС (Фиг.3.1). Скоростта на изменение на σ

се пресмята чрез $\Omega_m = (\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$ – векторът-ротация спрямо МКС и допълнителна трансформационна матрица.

Уравненията на движение на твърдото тяло спрямо МКС имат следния вид [16]:

$$\left. \begin{aligned} m(\tilde{\partial}u_m/\partial t - v_m\Omega_z + w_m\Omega_y) &= F_{mfx} + F_{mpx} + B_{mx} \\ m(\tilde{\partial}v_m/\partial t - w_m\Omega_x + u_m\Omega_z) &= F_{mfy} + F_{mpy} + B_{my} \\ m(\tilde{\partial}w_m/\partial t - u_m\Omega_y + v_m\Omega_x) &= F_{mfz} + F_{mpz} + B_{mz} \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

$$\left. \begin{aligned} I_x \tilde{\partial}\Omega_x/\partial t + (I_z - I_y)\Omega_y\Omega_z &= M_{mfx} + M_{mpx} + M_{mBx} \\ I_y \tilde{\partial}\Omega_y/\partial t + (I_x - I_z)\Omega_x\Omega_z &= M_{mfy} + M_{mpy} + M_{mBy} \\ I_z \tilde{\partial}\Omega_z/\partial t + (I_y - I_x)\Omega_y\Omega_x &= M_{mfz} + M_{mpz} + M_{mBz} \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

Следва да се отбележи, че уравненията са валидни за твърдо тяло, извършващо движение по инерция. При наличието на външни сили (упор на движителя, буксировъчна тяга, сила от ветрово натоварване) съответните им компоненти се добавят в десните части на (4.14) и (4.15).

Системата уравнения (4.14) и (4.15) допуска задаване на ограничения на степените на свобода от произволен вид, и предсказване на оставащите до пълния възможен брой от шест. По този начин могат да бъдат симулирани различни видове маневри на кораба (в нашия случай – моделни изпитания). Предписваните движения и Ойлеровите ъгли се задават като *функции на времето в абсолютни инерциални координати* и се прочитат от кода като входни данни. За предсказване на движенията, представляващи интерес (потопяне/изплаване или въртене около ос u - диферент) се използва неявен *предиктор/ коректорен* подход.

Уравненията (4.14) и (4.15) се интегрират във времето, в резултат на което се получава траекторията (\underline{R}) и пространствената ориентация на кораба ($\underline{\Omega}$) спрямо АКС.

Метод за определяне на свободната повърхност. При методите за *захващане* на свободната повърхност (surface-capturing methods) изчислителната мрежа остава непроменена във времето и пространството и обхваща и двете фази на флуида – тежка (вода) и лека (въздух). За захващане на свободната повърхност се дефинира една скаларна функция ϕ на знакоопределеното разстояние от всяка клетка на мрежата до свободната повърхност, която в началния момент съвпада с несмутената водна повърхност (LSM функция). Във всеки следващ момент от време тази функция се пресмята от условието, че нейната пълна (субстанционална) производна по времето трябва да е равна на нула, което означава, че нейната стойност за частиците, намиращи се на свободната повърхност, във всеки момент от време ще е равна на нула, т.е. свободната повърхност предствлява множеството от нулеви стойности на функцията ϕ . При течения без масообмен функцията ϕ трябва да се пренася по течението като твърда материална повърхнина, т.е. да удовлетворява кинематичното гранично условие. Динамичното гранично условие се извлича от условията за прекъсване на по интерфейса въздух-вода, предполагайки, че плътността и вискозността на въздуха могат да се пренебрегнат. Съвместното решаване на уравненията на движение в пространството, заемано от водата, и набора гранични интерфейсни условия в пространството, заемано от въздуха, резултира в скоростно поле, удовлетворяващо уравненията за съхранение на масата и импулса във водата, както и граничните условия на свободната повърхност [2].

Описание на числения алгоритъм на LSM, реализиран в CFDShip-Iowa, е приведено в Carrica et.al. [3] и в т.4.5, Гл.4 на дисертацията.

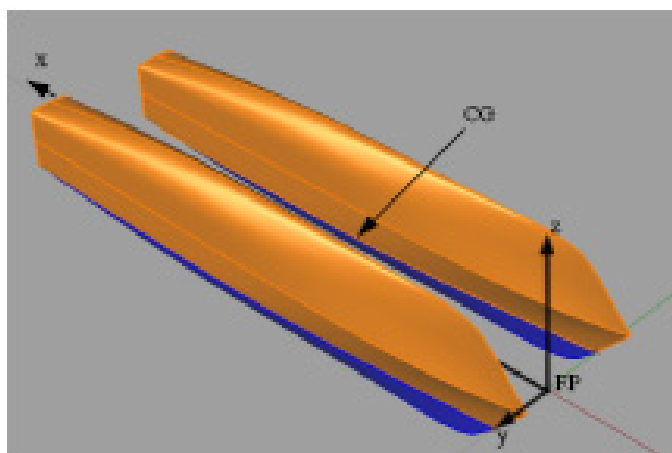
Общ числен алгоритъм на решението. Първата стъпка на общият числен алгоритъм на решението се състои в прочитане на входната информация за отделните мрежови блокове за

корпуса на кораба и фоновата мрежа и тяхното логическо разцепване (разпаралелване) за нуждите на паралелния програмен код. След инициализация на всички променливи, процедурата SUGGAR [7] се изпълнява за първи път с цел получаване на необходимата информация за препокриващите се мрежи и асемблиране на общата числена мрежа в изчислителната област. В рамките на всяка една времева стъпка се използва нелинеен итерационен цикъл за решенията за полето на скоростта и движенията (преместванията). В началото на всяка нелинейна итерация, информацията за препокриващите се мрежи се прочита от двоични файлове, осигурявани от SUGGAR, мрежите се преместват в съответствие с решенията от предиктор/коректорния модул за шест степени на свобода (6DOF), пресмятат се трансформационните метрики на мрежата. Следва решение на уравненията на турбулентния модел по неявен итерационен алгоритъм, следвано от решаване на уравненията за захващане на свободната повърхност. При така определеното ново положение на свободната повърхност се пресмята градиента на налягането и се решава уравнението на Поасон по алгоритъма PISO за удовлетворяване на условието за непрекъснатост и съгласуване на скоростта с налягането. Следва пресмятане на силите и моментите върху твърдото тяло/тела. Ако проверката на остатъците след нелинейната итерация покаже, че те са паднали под 10^{-3} се приема, че за текущата времева стъпка е налице доказана сходимост и се пресмятат преместванията за следващата времева стъпка. Предвид промененото взаимно разположение на мрежите отново се извиква процедурата SUGGAR за пресмятане на необходимите интерполации. Ако липсва сходимост на нелинейната итерация, преместванията се коригират и се преминава към нова нелинейна итерация.

За получаване на сходимост на полето на скоростта и налягането обикновено са необходими между две и пет нелинейни итерации. Критерият за сходимост на решението на уравнението на Поасон за налягането изисква остатъците да паднат поне на шест порядъка. Това е най-времеемката част от целия алгоритъм, отнемаща около 90% от цялото изчислително време.

Глава 5. Симулационен модел. План на симулациите и симулационна матрица

Изчислително пространство и обтечно тяло. При изграждането на симулационния модел, основаващ се на описаните в Глава 4 математически и числен модели, се използват следните координатни системи:



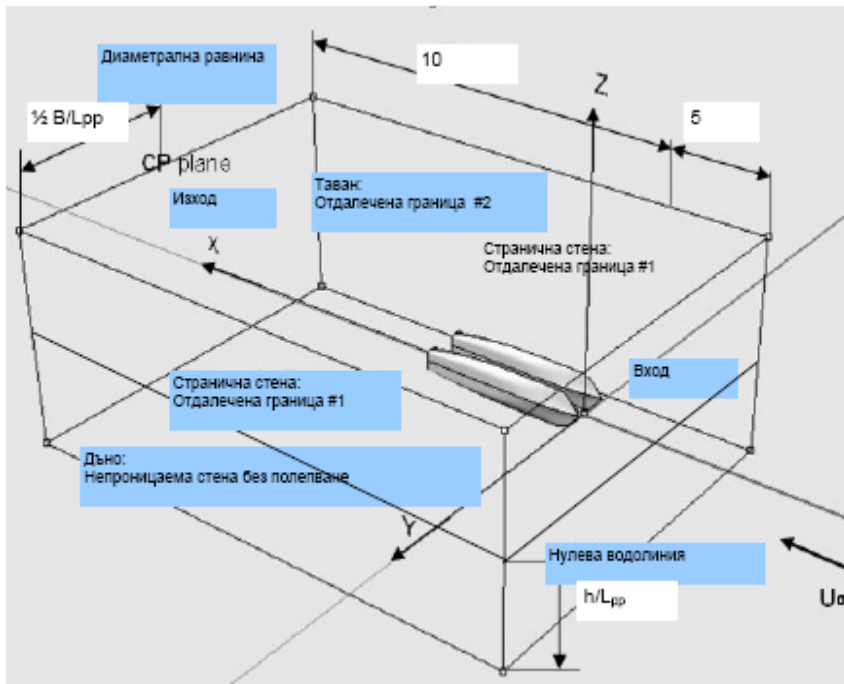
Фигура.5.1. CAD модел на катамарана и местна координатна система

(1) Абсолютна (инерциална) дясноориентирана система XYZ, свързана неподвижно с басейна и Земята, ориентирана по следния начин: ос OX – по оста на басейна с положителна посока, съвпадаща с вектора на натичащата скорост (т.е. обратна на посоката на движение на количката, ос OY – насочена към десния борда на басейна спрямо посоката на движение на количката, ос OZ – насочена нагоре (т.е. извън водата) (Фиг. 5.2).

(2) Местна координатна система (неинерциална) хуz, свързана неподвижно с корпуса на катамарана в някоя негова характерна точка и оси, ориентирани аналогично на (1), показана на Фиг.5.1.

Изграждането на числения модел на задачата започва с генериране на математическата повърхнина на катамарана със средствата на CAD (Фиг.5.1) и осигуряване на вход за програмата за генериране на изчислителни мрежи Gridgen [4]. Следва скициране на изчислителното пространство (разглежданата област на течението), което представлява правоъгълен паралелепипед с граници (обезразмерени спрямо L-характерната дължина на модела), показани на Фиг.5.2.

Гранични условия и изчислителни мрежи. На Фиг.5.2 са показани типовете гранични условия (ГУ), дефинирани за различните граници на изчислителната област.



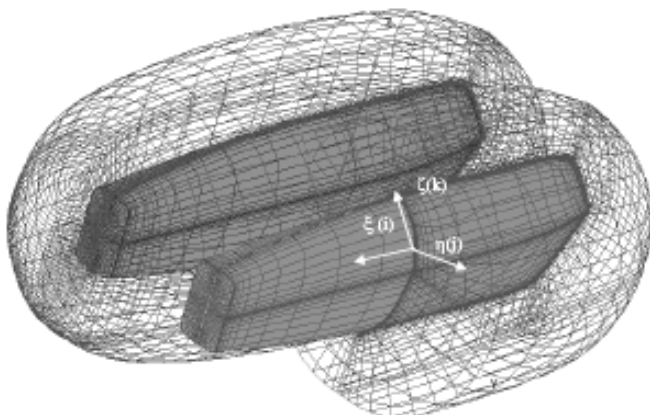
Фигура 5.2. Обща схема на течението и абсолютна координатна система

Изчислителната мрежа представлява съвкупност от препокриващи се мрежи и се изгражда по технологията "Химера (Chimera)", описана в Приложение Г. Тя е съставена от отделни мрежови блокове, представляващи препокриващи се структурни мрежи, както е показано на Фиг.5.4. Основният структурен блок е съставен от две O-образни хиперболични криволинейни мрежи (ξ , η , ζ), обхващащи изцяло и

свързани с повърхнините на корпусите на катамарана. На Фиг.5.3 са показани локалната криволинейна координатна система с положителните посоки на движение по координатните линии. Последователността на изграждане на тези мрежи е следната: първоначално върху повърхнината на единия корпус (избран произволно) се изгражда повърхнинна криволинейна мрежа (ξ, ζ), след което тази мрежа се екструдира в посока на външната нормала (η) към повърхнината по определен закон, удовлетворяващ изискванията за пространствени мрежи от тип "граничен слой", както и изискванията на конкретния метод за моделиране на турбулентността (Глава 4), към възловото разпределение по нормалата.

Числените мрежи са генерирани със софтуера Gridgen, v.15 [4]. Понеже надводната част на монокорпусите не участва по никакъв начин в разчетите и за улеснение при генерирането на O-образните мрежи, същите са отразени огледално спрямо равнината на главната палуба (Фиг.5.3). Мрежите са генерират така, че да е спазено условието $u^+ < 1$.

Така построената пространствена криволинейна структурна мрежа около единия корпус се отразява огледално спрямо ДП за получаване на другия корпус на катамарана, в резултат на което се получава блокът (1), представляващ целия корпус на катамарана, който в случая се третира от програмата-солвър като едно цяло тяло.



Фигура 5.3. Структурни мрежи, свързани с твърдите повърхнини на корпусите

Така построената обща мрежа е вход за процедурата SUGGAR [7], която осъществява процеса на асемблиране на общата препокриваща се мрежа по технологията "Химера", (описана в Приложение Г) и подготвя входните файлове с геометрична информация, необходими за стартирането и изпълнението на основната програма-солвър.

Дискретизацията на основните уравнения на задачата, т.е. свеждането ѝ до мрежов диференчен аналог на аналитичния модел (4.13), (4.14) се извършва по метода на *крайните обем* (*Finite Volume Method*) върху така построената изчислителна мрежа, която трябва да отговаря на ред изисквания за качество, дефинирани и описани подробно в специализираната литература (вж. например [4]).

Построяване на последователност от геометрично-подобни мрежи. Гореподписаната процедура касае т.нар. *базова* разчетна мрежа. Това е мрежата, която обикновено се използва за основната част от симулациите. Често обаче се налага параметрите на тази мрежа да се променят с цел изследване на *мрежовата независимост* и *мрежовата сходимост* на решението или детайлизиране на същата в определени области на изчислителното пространство, представляващи особен интерес. Специален случай при съвременното приложение на CFD представляват последователностите от геометрично подобни мрежи, използвани в процедурите за валидация и верификация [9, 12] със систематично "рафиниране" или "огрубяване" на възловите разпределения и увеличаване/намалване на общия брой на клетките. Минималният изискван брой от такива мрежи обикновено е равен на 3. Изборът на коефициент на геометрично подобие r , който често се нарича "коефициент на рафиниране" (*refinement ratio*) [8] донякъде е въпрос на изкуство и изчислителен опит и за това не съществуват специални рецепти. От една страна, неговата стойност не бива да е твърде голяма, за да не се "замазват" важни детайли на решението, а от друга – не бива да е и толкова малка, че решението да се окаже нечувствително към последователните изменения на мрежата.

В конкретния случай беше стартирано от базова (изходна) *груба* мрежа (с брой клетки 4,426,660), която бе систематично рафинирана с коефициент $r = \sqrt[4]{2}$. От базовата мрежа бяха генерирани още две мрежи – *междинна* (7,493,840 клетки) и *фина* (12,638,388 клетки).

План на симулациите и симулационна матрица. Симулационната матрица е базирана на реализираната експериментална програма, чието описание е приведено в Приложение Б на дисертацията. Предвид значителния ѝ обем, и сравнително голямото времетраене на някои видове симулации се наложи да бъдат обхванати само най-важните и ключови експериментални случаи, с цел постигане на реализируем анализ в рамките на физически постижим период от време. По тази причина приведената в Табл.5.3, 5.4 симулационна матрица представлява едно доста ограничено подмножество на пълната експериментална програма, което все пак дава отговор на основния въпрос за приложимостта на избрания математичен модел и софтуер, както и за границите на тази приложимост, както ще стане ясно по-нататък в Гл.Гл.7,8 и 9.

Симуляционната матрица обхваща двата основни вида изпитания – статични (Табл.5.3) и динамични (Табл.5.4). При съставянето на Табл.5.3 за подробен анализ на движението на прав курс, тиха вода, са избрани двата гранични случая- $h/T=8.21$ ("дълбока вода") и $h/T=1.5$ (най-малката експериментално-реализирана дълбочина на водата), при покриване на почти целия диапазон на експерименталния F_{nL} , с изключение на ниските стойности. За останалите две междинни стойности на $h/T=2.0$ и 2.5 са избрани само по няколко контролни точки. Статичния дрейф на тиха вода се покрива от случаите $h/T=8.21$, $F_{nL}=0.45$ (докритичен) и $h/T=1.5$, $F_{nL}=0.35$ (надкритичен по дълбочина) в диапазон на ъгъла на дрейф до 10° .

Матрицата на динамичните изпитания Табл.5.4 включва същите стойности за h/T , F_{nL} и F_{nh} както при статичния дрейф, за експериментално реализираните стойности на \dot{v}_m и r_m .

Таблица 5.3. Симуляционна матрица на статичните изпитания с PMM.

#	Мрежа	h/T	Ориентация		Условия на обтичане				6DOF		Експ. данни
			Парам..	Стойност [deg]	U_c [m/s]	F_{nL}	F_{nh}	Re	Предписано.	Предказано	
1. Съпротивление на прав курс, тиха вода.											
1.1	Симетрична (половин) мрежа	8.21	β	0	2.089	0.350	0.546	6.31e6	-	X, z, φ	X, z, φ
1.2					2.378	0.399	0.622	7.19e6			
1.3					2.669	0.447	0.698	8.07e6			
1.4					2.949	0.494	0.771	8.91e6			
1.5					3.262	0.547	0.853	9.86e6			
1.6					3.927	0.658	1.027	1.19e7			
1.7		4.037	0.677	1.056	1.22e7						
1.8		1.5	β	0	0.987	0.165	0.604	2.98e6	-	X, z, φ	X, z, φ
1.9					1.304	0.219	0.798	3.94e6			
1.10					1.634	0.274	1.000	4.94e6			
1.11					1.758	0.295	1.076	5.31e6			
1.12					1.894	0.318	1.159	5.72e6			
1.13					2.080	0.349	1.272	6.29e6			
1.14					2.462	0.413	1.507	7.44e6			
1.15					2.689	0.451	1.646	8.13e6			
1.16					3.000	0.503	1.837	9.07e6			
1.17					3.285	0.551	2.011	9.93e6			
1.18		2.0	β	0	1.897	0.318	1.005	6.88e6			
1.19		2.0	β	0	2.4	0.402	1.272	7.25e6			
1.20		2.5	β	0	1.056	0.177	0.501	3.83e6			
1.21		2.5	β	0	2.187	0.367	1.037	7.93e6			
1.22		2.5	β	0	2.685	0.450	1.272	8.12e6			
2. Статичен дрейф, тиха вода											
2.1	3	1.5	β	2, 4, 6, 8, 10	2.080	0.349	1.272	6.29e6	V & V	X, Y, N, z, ψ	X, Y, N, z, ψ
2.2		8.21		2,4,6,8,10	2.685	0.45	0.702	8.12e6			

Таблица 5.4. Симуляционна матрица за динамичните изпитания с PMM.

#	Мрежа	h/T	Параметри		Условия на обтичане				6DOF		Експ. данни
			Величина	Стойност	U_c [m/s]	F_{nL}	F_{nh}	Re	Предписано.	Предказано	
3. Чисти принудени странични колебания											
3.1	3	1.5	\dot{v}_m [-]	0.06	2.08	0.349	1.272	6.29e6	y(t)	X, Y, N, z, ψ	X, Y, N, z, ψ
			T_0 [s]	12							
3.2		8.21	\dot{v}_m [-]	0.06	2.685	0.450	0.702	8.12e6			
			T_0 [s]	12							
4. Чисти принудени ъглови колебания (рискане)											
4.1	3	1.5	r_m [-]	0.06	2.08	0.349	1.272	6.29e6	y(t), $\psi(t)$	X, Y, N, z, ψ	X, Y, N, z, ψ
			T_0 [s]	12							
4.2		8.21	r_m [-]	0.06	2.685	0.450	0.702	8.12e6			
			T_0 [s]	12							

Всички пресмятания са осъществени на суперкомпютърния кластер DaVinci IBM P6 към Главният център за разпределени ресурси (MSRC) на Океанографската служба на

Американския флот (NAVO). DaVinci е съставен от 166 изчислителни възела с 32 процесора/възел (общо 5312 процесора) с тактова честота 4.7 GHz и 64GB памет/възел, и върхова изчислителна скорост 90 TFlops под операционна система UNIX.

Глава 6. Процедура за валидация и верификация на резултати от компютърни симулации

Понятие за верификация и валидация. При сравняването на две множества от симулационни S и експериментални данни D обикновено е невъзможно да се определи кое от тях е по-точно т.е. по-близо до истината T . Разликата между симулацията и данните може да се оцени количествено чрез грешката δ . Тъй като в практическите приложения грешката обикновено е неизвестна, то тя трябва да бъде оценена. Също така, необходимо е да се знае и колко добра е тази оценка. За тази цел се въвежда понятието *неопределеност* U . Тази величина представлява оценка на грешката такава, че *точната* стойност на δ лежи в интервал $\pm U$ с доверителна вероятност 95%, т.е. 95 пъти от 100 възможни. Интервалът на неопределеност носи информация само за големината на грешката, но не и за нейния знак. Обаче, в някои случаи е възможно едновременно определянето и на абсолютната стойност, и на знака, което пък дава възможност за последваща корекция на резултатите от компютърните симулации, при условие, че експерименталната грешка е установена по безспорен начин и е известна.

Главната задача на процедурите за валидация и верификация е оценката на симулационната и експериментална неопределености U_S , U_D , съответно, и при възможност и на самите грешки δ_S , δ_D , съответно. Методите за оценка на δ_D и U_D са предмет на анализа на експерименталните резултати и понастоящем са обхванати в една стройна и последователна методология, която вече може да се счита като стандарт в рамките на Международната Конференция на Опитните Басейни (ITTC). Предмет на настоящото разглеждане са методите за оценка на U_S и δ_S .

Процедурите за оценка на неопределеността U_S и евентуално на δ_S са известни като *валидация* и *верификация*. Следвайки Roache [9], най-общо казано *верификация* означава „*правилно решаване на математическите уравнения*” и касае основно математическите аспекти, докато *валидация* означава „*решаване на правилните уравнения*” и касае физиката на проблемите. Тази дефиниция е твърде обща, и през годините е претърпяла значително развитие, понеже е била предмет на доста ожесточени дискусии. Понастоящем (Stern et al [12]), под *верификация* е прието да се разбира процедура за оценка на числената неопределеност и знака и големината на грешките от числен характер, ако последното е възможно. Обикновено, верификацията се основава на систематични параметрични изследвания и изследвания на различните видове сходимост чрез параметри като големина на мрежата и стъпка във времето. Оценките за U_{SN} и, евентуално за δ_N , обикновено се постигат на базата на множество решения, получавани в резултат на параметрични изследвания. Числената грешка се представя като сума от приноси (предполагаемо некорелирани), свързани с итерационния характер на метода за решаване на ситемата от уравнения, представляващи дискретния модел на математическата задача - δ_I , свойствата/ недостатъците на числената мрежа - δ_G , стъпката във времето - δ_T , и други неизвестни параметри δ_P , откъдето следва и основна формула за *числената* неопределеност на симулацията [12]:

$$U_{SN}^2 = U_I^2 + U_G^2 + U_T^2 + U_P^2 \quad (6.1)$$

Верификацията се осъществява на базата на множество параметрични изследвания за сходимост, минимум три на брой, чрез систематично рафиниране по части на входните

параметри с определен *коэффициент на рафиниране** r_k , т.е. варирайки параметрите един по един, запазвайки постоянни стойности на останалите. В настоящата практика обикновено се приема $r_k = 2$, $2^{1/2}$, $2^{1/4}$, и т.н. Итерационните грешки трябва да бъдат оценени коректно или елиминирани, ако се оказват несъществени спрямо грешките от останалите компоненти преди да е възможно провеждането на коректни изследвания на сходимостта. Обикновено се разглежда възможно най-простия случай с решения, получени върху три числени мрежи: груба (1), междинна (2), и фина (3), с вариране (издребняване) на представителната стъпка на мрежата, с коефициент r_k , едновременно и в трите координатни направления: и се дефинира основното понятие при изследване на сходимостта, т.нар. *показател за сходимост* на решението по даден изходен параметър k (симуляционен изход):

Валидацията се дефинира като процес на оценка на неопределеността от моделиране U_{SM} с помощта на еталонни експериментални данни, и при възможност – оценка на модула и знака на грешката δ_{SM} . Тука базовото понятие е *грешката от сравнение* E , която се дефинира като разлика между стойност от еталонната експериментална стойност D и симуляционната стойност S :

$$E = D - S \quad (6.2)$$

Според Stern et al [12], обаче, оценка на моделната неопределеност е невъзможна, пради което и постигането на оценка за U_E също е невъзможно. Поради това се въвежда понятието *валидационна неопределеност* U_V . Валидационна неопределеност или “шумът” представляват комбинацията от всички известни неопределености свързани с данните и симулацията и това може да се изрази така:

$$U_V^2 = U_E^2 - U_{SM}^2 = U_D^2 + U_{SN}^2 \quad (6.3)$$

Валидацията се счита за постигната на ниво U_V при изпълнение на условието $|E| < U_V$.

Пълно описание на детайлите на тези процедури е приведено в Глава 6 на дисертацията, базирано на оригиналната методология на Stern et al.[12].

Глава 7. Резултати от числените симулации при движение на прав курс

$h/T=8.21$ ("дълбока вода")

Сумарни таблици и графики от сравнение на експерименталните и симуляционни резултати (EFD- CFD сравнения)

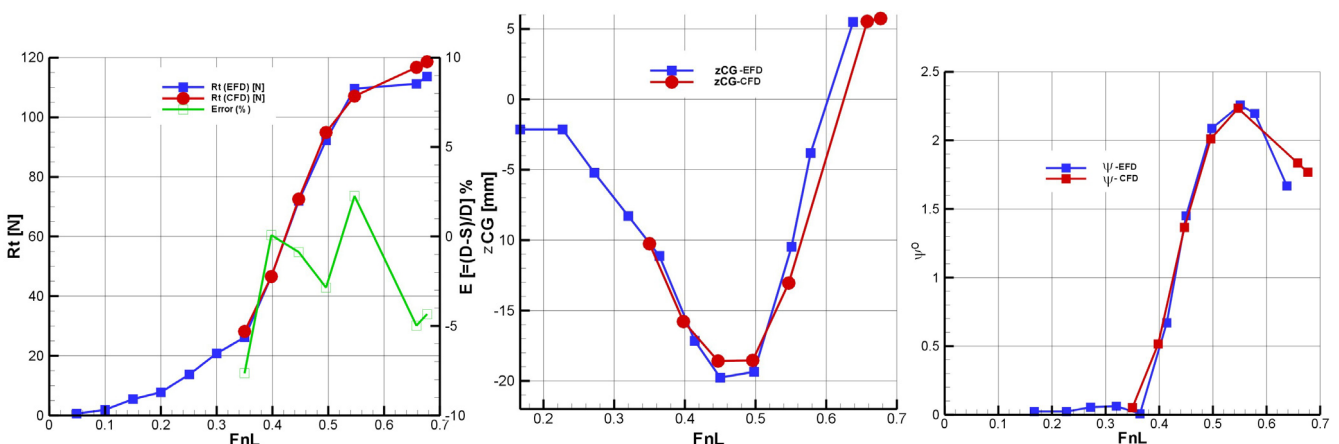
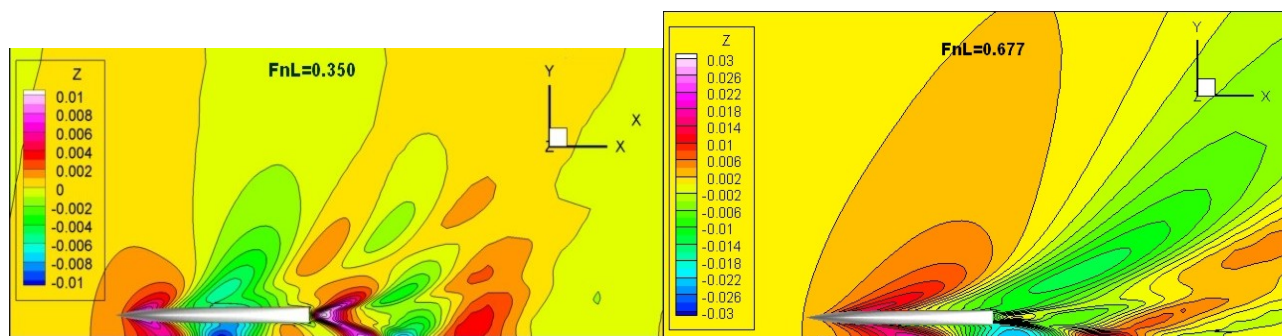


Figure 7.1. Сравнение между експерименталните (EFD) и симулирани резултати (CFD) за пълното съпротивление R_t , потапянето/изплаването и ъгъла на диферент на модела във функция от Fn_L .

* Или коефициент на геометрично подобие (Глава 5). Това е възможно само при структурираните видове мрежи (б.а.)

Еволюция на вълновата картина в зависимост от числото на Фруд F_{nL}



Фигура 7.2. Примерни вълнови картини при избрани експериментални стойности на F_{nL} .

$h/T=2.5$

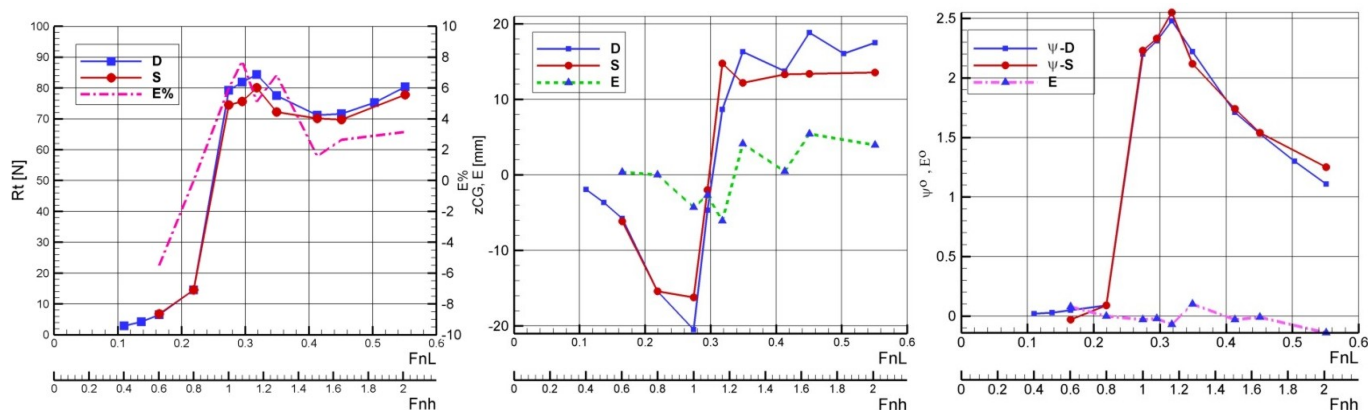
Проведени са контролни симулации за три стойности на числото на Фруд: докритичен $F_{nL}=0.177$ ($F_{nh}=0.501$), околнокритичен $F_{nL}=0.367$ ($F_{nh}=1.037$) и надкритичен $F_{nL}=0.450$ ($F_{nh}=1.272$) режими на обтичане. Временните редове на решенията за пълното съпротивление R_t , потапянето/изплаването на ЦМ - zCG и диферента ψ във функция от безразмерното време t' са получени във вид на сходящи временни редове.

$h/T=2.0$

Проведени са контролни симулации за две стойности на числото на Фруд $F_{nL}=0.317$ и 0.402 , съответстващи на критичен ($F_{nh}=1.002$) и надкритичен ($F_{nh}=1.272$) режими на обтичане. Решенията за R_t , потапянето/изплаването zCG и диферента ψ във функция от безразмерното време t' са получени във вид на сходящи временни редове.

$h/T=1.5$

Сумарни графики и таблица от сравнение на експерименталните и симулационни резултати (EFD- CFD сравнения)



Фигура 7.3. Графики на експерименталните (D) и симулирани (S) данни за пълното съпротивление R_t ; потапянето/изплаването на ЦМ zCG и ъгъла на диферент ψ ; $E\% = (D-S)/D$ %- относителна грешка от сравнение.

Верификация и валидация за $h/T=1.5$

Избрана е точка, съответстваща на $F_{nL}=0.349$, $F_{nh}=1.273$, $Re=7.5 \cdot 10^6$, т.е надкритичен режим на обтичане. Използвани са трите геометрично-подобни мрежи с коефициент на рафиниране $r = 2^{1/4}$, описани в Глава 5, за всяко едно от трите решения: пълното съпротивление - R_t , потапянето/изплаването на ЦМ - zCG и ъгъла на диферента - ψ . Понеже се търсят решения на установен случай на обтичане се предполага, че неопределеностите, свързани със стъпката във времето, U_T са равни на нула, и че решенията са сходени напълно, т.е.: $U_T=0$, $U_I=0$, и $U_V=U_G$ (Глава 6).

От анализа бе установено, че симулацията е монотонно сходяща по всички променливи и че валидацията е постигната на съответните нива на неопределеност, понеже е изпълнено условието (6.20) (Глава 6 на дисертацията), т.е. $|E\%| < U_V$. Пълното съпротивление се валидира на ниво 6.6%, потапянето се валидира на ниво 23%, което е естествено, понеже данните съдържат очевидно голям шум. Ъгълът на диферент се валидира на ниво 6.9%.

Резюме и заключения за симулациите при движение на прав курс

Симулациите показват добро съответствие с експерименталните данни в случая "дълбока вода" ($h/T=8.21$) в целия диапазон на изследваните числа на Фруд, което е в рамките на 5% за пълното съпротивление, с изключение на най-ниската стойност на F_n . Това вероятно се дължи на недооценяване на вълновата съставляваща, което е обяснимо, понеже в този случай вълнообразуването е по-слабо. Извършените допълнителни изследвания доказаха, че това е така, ала с цената на значително по-гъста мрежа от използваната в масовия случай, което води до значително повишаване на разходите за машинно време и ресурси, поради което този подход бе изоставен, имайки предвид, че основният интерес на настоящото изследване бе фокусиран върху високите стойности на F_n .

Подобни изводи могат да се направят за симулационните стойности на потапянето/изплаването и ъгъла на диферент в този случай.

За $h/T=2.5$ са симулирани три случая при $F_{nL}=0.177, 0.318$ и 0.405 , съответстващи на докритичен, критичен и надкритичен режими на обтичане. За $h/T=2.0$ са симулирани два случая при $F_{nL}=0.318$ и 0.405 , съответстващи на критичен и надкритичен режими на обтичане. Грешката от сравнение с експеримента е под 5% за пълното съпротивление и в двата случая. Относителните грешки за потапянето/изплаването и ъгъла на диферент за някои стойности на F_n са доста големи, но в тези случаи се касае за много малки абсолютни стойности, сравними с експерименталната точност.

В случая $h/T=1.50$ на "най-голямо плитководие" са проведени симулации в голям диапазон от стойности на F_{nL} . Относителната грешка от сравнение е в границите $0.1 \div 7.7\%$, като най-високата и стойност се наблюдава при критичното $F_{nL}=0.295$ ($F_{nh} = 1.076$). Потапянето/изплаването показва най-големи грешки при $F_{nL}=0.295$ и 0.318 . За ъгъла на диферент съответствието в целия диапазон е много добро, с изключение на $F_{nL}=0.165$. Причините за тези несъответствия се дължат, очевидно, на много малките измерени експериментални стойности, които биха могли да съдържат значителен шум.

Количествена оценка на представените симулирани вълнови картини е невъзможна поради липсата на експериментални данни за това (експерименталната установка не включваше вълноизмервателна апаратура). Очевидно е, обаче, че в качествено отношение те представляват достоверни изображения на характерните (наблюдавани и експериментално) вълнови картини, съответстващи на избраните подкритични, критични и надкритични режими на обтичане.

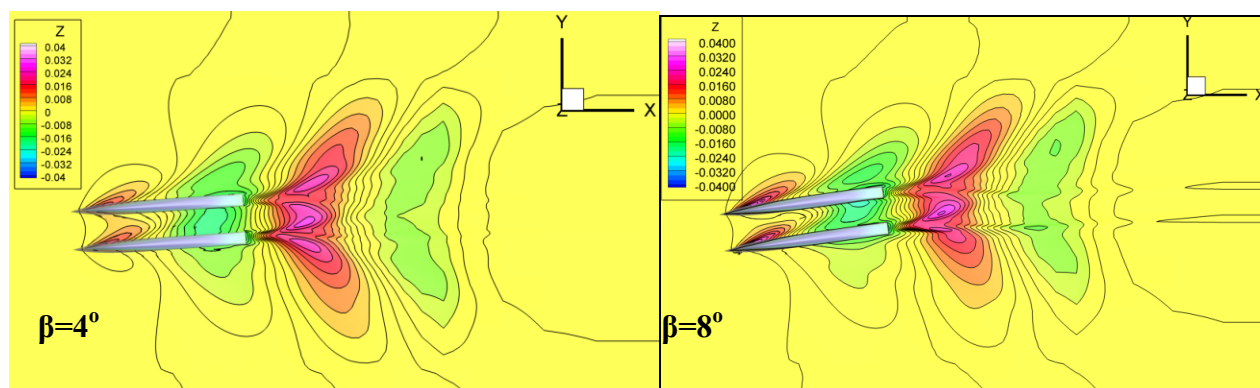
Глава 8. Резултати от числените симулации при движение със статичен дрейф

$h/T=8.21$

Сравнения експеримент- симулация и грешки от сравнение

Съгласно симулационната матрица, целта е да бъдат построени кривите на зависимостите на надлъжната сила X , напречната сила Y , въртящия момент N_z , потапянето/изплаването на ЦМ на модела zCG и ъгъла на диферент ψ във функция от ъгъла на дрейф β при $F_{nL}=0.450$ ($F_{nh}=0.7$ - докритичен режим) и валидация чрез пряко пресмятане на грешките от сравнение с експерименталните данни в диапазон на $\beta [0^\circ \div 10^\circ]$. Резултатите от симулациите са приведени в т.8.2.4, Гл.8 на дисертацията.

Вълнови картини

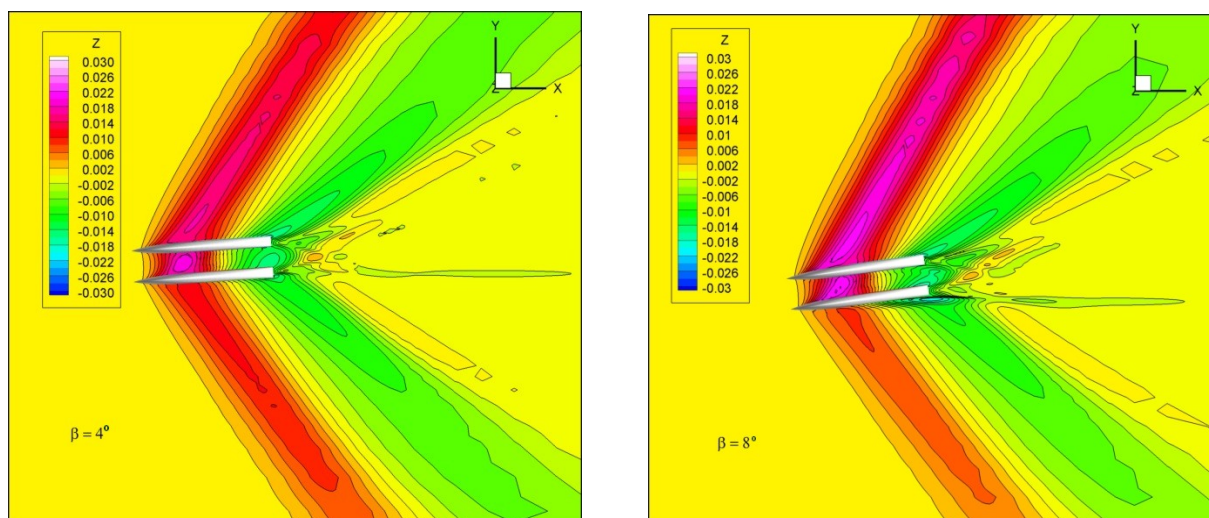


$h/T=1.5$

Съгласно симулационната матрица, целта е да бъдат построени кривите на зависимостите на надлъжната сила X , напречната сила Y , рискащия момент Nz , потапянето/изплаването на ЦМ на модела zCG и ъгъла на диферент φ във функция от ъгъла на дрейф β при $Fn_L=0.349$ ($Fn_H=1.272$ -надкритичен режим) и валидация чрез пряко пресмятане на грешките от сравнение с експерименталните данни в диапазон на β [$0^\circ \div 10^\circ$]. Допълнително е направено изследване на мрежовата сходимост на решенията и валидация и верификация на кода за въпросните изходни величини при две стойности на β ($= 4^\circ$ и 8°) върху трите геометрично подобни мрежи с коефициент на рафиниране $\sqrt[4]{2}$ (Глава 5) по методологията, описана в Глава 6. Тъй като симулациите бяха извършени "на сляпо", т.е. преди приключването на експериментите, възловите стойности на β не съвпаднаха с експерименталните. Поради това се наложи извършване на предварителен регресионен анализ на експерименталните данни с последваща интерполация във възловите стойности на симулацията. Сравненията експеримент-симулация и грешките от сравнение за величините X , Y , N , zCG и ψ са представени в Глава 8, т.8.2.4 на дисертацията.

Вълнови картини

Примерни симулационни вълнови картини са показани на долните графики. Налице е характерното за този режим изчезване на напречната система от вълни и оформянето на интензивна носова вълна, което се регистрира и в експерименталните изследвания..



Изследване за мрежова сходимост и неопределеността на симулацията при две избрани контролни стойности на ъгъла на дрейф

Изследването на мрежовата сходимост и неопределеност на симулацията е извършено при две стойности на ъгъла на дрейф: $\beta=4^\circ$ и $\beta=8^\circ$, $F_{nL}=0.349$ по методиката на ИТТС, изложена в Глава 6, и са представени в табличен вид в Гл.8, т. 8.2.3 на дисертацията.

Резюме и заключения за симулациите с ъгъл на дрейф ($\beta \neq 0$)

Резултатите за статичен дрейф при $F_{nL}=0.45$ ($F_{nh}=0.7$ -докритичен режим) и "дълбока вода" показват, че силите се недооценяват от CFD в рамките на 10%D за X и 5%D за Y. Стойностите на момента Nz са в добро съответствие с експерименталните данни в границите на 5%D, с изключение на $\beta > 8^\circ$. Предвид много малките стойности на потапянето/изплаването zCG и ъгъла на диферент ψ може да се каже, че CFD прогнозите са много добри, понеже относителните им грешки са в рамките на 10%D. Също така, резултатите потвърждават експерименталната тенденция на нарастване на потапянето и диферента при увеличаване на ъгъла на дрейф.

Резултатите от симулациите за $h/T=1.5$, $F_{nL}=0.349$ ($F_{nh}=1.272$ -надкритичен режим) показват следното: при $\beta=4^\circ$; симулациите са монотонно сходящи за всички изследвани величини, за X, Y и Nz се постига валидация на нива 3.6%, 5.2% и 11.7%, съответно. Потапянето/изплаването zCG се валидира на ниво 21.5%, а диферента ψ се валидира на ниво 8.5%; при $\beta=8^\circ$, симулациите отново са монотонно сходящи, ала за Y, Nz и zCG валидация не се постига. От представените в дисертацията пълни графични и таблични резултати се вижда ясно очертаваща се тенденция на нарастване на относителната грешка E% за тези величини при ъглите на дрейф над 6° .

И в двата случая се потвърждава експериментално установената тенденция на нарастване на потапянето при нарастване на ъгъла на дрейф. Предстои изясняването на физиката на това явление да бъде предмет на бъдещите изследвания.

От резултатите от валидацията и верификацията на симулациите при двата ъгъла на дрейф следва важен извод за границите на приложимост на използвания симулационен модел като цяло. Без съмнение, симулационният модел може да се счита за коректен при ъгли на дрейф до около $5-6^\circ$. Приложението му за по-големи ъгли би било необосновано. Доказано е (в рамките на изследвания на други подобни обекти при ъгли на дрейф над 10°), че обтичането се съпровожда с откъсване на турбулентния граничен слой (ТГС) и генериране на силно нестационарни зони в течението, наситени с едромашабни вихрови структури. Прогнозиране на откъсването на ТГС не фигурира като опция в модела за описание на турбулентността (Глава 4), поради което приложението му за ъгли на дрейф, при които това би могло да се очаква, е неоправдано. Това в никакъв случай не ограничава неговата приложимост, понеже динамичните изпитания по принцип бяха планирани за ъгли на дрейф, не превишаващи 5° . Естествено, гореуказаните ограничения не важат за случаите при движение на прав курс.

Глава 9. Резултати от симулациите на динамични изпитания

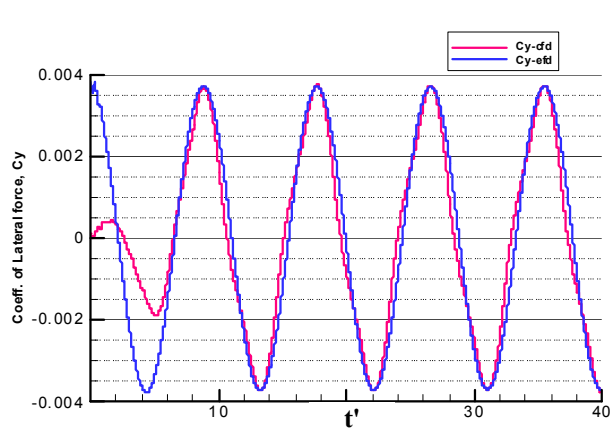
Симулациите на динамични изпитания от типовете, описани в Глава 2 и маркирани в симулационната матрица (Глава 5, Табл.5.4) са проведени при двете пределни стойности на плитководие, а именно $h/T=8.21$, $F_{nL}=0.450$ ($F_{nh}=0.7$ – докритичен режим) и $h/T=1.5$, $F_n=0.349$ ($F_{nh}=1.2$ - надкритичен режим). Използвана е "грубата" изчислителната мрежа No.3 поради задоволителните резултати, получени с нея при симулациите на статичните изпитания и поради факта, че симулациите в този случай изискват повишен разход на време и машинни ресурси в сравнение със статичните случаи, разгледани в Глава 8. Отново, моделът бе свободен да извършва вертикални линейни премествания и въртене около напречната си ос, но принуден да следва предварително зададена траектория – напречни линейни (по ос y) и въртеливо движение (около ос z), съчетани с равномерно праволинейно

движение по ос X. Елементите на кинематиката – траекторията - линейните и ъглови премествания, скоростите и ускоренията относно свързаната с РММ инерциална координатна система, се задават като входни данни. Изходните данни от симулациите включват хидродинамичните съставляващи на двете сили и въртящия момент, потапянето/изплаването и ъгъла на диферент като временни редове във функция от безразмерното време $t'=t/(L_{pp}/U_c)$.

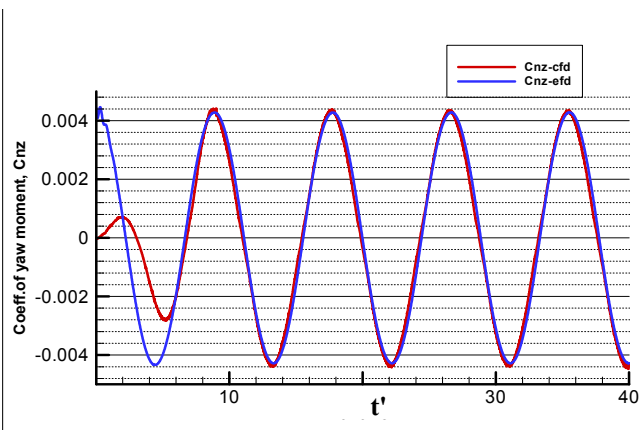
Симулации на динамични изпитания при $h/T=8.21$

Чисти принудени напречни колебания. T_0 – периодът на колебание на РММ бе постоянен и равен на експерименталния, т.е. 12 s. Безразмерният период на колебание на РММ, необходим за пресмятанята, бе $\bar{T}_0 = T_0 / (L_{pp}/U_c) = 8.882$. Законът за колебание на РММ е зададен.

На Фиг. 9.1 и 9.2 са показани временните редове на решенията за коефициента на напречната сила и въртящия момент, сравнени с експерименталните резултати (D-S сравнения).



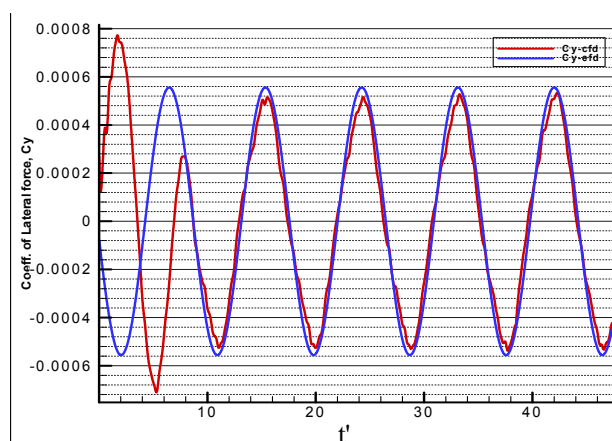
Фигура 9.1. D-S сравнение за коефициента на напречна сила C_Y при чисти напречни колебания за $h/T=8.21$, $F_n=0.45$, $F_{nh}=0.702$, $\dot{v}_m=0.06$



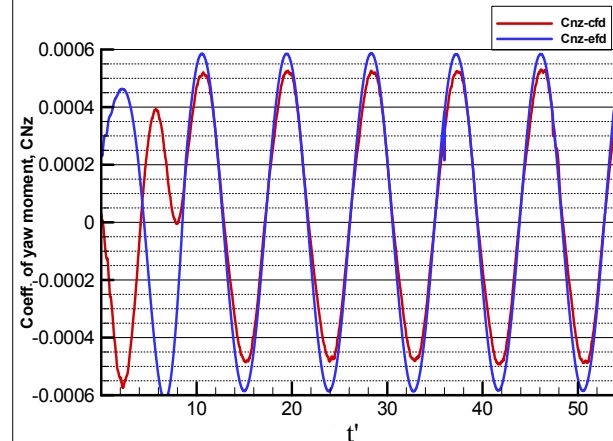
Фигура 9.2. D-S сравнение за коефициента на въртящия момент C_{Nz} при чисти напречни колебания за $h/T=8.21$, $F_n=0.450$, $F_{nh}=0.702$, $\dot{v}_m=0.06$

Чисти принудени ъглови колебания. Аналогично на гореописания случай, T_0 – периодът на колебание на РММ бе зададен постоянен и равен на експерименталния, т.е. 12 s. Безразмерният период на колебание на РММ, необходим за пресмятанята, бе $\bar{T}_3 = 8.882$. Законите за колебание на РММ са зададени.

На Фиг. 9.3 и 9.4 са показани временните редове на решенията за коефициента на напречната сила и въртящия момент, сравнени с експерименталните резултати.



Фигура 9.3. D-S сравнение за коефициента на напречна сила C_Y при чисти ъглови колебания за $h/T=8.21$, $F_n=0.450$, $F_{nh}=0.702$, $r_m=0.06$

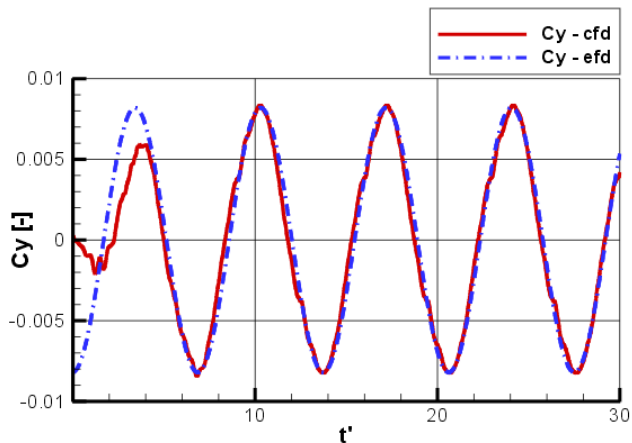


Фигура 9.4. D-S сравнение за коефициента на въртящия момент C_{Nz} при чисти ъглови колебания за $h/T=8.21$, $F_n=0.450$, $F_{nh}=0.702$, $r_m=0.06$

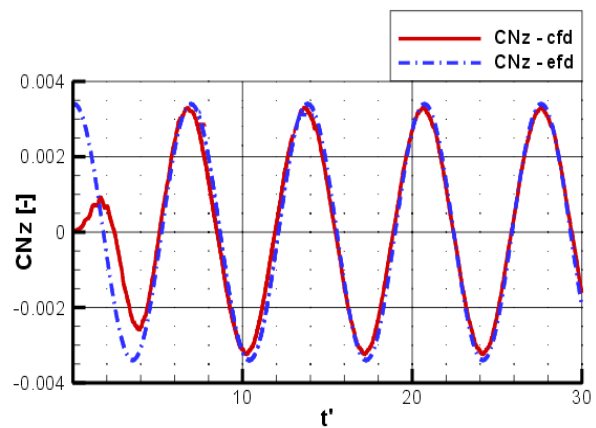
Симулации на динамични изпитания при $h/T=1.5$

Чисти принудени напречни колебания. T_0 – периодът на колебание на РММ е постоянен и равен на експерименталния, т.е. $T_0 = 12$ s., а скоростта на буксировъчната количка е $U_c = 2.08$ m/s. Безразмерният период на колебание на РММ е $\bar{T}_0 = 6.88$. В началото на симулацията моделът се ускорява плавно, че да придобие пълната си напречна скорост за безразмерно време \bar{T}_0 . Законът за един период на установено колебание на РММ е зададен.

На Фиг. 9.5 и 9.6 са показани временните редове на решенията за коефициента на напречната сила и въртящия момент, сравнени с експерименталните резултати (t' – безразмерно време).



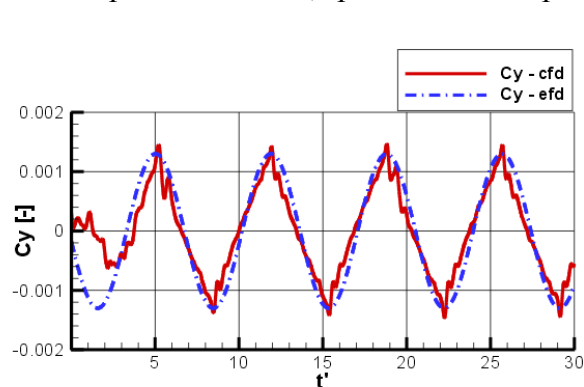
Фигура 9.5. D-S сравнение за коефициента на напречна сила C_Y при чисти напречни колебания за $h/T=1.5$, $Fn=0.349$, $Fn_h=1.272$, $\dot{v}_m=0.06$



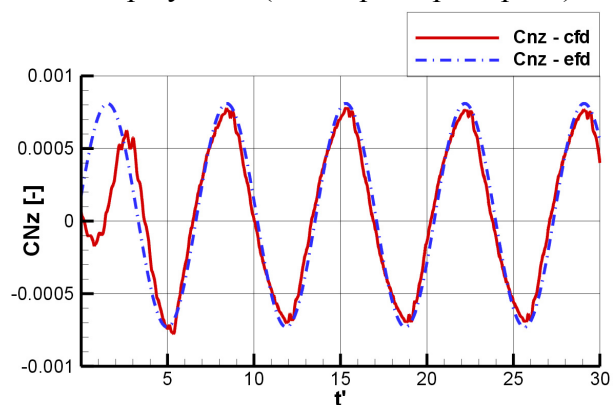
Фигура 9.6. D-S сравнение за коефициента на въртящия момент C_{Nz} при чисти напречни колебания за $h/T=1.5$, $Fn=0.349$, $Fn_h=1.272$, $\dot{v}_m=0.06$

Чисти принудени ъглови колебания. Аналогично на гореописания случай, T_0 – периодът на колебание на РММ е зададен постоянен и равен на експерименталния, т.е. $T_0 = 12$ s, а скоростта на буксировъчната количка е $U_c = 2.08$ m/s. Безразмерният период на колебание на РММ, необходим за пресмятанията, е $\bar{T}_0 = 6.88$. В началото на симулацията моделът се ускорява плавно така, че да придобие пълната си напречна и ъглова скорост за безразмерно време \bar{T}_0 . Законите за един установен период на колебание на РММ са зададени.

На Фиг. 9.7 и 9.8 са показани временните редове на решенията за коефициента на напречната сила и въртящия момент, сравнени с експерименталните резултати (t' – безразмерно време).



Фигура 9.7. D-S сравнение за коефициента на напречна сила C_Y при чисти ъглови колебания за $h/T=1.5$, $Fn=0.349$, $Fn_h=1.272$, $r_m=0.06$



Фигура 9.8. D-S сравнение за коефициента на въртящия момент C_{Nz} при чисти ъглови колебания за $h/T=1.5$, $Fn=0.349$, $Fn_h=1.272$, $r_m=0.06$

Хидродинамични производни

Симулационните стойности на хидродинамичните производни, фигуриращи в безразмерните уравнения на линейната теория (3.14)-(3.15) са пресметнати по методологията на Sakamoto [10], представена в Гл. 3 на дисертацията..

Таблица 9.1. Хидродинамични производни ($E=(D-S)/D\%$).

Производна	$h/T=8.21, F_{nL}=0.45, F_{nh}=0.702$			$h/T=1.5, F_n=0.349, F_{nh}=1.272$		
	D	S	E %	D	S	E %
Y'_v	-0.01686	0.01608	8.8	-0.0152	-0.016	-5.3
N'_v	-0.01105	0.01036	9.4	-0.00638	-0.007	-9.7
N'_v / Y'_v	0.65539	0.6452	0.8	0.35	0.365	-4.3
$Y'_v - m'$	-0.01383	-0.01360	1.7	-0.0128	-0.0131	-2.3
$Y'_r - m' x'_G$	-0.14420	-0.13252	8.1	-1.07	-1.1505	-7.5
$Y'_r - m'$	-0.01078	-0.01040	3.5	-0.01	-0.011	-10.0
$N'_v - m' x'_G$	-0.00062	-0.00060	3.2	-0.00055	-0.00061	-3.6
$N'_r - I'_z$	0.00113	0.00105	7.2	0.00058	0.00053	8.6
$N'_r - m' x'_G$	-0.00296	0.00277	6.3	-0.0029	-0.0031	-6.9

Резюме и основни изводи от симулациите на динамични изпитания

От Табл.9.1 е видно, че хидродинамичните производни и в двата разгледани случая се предсказват с относителна точност под 10%, което би могло да се отчете като много добър резултат от симулационния модел. Всъщност, при условията на малки амплитуди и малки скорости на колебания – линейни и ъглови, заложили още в условията на базовия експеримент, е валидна хипотезата за квазистационарност и затова е понятно, че грешките са от порядъка на тези при анализирания в Глави 7 и 8 статични случаи на обтичане. Това касае, освен разгледаните тук хидродинамични усилия, също така и надлъжната сила на съпротивление, потапянето/изплаването и диферента, представени в [17].

Глава 10

Обобщение на числените изследвания. Основни приноси

Обобщения

Анализът, представен в настоящия труд, е изграден изцяло върху съвременната методология за анализ със средствата на компютърната динамика на флуидите, изложена в Глава 1 на дисертацията. При реализацията на отделните етапи на тази методология, стремежът бе да се използват най-съвременните и гъвкави методи, позволяващи максимална икономия на изчислителни ресурси при гарантиране на добра точност и достоверност на числените резултати. В това отношение следва да се изтъкнат няколко основни момента:

а) подходът за изграждане на числената мрежа води до използване на съставни структурирани мрежи от Декартов тип, което улеснява неимоверно много процеса на тяхното конструиране и прави задачата практически изпълнима, особено в случаите на статичен дрейф и динамичните изпитания. Елиминира се необходимостта от използване на статични неструктурирани мрежи с тетраедрална или друга форма и използване на изкуствени алгоритми за деформиране на мрежата при области с променливи граници;

б) използван е сравнително прост комбиниран $k-\varepsilon/k-\omega$ модел на турбулентност, позволяващ съчетаване на преимуществата на двата съставни модела в пристенната част на граничния слой и отдалечената зона на течението, който работи добре при експерименталните ъгли на атака.

в) избран е метод за отчитане на свободната повърхност, който дава реалистични картини на вълновите системи при различните числа на Фруд и реалистични стойности за пълното съпротивление на модела и за стойностите на потапянето/изплаването и ъгъла на диферент на прав курс и с ъгъл на дрейф.

г) хидродинамичните коефициенти на линейната теория на управляемостта се предсказват с добра точност.

Общият извод от представените в анализа резултати е, че избраният симулационен модел и използваният софтуер CFDSHIP-IOWA са в състояние да прогнозира адекватно маневрените характеристики на обекта на изследване в рамките на разгледания диапазон на плитководието h/T и параметри на обтичане – числата на Фруд и Рейнолдс, в моделен мащаб.

Основни приноси

В дисертационната работа се очертават следните приносни моменти:

Научни приноси:

- дефинирана и математически обоснована задачата за обтичане на катамаран при ограничение на фарватера по дълбочина и ширина при движение с до- и надкритични скорости със 6 степени на свобода и отчитане на вълнообразуването по свободната повърхност;
- дефинирана е и е генерирана общата изчислителна мрежа около корпуса на катамарана чрез последователно изграждане и последващо срастване на индивидуалните изчислителни мрежи;
- приложен е комбиниран модел на изотропна турбулентност при двукорпусен съд;
- приложен е съвременен метод за отчитане на вълнообразуването и определяне на формата на свободната повърхност;
- изследвана е сходимостта на численото решение на осреднените по Рейнолдс нестационарни уравнения на Навие-Стокс при вариации на относителната дълбочина h/T ;
- извършен е анализ на неопределеността при изчисляване на хидродинамичните характеристики по възприетата методика на ИТТС;
- уточнени са границите на приложимост на симулационния модел.

Научно-приложни:

- Изчислени са хидродинамичните производни в структурния модел на маневреното движение на катамаран;
- Изследвано е влиянието на плитководието върху вълновите картини;
- Изследвано е изменението на хидродинамичните характеристики при движение на катамарана в широк скоростен диапазон (докритични, критични и надкритични скорости);
- Методът е валидиран чрез сравнение с експериментално получени данни за кинематиката и динамиката на съответно изследвания случай на маневрено движение на катамарана.

Обогатяване на знанието

Резултатите от работата по дисертацията представляват принос в теоретико-експерименталното изследване на движението на многокорпусен плавателен съд в условията на плитка вода при високи скорости.

Оригиналност на изследванията

Разработката представлява систематичен подход към задачата за анализ и числено изследване на характеристиките на течението около корпуса на високоскоростен двукорпусен плавателен съд на плитководие, какъвто подход не е известно да е прилаган досега.

Обосновка на използваните методи

Използваните при разработването на дисертацията методи и софтуерни продукти са апробирани в световната практика, основно по отношение на решаването на осреднените нестационарни уравнения на Навие-Стокс, генерирането на изчислителната мрежа и отчитане на свободната повърхност. Към тях са приложени адекватни методи за оценка на сходимостта на числените решения по параметри на мрежата и верификация и валидация на симулациите чрез съществуващата методика на ИТТС, както и чрез пряко сравнение с резултатите от щателно проведени моделни изпитания в опитния басейн на ИМСТЦХА.

Практическа приложимост

Получаваните крайни резултати под формата на т.н. хидродинамични производни пряко могат да бъдат използвани в системно-базираните методи за симулационно изследване на управляемостта на плавателни съдове.

Насоки за бъдещи изследвания

- Провеждане на изследвания при ъгли на дрейф над 10° ;
- Изследване и анализ на вихрообразуването при обтичането на катамарана;
- Прилагане на хибридният модел на турбулентност DES върху по-големи изчислителни мрежи;
- Изследване на разпределението на силовите реакции върху отделните корпуси;
- Подробно изследване на вълновите картини при различни относителни дълбочини и числа на Фруд.

Декларация за оригиналност

Декларирам, че настоящата дисертация е изцяло авторски продукт и в нейното разработване не са използвани чужди публикации и разработки в нарушение на авторските им права.

При изработването, оформлението и отпечатването на дисертационния труд са използвани само лицензирани комерсиални програмни продукти на Microsoft® и институционални продукти, достъпни по силата на двустранни договори за сътрудничество между ИМСТЦХА-Варна и Института за хидравлични изследвания към Университета на Айова, щат Айова, САЩ. Графиките са разработени с компютърната програма TecPlot 360© на Amtec, Inc. Изчислителните мрежи са разработени с програмата Gridgen© на Pointwise, Inc.. Програмата за числена симулация на течения на вискозна течност със свободна повърхност при високи числа на Рейнолдс CFDShip_IOWA, използвана за реализиране на числените симулации, е собствена разработка на Института за Хидравлични изследвания на Айова към Университета на щат Айова, САЩ (Iowa Institute of Hydraulic Research (IHR)).

Приложение А

Статии и доклади, разработени и публикувани в рамките на дисертацията

Zlatev, Z.Z., Milanov, E., Chotukova, V., Sakamoto, N. and Stern, F., **Combined Model-Scale EFD-CFD Investigation of the Maneuvering Characteristics of a High Speed Catamaran**, Proceedings. of the 10th International Conference on Fast Sea Transportation, FAST'2009, 5-9 October, 2009, Athens, Greece, Vol. I, pp. 449-462. (ISBN 978-960-254-687-1)

E. Milanov, Z. Zlatev, V. Chotukova, F. Stern . **Numerical and Experimental Prediction of the Inherent Course Stability of High Speed Catamaran in Deep and Shallow Water**. Proceedings of the 28th Symposium on Naval Hydrodynamics , Pasadena, California, 12-17 September 2010.

Златко З. Златев, Иван В. Иванов. Числено и експериментално изследване на течението около модел на високоскоростен катамаран, Годишник на ТУ-Варна, Том I, стр.249-254, Варна, 2010 г.(ISSN: 1311-896X).

Evgeni Milanov, Zlatko Zlatev, Valya Chotukova and Frederick Stern. **Analysis of Inherent Course Stability of a High Speed Catamaran in Deep and Shallow Water**. International Shipbuilding Progress, ISSN 0020-868X , vol. 58, 2-3, 2011.

Milanov, E., Zlatev, Z. **Summary Report on Delft372 Catamaran EFD and CFD Investigations**, Chapter 24, NATO RTO Panel AVT-161 Meeting, 17-19 October, Edinburgh, UK, 2011.

Презентации и публични изяви, свързани с резултатите от дейности в рамките на дисертацията

Zlatev, Z. **Delft Catamaran Deep and Shallow Water Resistance**, Annual Meeting: URANS/DES Code Development for Ship Hydrodynamics Simulation Based Design: CFDSHIP-IOWA. On and Off-Site Contract program Review, IHR, University of Iowa, August 14, 2008. (презентация на годишен преглед на дейностите по дисертацията в рамките на международен проект).

Zlatev, Z. **Delft Catamaran Deep and Shallow Water PMM**, Annual Meeting: URANS/DES Code Development for Ship Hydrodynamics Simulation Based Design: CFDSHIP-IOWA. On and Off-Site Contract program Review, IHR, University of Iowa, July 29, 2009. (презентация на годишен преглед на дейностите по дисертацията в рамките на международен проект).

Zlatev, Z.Z., Milanov, E., Chotukova, V., Sakamoto, N. and Stern, F., **Combined Model-Scale EFD-CFD Investigation of the Maneuvering Characteristics of a High Speed Catamaran**, 10th International Conference on Fast Sea Transportation, FAST'2009, 5-9 October, 2009, Athens, Greece (презентация на едноименен доклад, изнесена на същата конференция).

Zlatev, Z., Milanov, E., Stern, F. **CFD Studies on the Delft372 Catamaran Bare Hull in Deep and Shallow Water**. Proceedings of NATO RTO Conference, paper #18, 12-14 October, Portsmouth, UK, 2011

Библиография

1. Abkowitz, M.A. *Lectures on Ship Hydrodynamics-Steering and Maneuverability*, HyA Report Hy-5, 1964.
2. Carrica, P.M., Wilson, R.V., and Stern, F., *An Unsteady Single-Phase Level Set Method for Viscous Free Surface Flows*, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 53, Issue 2, 20 January 2007, pp. 229-256.
3. Carrica, P.M., Wilson, R.V., Noack, R., Stern, F. (2007). *Ship Motions using Single-Phase Level-Set with Dynamic Overset Grids*. Computers & Fluids 36 (2007a), pp. 1415 – 1433.
4. GRIDGEN, version 15.11, *User's Manual* (2006). Pointwise Inc.
5. International Towing Tank Conference. *Maneuvering Committee. Final Report and Recommendations of the 25th ITTC*. Proceedings of 25th ITTC, Fukuoka, Japan, 2008.
6. Milanov, E.M. *High-Speed Multihull Maneuvering Including Effects of Shallow Water and Waves (Year I)*, BSHC Technical Report, KP072006/01, Rev.0, 2008.
7. Noack, R.W. *SUGGAR: a General Capability for Moving Body Overset Grid Assembly*. AIAA 2005-5117. 17th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, June 6-9, 2006, Toronto, Canada.
8. Patterson, E.G., Wilson, R.V., Stern, F. *General-purpose Parallel Unsteady RANS Ship Hydrodynamics Code: CFDShip-IOWA*. IIHR Report 432, Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, USA, 2003.
9. Roache, P.J., *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*, Hermosa publishers, Albuquerque, NM, 1998.
10. Sakamoto, N., *URANS and DES Simulations of Static and Dynamic Maneuvering for Surface Combatant*. PhD Thesis, May 2009, Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of IOWA, Iowa City, USA.
11. SIMMAN'2008 - Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods, Copenhagen, Denmark, 14-16th April 2008 (<http://www.simman2008.dk>)
12. Stern, F., Wilson, R.V., Coleman, H.W., and Paterson, E.G., (2001), *Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations—Part 1: Methodology and Procedures*, Journal of Fluids Engineering, Vol. 123, pp.793-802.
13. Strøm-Tejsen, J., M. S. Chislett, *A Model Testing Technique and Method of Analysis for the Prediction of Steering and Manoeuvring Qualities of Surface Ships*, Proceedings of the Sixth Symposium on Naval Hydrodynamics, Arlington, 1966, pp.317-382.
14. Vant Veer, R. *Experimental Results of Motions, Hydrodynamic Coefficients and Wave Loads on the 372 Catamaran Model*, TU Delft Report 1129, 1998.
15. Wilcox, D.C. *Turbulence Modeling for CFD*, 2nd ed., Birmingham Press, 1998.
16. Xing, T., Carrica, P., Stern, F. *Computational Towing Tank Procedures for Single Run Curves of Resistance and Propulsion*. ASME J.Fluids Eng., **130**, 101102, 2008, pp.1-14.
17. Zlatev, Z.Z., Milanov, E., Chotukova, V., Sakamoto, N. and Stern, F., *Combined Model-Scale EFD-CFD Investigation of the Maneuvering Characteristics of a High Speed Catamaran*, Proceedings. of the 10th International Conference on Fast Sea Transportation, FAST'2009, 5-9 October, 2009, Athens, Greece, Vol. I, pp. 449-462.

