



Издается с 2008 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Корчак В.Ю.</i> К 60-летию Секции прикладных проблем при Президиуме РАН .....	4
<b>Статьи</b>	
<i>Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В., Якушенко Е.И.</i> Компьютерные технологии корабельной гидромеханики: состояние и перспективы .....	8
<i>Родионов А.А., Хантулева Т.А.</i> Нелокальная гидродинамика и ее приложения .....	22
<i>Кузьмицкий М.А., Гизитдинова М.Р.</i> Мобильные подводные роботы в решении задач ВМФ: современные технологии и перспективы .....	37
<i>Коваленко В.В., Корчак В.Ю., Чулков В.Л.</i> Концепция и ключевые технологии подводного наблюдения в условиях сетецентрических войн .....	49
<i>Дашевский О.Ю., Нежевенко Е.С., Чулков В.Л.</i> Апертурный синтез гидроакустических антенн – основа мобильных гидроакустических систем наблюдения .....	65
<i>Тарасов С.П., Воронин В.А.</i> Перспективы применения методов нелинейной акустики в технологиях гидроакустического поиска .....	78
<i>Белогубцев Е.С., Кирюхин А.В., Кузнецов Г.Н., Михайлов С.Г., Пудовкин А.А., Смагин Д.А., Федоров В.А.</i> Проблемы и предварительные результаты испытания систем активного гашения низкочастотных сигналов в водной и воздушной среде .....	93
<i>Иванов М.П., Степанов Б.Г.</i> Исследование акустического биосенсора дельфина и возможности построения его технического аналога .....	108
<i>Стародубцев Ю.Д., Надолишняя А.П.</i> История, современное состояние и перспективы служебного использования китообразных в составе биотехнических систем двойного назначения .....	123
<b>Перспективные направления развития науки и техники</b>	
<i>Арсентьев В.Г., Криволапов Г.И.</i> Некоторые результаты реализации подводных сетевых технологий в СибГУТИ .....	129
<b>Конференции</b> .....	135
<b>Поздравляем!</b> .....	138
<b>Хроника</b> .....	140
Правила представления материалов в редакцию.....	142

# CONTENTS

<i>Korchak V.Yu.</i> To the 60-th Anniversary of Section of Applied Problems at Presidium of RAS .....	4
--	---

## Articles

<i>Guriev U.V., Tkachenko I.V., Ykushenko E.I.</i> Computer Technologies in Marine Hydrodynamics: State-of-the-Art and Perspectives .....	8
---	---

The basic stages and perspective directions of marine hydrodynamics development are considered. Efficiency of computer technologies in hydrodynamic and engineering analysis is demonstrated. Necessity of their wider use in shipbuilding is substantiated.

**Key words:** computer-aided technologies, marine hydromechanics, mathematical and physical experiments, multidisciplinary modeling.

<i>Rodionov A.A., Khantuleva T.A.</i> Nonlocal Hydrodynamics and Its Applications .....	22
---	----

Modern problems of science and engineering lead outside the scope of continuum mechanics. In order to solve the problems a new nonlocal hydrodynamics of nonequilibrium processes had been developed on the base of statistical mechanics using methods of nonlinear operator sets and adaptive control. The allowance for self-organization and selfregulation provides the mathematical model to be completed and results discrete structure spectra and structure transitions in a system. Application of the new approach to problems of flow and wave propagation in condensed media allows the description of the observed effects that have no explanation in the framework of the classical hydrodynamics.

**Key words:** nonequilibrium process, nonlocality, memory, selforganization, structure, multi-scaling, control..

<i>Kuzmitsky M., Gizitdinova M.</i> Mobile Underwater Robots for the Navy Tasks: Modern Technologies and Prospects .....	37
--	----

In the article the state-of-the-art review of prospects of mobile underwater robots using for solving some naval problems is resulted: MCM, surveys, ports, harbors and sea borders protection, targeting and underwater surveillance. Possible technologies of the specified problems solving using mobile underwater robotics are considered.

**Key words:** mobile underwater robot, technical shape, mission, energy source, carriers, problems, technologies.

<i>Kovalenko V.V., Korchak V.J., Chulkov V.L.</i> Concepts and Key Technologies of Underwater Surveillance Systems in Networked Centric Warfare .....	49
---	----

This paper presents the concept of creation and main features of integrated networked underwater surveillance systems. Several key aspects of such systems variants creation and their features are discussed.

**Key words:** net-centric warfare; integrated networked underwater surveillance system; sensor networks; distributed network system.

<i>Dashevsky O.Yu., Nejevenko E.S., Chulkov V.L.</i> Sonar Array Aperture Synthesis as a Foundation for Mobile Surveillance Sonar Systems .....	65
---	----

The paper analyzes the most effective aperture synthesis methods in hydroacoustics. A synthesis method for wide-band signals is suggested. A SynApp program developed for comparative analysis of different methods is described. The results of an experimental study with test signals (generated by the program) and real signals (obtained from a real towed array) are presented. Aperture synthesis availability in hydroacoustics is concluded.

**Key words:** hydroacoustics, synthetic aperture, flexible underwater towed array, wide-band acoustic signals, real signals.

<i>Tarasov S.P., Voronin V.A.</i> Prospects of Application of Nonlinear Acoustics Methods in Hydroacoustic Search Technologies .....	78
--	----

In the report the results of theoretical and experimental researches of the nonlinear phenomena in acoustics are discussed. It is shown, that using of these phenomena allows to create sonar devices and integrated systems for underwater and buried objects search, underwater surveillance, mineral and biological resources exploration, ocean environment monitoring. Characteristics of parametrical devices are discussed and results of their applications for solving various problems of hydroacoustics are considered. Ways of sonar means perfection and

principles of their construction using methods of nonlinear acoustics are discussed.

**Key words:** nonlinear phenomena, nonlinear interaction, parametrical arrays, beam pattern.

*Belogubtsev E.S., Kirukhin A.V., Kuznetsov G.N., Mikhailov S.G., Pudovkin A.A., Smagin D.A., Fedorov V.A. Testing of Low Frequency Water and Air Sound Active Cancellation Techniques: Problems and Preliminary Results* ..... 93

Active control of low frequency sound vibration is considered. The necessity of solving this problem by active means in consequence of low cancellation effectiveness of passive techniques and means for signals on low frequencies is concluded. The algorithms and techniques development results are discussed for active cancellation of sound signals in water and air medium. The importance of solving this problem to ensure sea objects stealth and maintenance staff environmental safety is concluded. The real opportunity to cancel low frequency discreet components on not less then 8–15 dB and to reduce wide band level on not less then 6...8 dB is demonstrated. It is denoted that discreet frequency components cancellation both increase objects latency hiding and falsify objects classification characteristics.

**Key words:** Object ADT (armament and defense technology), Active cancelling of inner and outer noises, perceptibility decrease, environmental safety support, discreet receiving and radiating elements, falsification of classification characteristics, designer alternative.

*Ivanov M.P., Stepanov B.G. Study of the Dolphin Acoustic Biosonar and Feasibility of Constructing Its Technical Analogue* ..... 108

Presented below are the results of experimental studies of the biosensor system of dolphins using acoustic channel for search and identification of underwater objects as well as for orientation in three dimensional space and underwater communications between individuals. The dolphin's (*Tursiops truncatus*) sonar functioning in complicated conditions of acoustic noise of the dolphin sonar is analyzed. It is shown that the basic mechanisms that provide noise immunity of the dolphin sonar are: the radiation of broadband pulses with zero carrier, use of burst (accumulation), burst rate variable repetition (time selection), and burst with interval-time coding. Possible ways of constructing of broadband underwater transducers and arrays capable to radiate acoustic signals similar to echolocation impulses of cetaceans are considered. Analyzed in the paper is functioning of two electrically operated models of broadband transducers: rod with phased excitation of sections and waveguide type transducer in the form of a coaxial set of piezoactive rings. Some results of solving synthesis and analysis problems for the above models of transducers are presented. It is shown that these transducers provide bandwidth, respectively, 1.5–2 octaves and 2–3 octaves and more.

**Key words:** echolocation signals, the analysis and synthesis of broadband signals, noise immunity, broadband signal, signal without carrier, wideband underwater transducer.

*Starodubtsev Yu.D., Nadolishnyaya A.P. History, State-of-the-Art and Perspectives of the Cetaceans Use as a Part of Biotechnical Dual-Purpose Systems* ..... 123

Here we present the history of using marine mammals (MM) as humans' assistants, the place and time of the Soviet Navy Aquarium creation, the main tasks of Lomonosov Moscow State University (MSU) involved into the research of dolphins' abilities. We describe the biotechnical system for the underwater search (UwS) creation by MSU, about the active work of the USA on using MM. It is shown that the effectiveness and the economy of UwS using MM is much higher than using divers and technical means. The forecast of biotechnical systems development perspectives is given, and the necessity of creation of the Federal base for working with MM in Russia is pointed out.

**Key words:** marine mammals, aquarium, oceanarium, office use, biotechnical systems, underwater search, echolocation, training animals, cognitive activities of animals.

### **Perspective Tendency of Development of Science and Technics**

*Arsentiev V.G., Krivolapov G.I. Some Results of Undersea Networks Technologies Realization in SibSUTIS* ..... 129

This article represents some results, achieved in Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences (SibSUTIS) in research of networks for underwater monitoring. Also, this article reports development and small series manufacturing of the range of unified underwater communication, control and navigation modules. These modules are needed for work in the near-field zone. Now they are used in the University experimental researches in the field of underwater networks technologies. These modules can be used as basis for solution of wide class of underwater researching and manufacturing problems.

**Key words:** underwater network technologies, underwater communication, control, navigation.

УДК 532

© Ю.В. Гурьев<sup>1</sup>, И.В. Ткаченко<sup>2</sup>, Е.И. Якушенко<sup>1</sup>, 2011

<sup>1</sup>Военно-морской инженерный институт (филиал) Военного учебно-научного центра Военно-морского флота «Военно-морская академия им. Н.Г.Кузнецова», Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский Государственный морской технический университет  
uvgur@mail.ru

## КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОРАБЕЛЬНОЙ ГИДРОМЕХАНИКИ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Рассмотрены основные этапы и перспективные направления развития корабельной гидромеханики. Продемонстрирована эффективность компьютерных технологий в гидродинамическом и инженерном анализе. Обоснована необходимость их более широкого использования в кораблестроении.

Ключевые слова: компьютерные технологии, корабельная гидромеханика, математический и физический эксперимент, мультидисциплинарное моделирование.

Наука гидромеханика имеет многочисленные приложения в различных технических областях, в том числе и кораблестроении. Создание любого современного гражданского или военного морского объекта – от прогулочной яхты до авианосца и стратегической подводной лодки – базируется на широком использовании фундаментальных и прикладных достижений механики жидкости. В настоящее время методы этой науки обеспечивают решение широкого круга задач кораблестроения, главными из которых являются гидродинамическое проектирование морских объектов и их гидравлических систем, а также исследование физических полей гидродинамической природы. Однако в истории проектирования и строительства кораблей вклад гидромеханики не всегда был столь заметен.

В развитии корабельной гидромеханики можно выделить несколько этапов, отличающихся как сложностью и широтой научных и инженерных задач, так и методами их решения (табл. 1). Возникновение каждого следующего этапа связано с появлением новых задач и требований к гидродинамическому анализу, обусловленных потребностями флота и кораблестроения, ростом наукоемкости его продукции. При этом задачи последующего этапа в научном и техническом плане всегда оказывались существенно сложнее задач предыдущего при безусловном сохранении актуальности последних.

Важно отметить, что каждому этапу развития корабельной гидромеханики соответствуют свои методы и технические средства решения как новых задач, так и задач предыдущих этапов. Выбор методов и средств определялся и определяется современным данному этапу состоянием науки и техники, а также ресурсами, находящимися в распоряжении ученых и инженеров. Основными методами гидродинамического анализа являются теоретические, экспериментальные, а начиная со второй половины прошлого века и численные (компьютерные). Сложность фундаментальных и прикладных задач механики жидкости при определенных недостатках, присущих каждой группе названных методов, приводит к тому, что эффективным до настоящего времени остается совместное их использование.

Первому этапу развития корабельной гидромеханики предшествовала тысячелетняя история гребного и парусного флота, на протяжении которой кораблестроители и

моряки обрабатывали методами «натурного эксперимента» обводы корпусов лодок, кораблей и их движителей – весел и парусов. Форма корпусов древних плавучих средств – удлиненное тело с заостренной носовой и кормовой оконечностями, обеспечивающими приемлемые ходовые качества и управляемость, – в целом сохранилась и в обводах современных кораблей.

Однако с появлением в XIX в. парового флота этих, главным образом качественных, знаний стало совершенно недостаточно. Возникла потребность в более точном научном прогнозировании гидродинамических характеристик кораблей, в первую очередь силы сопротивления воды и тяги движителей, необходимых для определения мощности паровой машины и конструкции движителя, обеспечивающих заданную скорость движения корабля. Поэтому первый этап развития корабельной гидромеханики можно обоснованно назвать силовым, для которого главной задачей является определение интегральных гидродинамических характеристик (ГДХ) – сил и моментов.

Таблица 1

## Основные этапы развития корабельной гидромеханики

Этап	Определение новых характерных задач	Основные методы гидродинамического анализа
1	Интегральные ГДХ – силы и моменты, действующие на корабль со стороны жидкости	Физический эксперимент, приближенные полуэмпирические методы
2	Локальные ГДХ на поверхности и вблизи корпуса – напряжение трения и давления	Физический эксперимент и частично вычислительный эксперимент
3	Характеристики полей гидродинамической природы	Физический и вычислительный эксперимент
4	Все характеристики натуральных течений в рамках мультидисциплинарного моделирования (гидроаэродинамика, динамика, прочность, акустика, термодинамика, физические поля, химические реакции и др.)	Вычислительный и физический эксперименты

На первом этапе практически единственным надежным и доступным методом нахождения гидродинамических сил был физический эксперимент. Для его проведения были построены первые опытовые бассейны, разработаны средства измерения и методики пересчета результатов модельных испытаний на натуру. При этом расчетное определение гидродинамических сил носило вспомогательный характер и было основано на приближенных моделях течений. В их основу положены теории крыла бесконечного размаха Н.Е.Жуковского и С.А.Чаплыгина, пограничного слоя Л.Прандтля и линейного волнового сопротивления тонкого судна на глубокой воде Мичелла. Эти теории и модели отличались существенной схематизацией реальных течений, использованием допущений о двумерном, стационарном или невязком их характере при существенных ограничениях на форму тел и траекторию движения. Вместе с тем сочетание экспериментальных и теоретических расчетных методов позволило решить основную задачу этого этапа – определить силу сопротивления движению корабля.

Для второго этапа новой стала задача прогнозирования локальных ГДХ – давлений и касательных напряжений на поверхности и вблизи корпуса корабля и его движительно-рулевого комплекса. Потребность в этом была обусловлена, во-первых, стремлением к улучшению технических и эксплуатационных качеств кораблей (снижение сопротивления, в том числе с помощью полимерных добавок, ламинаризации течения, повышение эффективности гребных винтов, крыльев и др.), а во-вторых, необходимостью обес-

печения скрытности кораблей (борьба с кавитацией, вихреобразованием и акустическим излучением). В этих условиях знания только гидродинамических сил было уже недостаточно, поскольку для достижения поставленных целей требовалась ювелирная работа по изменению, например, формы лопастей гребных винтов и крыльев, основанная на анализе локальных характеристик.

На этом этапе развития корабельной гидромеханики эксперимент оставался доминирующим средством гидродинамического анализа. В это время были построены новые экспериментальные установки – кавитационные трубы и бассейны, циркуляционные и маневренно-мореходные бассейны; разработаны более совершенные приборы и методы измерений, усовершенствованы методики пересчета результатов опытов на натуральный объект. В практику гидродинамического анализа начали входить компьютерные технологии, что заметно расширило его возможности. Для решения безвихревых и крыльевых задач стали использоваться методы граничных интегральных уравнений и дискретных вихрей, что позволило снять ряд ограничений предыдущего этапа и учесть трехмерность и нестационарность течения, гидродинамическое взаимодействие корпуса и его элементов, наличие в потоке других тел, решать задачи в нелинейной постановке, выполнять расчеты пространственных толстых пограничных слоев на корпусе и ряд других [1].

Внедрение компьютеров позволило также перейти к численному прогнозированию некоторых гидродинамических полей, например первичного гидродинамического поля корабля, полей скоростей и давлений в районе подводного старта морского оружия и в диске гребного винта. Однако эти задачи решались в невязкой жидкости, без учета ряда принципиально важных гидродинамических и гидрофизических факторов.

Третий этап развития корабельной гидромеханики связан с появлением сложнейшей задачи прогнозирования и анализа различных физических полей гидродинамической природы, причем не только их осредненных, но и пульсационных (турбулентных) составляющих. И если на двух первых этапах использовалась предельно упрощенная модель морской среды – однородная в пространстве и времени жидкость постоянной плотности, то задачи третьего этапа потребовали учета реальных гидрофизических условий. Это в первую очередь, – переменная соленость, температура, плотность, пространственно-временная неоднородность естественных полей скоростей и давлений, обусловленных, например, внутренним волнением и подводными течениями. Существенно расширились и пространственно-временные масштабы задач. Поля гидродинамической природы, такие, например, как дальний глубинный и поверхностный кильватерный след, необходимо отслеживать в течение десятков часов и километров.

Исследование и анализ таких полей можно проводить методами как физического эксперимента, так и компьютерного моделирования. Не отрицая фундаментальной и прикладной значимости эксперимента, как при решении этой задачи, так и других корабельных задач гидродинамического анализа, следует указать на определенные преимущества математического моделирования. Из них одним из главных, на наш взгляд, является перспективность, связанная с постоянным и неуклонным ростом вычислительной мощности компьютеров (закон Мура), что неизбежно ведет к расширению возможностей численного моделирования.

Достоинства вычислительного эксперимента в гидродинамическом анализе становятся все более очевидными по мере роста сложности и разнообразия решаемых научных и технических задач. В кораблестроении указанный рост обусловлен не только повышением адекватности моделей внешней среды, но расширением номенклатуры объектов морской техники. К надводным кораблям и подводным лодкам первых этапов теперь прибавились разнообразные обитаемые и необитаемые подводные аппараты различного назначения, буровые и стартовые платформы, двух- и многокорпусные суда, новые виды морского оружия и другие объекты. Для гидродинамического проектирования новой

морской техники уже недостаточно традиционных подходов и имеющегося опыта. Практика создания объектов, не имеющих прототипов, показывает эффективность компьютерного моделирования, позволяющего оперативно выполнять сопоставление различных конструктивных и проектных решений, решать оптимизационные задачи, отвечать на вопросы инженеров ... а что, если?

Настоящий, четвертый этап развития корабельной гидромеханики отличается мультидисциплинарным подходом к инженерному анализу, при котором отдельные виды этого анализа – динамический, термодинамический, прочностной, акустический, химический, электромагнитный и другие – проводятся совместно в рамках интегрированных математических моделей и пакетов прикладных программ. Такой подход заметно приближает исследователей к реальной природе рассматриваемых процессов и открывает новые, недоступные ранее возможности проектирования технических объектов. Его реализация невозможна без широкого использования передовых компьютерных технологий и суперкомпьютеров.

На данном этапе развития компьютерного моделирования его применение в корабельном гидродинамическом анализе возможно на основе двух групп математических моделей. К первой, относительно более простой группе, относятся модели, построенные на допущении о невязком характере течения жидкости при косвенном учете отдельных вязких эффектов. Яркий пример такой модели – теория крыла. Как правило, дифференциальные уравнения этих моделей являются линейными, что существенно упрощает их решение; объем расчетов, или вычислительная стоимость, относительно невелики и их реализация доступна производительности современных персональных компьютеров. По критерию вычислительной стоимости к первой группе можно отнести и модели пограничного слоя, основанные на упрощенных нелинейных уравнениях теории вязких течений.

Исходными уравнениями моделей второй группы являются уравнения Навье-Стокса и их осредненные модификации. Несмотря на критику полноты и строгости этих уравнений, ставящую под сомнение корректность их использования для описания основного режима течения жидкости в природе и технике – турбулентного, они являются общепринятой моделью таких течений [1, 2].

В практике моделирования турбулентности в настоящее время в том или ином объеме используются методы [3]:

- прямого численного моделирования (Direct Numerical Simulation – DNS) – непосредственное интегрирование уравнений;
- крупных вихрей (Large Eddy Simulation – LES) – интегрирование частично осредненных по объему уравнений;
- интегрирования уравнений Рейнольдса (Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes – URANS) – осредненных по времени уравнений.

В этом списке методы расположены по степени адекватности расчета турбулентных течений – наиболее точные результаты можно получить прямым численным моделированием. Однако при практическом выборе метода приходится учитывать их вычислительную стоимость. Так, для расчета натуральных корабельных течений при числах Рейнольдса порядка  $10^8$ – $10^9$  необходим компьютер с быстродействием 100 эксафлопс, т.е.  $10^{20}$  операций в секунду для чисел с плавающей запятой. По различным оценкам, такая вычислительная система при существующих темпах роста производительности суперкомпьютеров появится лет через 50–70.

В настоящее время самый мощный суперкомпьютер в мире «Тяньхэ-1А» (Млечный путь-1А), построенный в Китае, имеет производительность 2.5 петафлопса (1 петафлопс =  $10^{15}$ , или миллион миллиардов операций в секунду). При этом мощнейший российский компьютер, установленный в Саровском ядерном центре, имеет производительность около одного петафлопса и занимает по этому показателю двенадцатое место в мире.

Таким образом, производительность даже самых мощных современных суперкомпьютеров оказывается на пять порядков ниже той, которая необходима для расчета натуральных корабельных течений методами прямого численного моделирования.

Существенно меньшие требования к производительности компьютеров предъявляют методы крупных вихрей и еще меньшие – методы интегрирования уравнений Рейнольдса. Благодаря своей экономичности последние методы являются основой современного компьютерного гидродинамического анализа в различных научных и технических областях, особенно в авиации, энергомашиностроении и автомобилестроении. При этом современные высокопроизводительные компьютеры, даже не самые мощные, обеспечивают надежное прогнозирование интегральных и локальных ГДХ технических объектов при натуральных числах Рейнольдса. Недостаток уравнений Рейнольдса состоит в неадекватности расчета сложных нестационарных течений и течений со значительными зонами отрыва. Для таких потоков заметно лучшие результаты обеспечивают методы крупных вихрей, но они обладают существенно большей вычислительной стоимостью и в настоящее время применяются в основном для расчета модельных корабельных течений при  $Re = 10^6 - 10^7$ .

В современном гидродинамическом анализе широко используются программные пакеты различного уровня сложности и универсальности – как коммерческие, так и свободно распространяемые. Их подразделяют на «тяжелые», «средние» и «легкие» [1]. «Тяжелые» пакеты предназначены для решения наиболее сложных инженерных задач, обеспечивая возможно полный при существующих мощностях компьютеров учет физической и математической нелинейности и нестационарности процессов различной природы в их взаимодействии (многодисциплинарность). Они используют модели вязких течений из второй группы, в основном уравнения Рейнольдса и метода крупных вихрей. Примерами пакетов такого уровня являются коммерчески ANSYS CFX, ANSYS Fluent, STAR-CCM+, свободно распространяемый пакет OpenFOAM и ряд других.

Пакеты среднего уровня базируются практически на тех же математических моделях вязких течений, что и «тяжелые» пакеты, но уступают им по ряду качеств, в первую очередь по универсальности и возможностям решения исследовательских задач. Перспективным направлением создания пакетов среднего уровня стал подход, состоящий в разработке облегченных (иногда применяется даже термин «демократичных») версий «тяжелых» пакетов с использованием концепции Upfront CFD (Upfront – пер. с англ. «с упреждением, впереди»).

Эта технология предусматривает непосредственное включение компьютерных средств вычислительного анализа потоков жидкостей и газов в процесс проектирования. Важнейшей идеей концепции является ориентация на инженера-конструктора. Интерфейс пакета и технология его использования обеспечивают возможность самостоятельной работы с ним квалифицированного предметного специалиста, проектирующего то или иное техническое изделие, эксплуатация которого связана с движением сплошной среды. Такой подход отражает современную тенденцию переноса значительной части расчетных задач с плеч специалистов-расчетчиков на инженеров, проектировщиков и конструкторов.

По статистике, только один из пятнадцати инженеров-механиков готов тратить значительные усилия на «ручное» создание сложных расчетных моделей для анализа потоков. Остальным четырнадцати эти результаты также необходимы, но использование для их получения «тяжелых» пакетов вычислительной гидродинамики представляется чрезмерно сложным. Концепция Upfront CFD нацелена на то, чтобы предоставить подавляющему большинству этих инженеров инструмент гидродинамического анализа, достаточно простой в использовании и одновременно дающий результаты, пригодные для практического применения. С учетом того что, по некоторым оценкам, до 80 % технических

задач гидродинамического анализа может быть успешно решена с помощью программ, созданных на основе концепция Upfront CFD, это направление имеет хорошие перспективы развития.

Примером применения этой технологии может служить пакет программных продуктов STAR-CAD Series от разработчика «тяжелого» пакета STAR-CD [4], представляющий собой относительно несложные средства вычислительной гидродинамики, интегрированные в интерфейсы известных CAD-пакетов. Такая интеграция позволяет инженерам моделировать течения жидкости и тепловые процессы, используя привычный интерфейс CAD-систем. Преимущества подхода в следующем:

- конструкторам и инженерам нет необходимости отдельно изучать специализированный CFD-пакет;
- обеспечивается возможность быстрого и простого изменения геометрии изделия в процессе исследований, что позволяет выполнять параметрический анализ конструкции типа «что – если?»;
- использование параметрической CAD-модели позволяет изменять геометрию различных частей конструкции, не меняя расчетных параметров, свойств жидкости или граничных условий, что экономит время и повышает производительность труда.

Наличие двусторонней связи между CAD-системой и CFD-решателем позволяет оперативно проанализировать, как изменение CAD-модели повлияет на результаты численного моделирования: в STAR-CAD Series достаточно нажать одну кнопку для запуска нового расчета на измененной модели, что резко повышает эффективность так называемого рабочего окружения специалиста.

Замыкают используемую классификацию «легкие» пакеты, предназначенные, как правило, для решения частных задач гидродинамического анализа. Достоинства и недостатки этих пакетов определяются приближенностью их математических моделей, входящих, как правило, в первую группу. Преимуществом являются относительная простота и высокая скорость вычислений, что позволяет эффективно использовать персональные компьютеры; основными недостатками – узкая направленность на решение конкретных задач и существенная схематизация реальных течений.

Хотя часть «легких» пакетов предназначена только для расчета невязких потоков, существует большое число пакетов, включающих программные модули для расчета вязких потоков на основе уравнений пограничного слоя и Рейнольдса. Следует заметить, что граница между «легкими» и «средними» пакетами в этом случае становится весьма условной, поскольку они используют одни и те же математические модели вязких течений.

В качестве примеров можно указать такие «легкие» пакеты, как Shallo гамбургского опытового бассейна (Hamburg Ship Model Basin), Warp (CETENA S.p.A., Италия), 2DYNAFS, 3DYNAFS и другие программы корпорации DYNAFLOW, Inc. (США), в том числе ориентированные на решение специальных задач Военно-морского флота (DFBEM), комплекс SHIPFLOW (FLOWTECH International AB, Швеция), CATRAN (Россия) и ряд других, в том числе и пакет Flow3DShip [1, 5], разработанный авторами данной статьи.

Последний из названных пакетов предназначен для прогнозирования ряда интегральных, распределенных и полевых гидродинамических характеристик подводных объектов. На рис. 1 сравниваются расчетные и экспериментальные значения безразмерных позиционных и вращательных коэффициентов сил и моментов для одного из таких объектов. Расчеты выполнены для двух моделей обтекания объекта – линейной, применяемой при безотрывном движении жидкости, и нелинейной, учитывающей влияние отрыва пограничного слоя на гидродинамические давления и силы.

Пакет Flow3DShip обеспечивает приемлемую для начальных этапов проектирования точность прогноза ряда гидродинамических характеристик. Однако используемые в

этом пакете невязкие модели не позволяют определить такую важнейшую гидродинамическую реакцию, как силу вязкостного сопротивления.

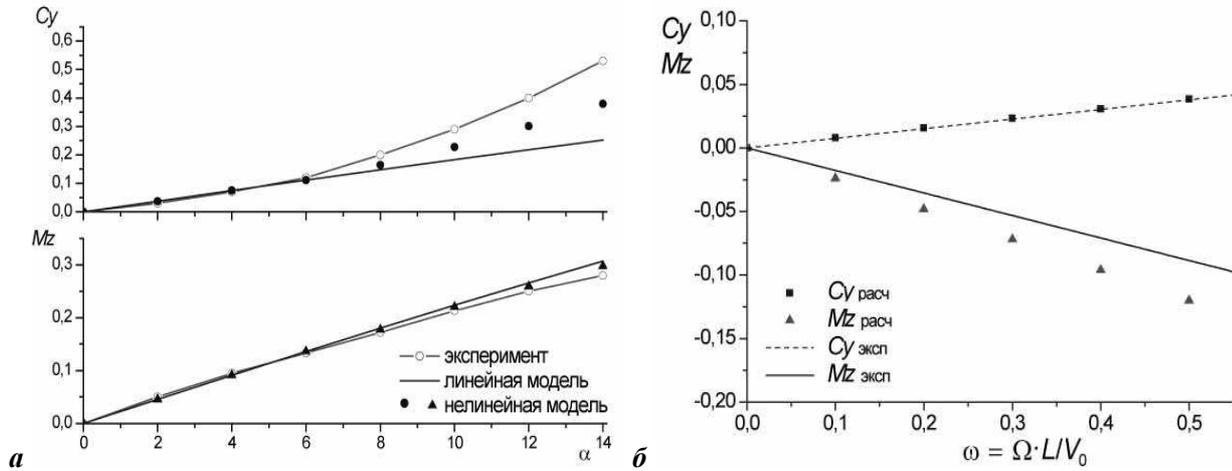


Рис. 1. Расчетные и экспериментальные значения коэффициентов сил и моментов модели подводного объекта от угла атаки и безразмерной угловой скорости  $\omega$ .

Для получения всего спектра характеристик, необходимых для гидродинамического проектирования морских объектов, требуется привлечение более сложных моделей вязких течений, реализованных в «тяжелых» и «средних» пакетах. В табл. 2 представлены коэффициенты попутного потока, вязкостного  $C_x$ , сопротивления трения  $C_{тр}$  и сопротивления формы  $C_f$  модели корпуса танкера, полученных численно с помощью пакета Fluent в работе [6] и экспериментально при числе Рейнольдса  $Re = 4.6 \cdot 10^6$ . Модель вязкого течения основывалась на уравнениях Рейнольдса, для замыкания которых использовалось восемь различных моделей турбулентности.

Из данных таблицы следует, что практически все модели турбулентности обеспечивают приемлемую сходимость с экспериментом. Практически совпадающие с экспериментальными значениями коэффициента вязкостного сопротивления было получено с помощью двух моделей турбулентных напряжений – RSM-SSG и RSM-GL. Погрешность остальных моделей при определении  $C_x$  колеблется в пределах 2–5 %, что также следует признать неплохим результатом, подтвердившим пригодность URANS-моделей для анализа суммарных характеристик стационарных и слабонестационарных течений.

Таблица 2

Вязкостное сопротивление и его составляющие для модели танкера

Модель	Коэффициент попутного потока	$C_x \cdot 103$	$C_{тр} \cdot 103$	$C_f \cdot 103$
S-A	0.486	4.051	3.360	0.691
SKE	0.482	4.216	3.503	0.713
RNG	0.537	4.145	3.416	0.728
RKE	0.539	4.149	3.402	0.746
« $k - \omega$ » SST	0.538	4.200	3.387	0.814
« $k - \omega$ » Wilcox	0.583	4.258	3.427	0.831
RSM-GL	0.561	4.048	3.293	0.756
RSM-SSG	0.560	4.060	3.357	0.702
Эксперимент	0.557	4.056	3.396	0.660

Из отечественных разработок среднего уровня следует выделить пакет FlowVision фирмы «ТЕСИС», позволяющий проводить анализ ламинарных и турбулентных пространственных течений, моделировать процессы горения, теплоперенос, пористость среды и некоторые другие. Однако ограниченные возможности этой системы по построению расчетных сеток (генерируется только структурированные сетки, не используются движущиеся и деформирующиеся сетки) и ряд других ограничений снижают его конкурентоспособность по сравнению с лучшими зарубежными аналогами. Несмотря на это, пакет достаточно успешно используется для решения многих технических задач, в том числе и задач кораблестроения [7].

Данные, приведенные на рис. 2 и 3, иллюстрируют возможности пакета FlowVision для решения задач ходкости корабля. На первом из них (рис. 2) представлен график изменения буксировочного сопротивления контейнеровоза. Сопротивление рассчитывалось для двух случаев – при жесткой фиксации модели и в свободном положении, что позволило имитировать свободную посадку при буксировке. Из рисунка видно, что численное моделирование обеспечивает высокую степень согласования с данными опыта во всем диапазоне изменения скорости – от 8 до 26 уз, что соответствует изменению числа Фруда от 0.086 до 0.28.

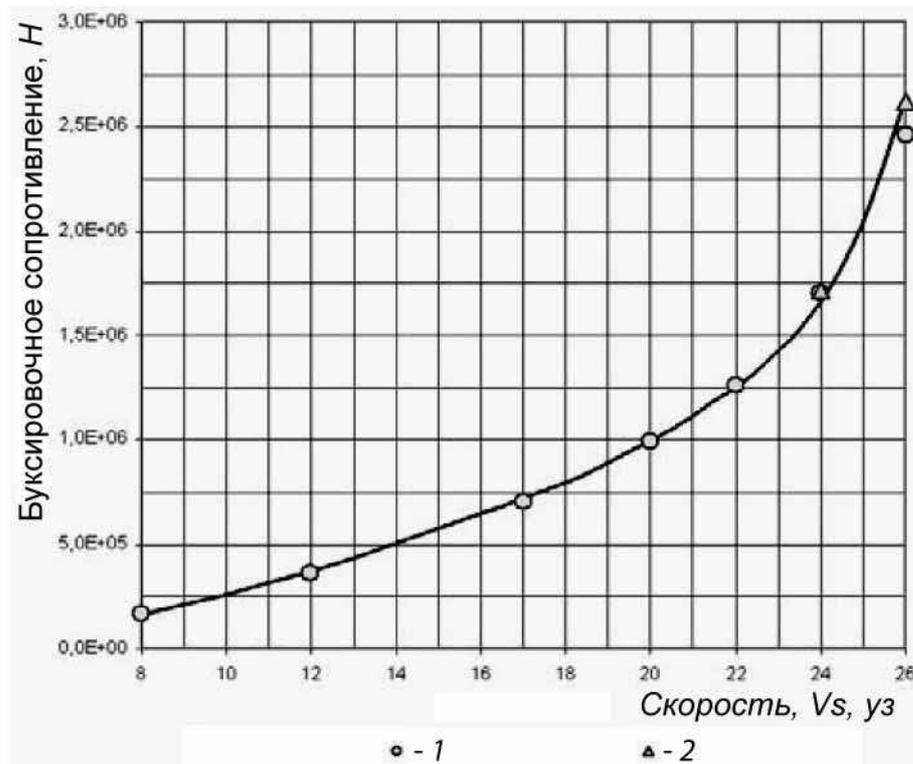


Рис. 2. Буксировочное сопротивление модели контейнеровоза, полученное с помощью методов физического и математического эксперимента. Модели: 1 – закрепленная; 2 – свободная.

На рис. 3, *а* показаны результаты численного и экспериментального прогнозирования кривых действия гребного винта М4-75, общий вид которого с распределением расчетных давлений представлен на рис. 3, *б*. Согласованность расчета и эксперимента – удовлетворительная: в среднем расхождение составляет 9 %, а максимальное, при больших значениях относительной поступи гребного винта  $J$ , – 16–25 %.

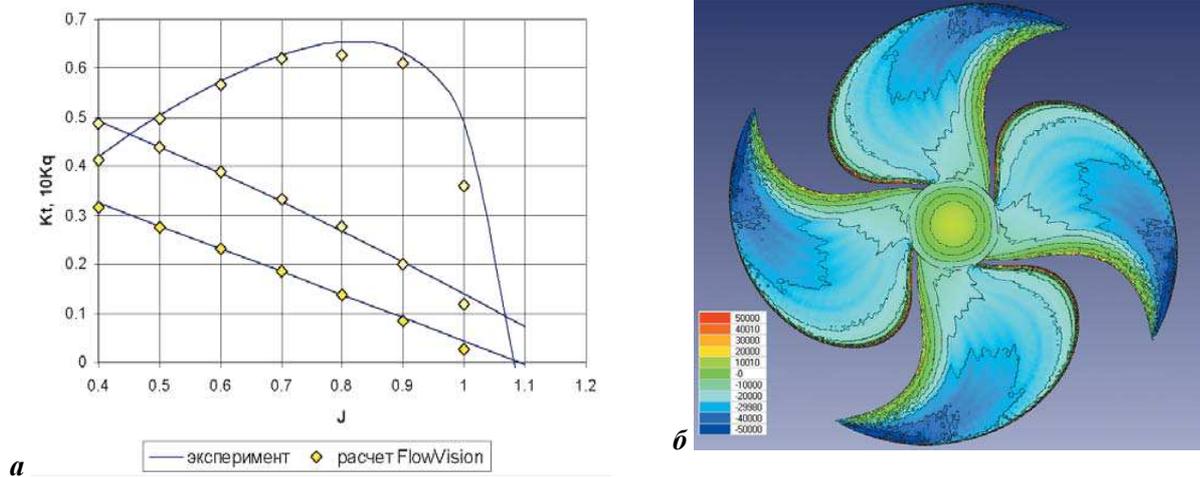


Рис. 3. Экспериментальные кривые действия гребного винта М4-75 (а) и распределение давления по поверхности его лопастей (б).

Одним из направлений внедрения мультидисциплинарного подхода в корабельном инженерном анализе является совместное решение задач гидродинамики и динамики корабля. Компьютерные технологии позволяют совместно интегрировать уравнения движения жидкости для нахождения гидродинамических реакций и уравнения движения корабля для определения параметров его траектории. В результате определяются эти реакции по мгновенным значениям кинематических параметров с учетом предыстории процесса, без использования гипотез стационарности и независимости различной физической силы.

В качестве примера рассмотрим результаты моделирования движения подводной лодки, выполненного специалистами фирмы CD-adapco – разработчика известных пакетов STAR CD и STAR CCM+. Эта задача имеет высокую вычислительную стоимость, определяемую широким диапазоном пространственных и временных масштабов, которые должны быть учтены для адекватного описания течения вокруг корпуса подводной лодки, что требует детального описания геометрических особенностей корпуса и движителя. При этом характерные размеры варьируются от толщины тонких пристеночных слоев до полного размера корабля. Разномасштабность шкал приводит к расчетным сеткам большой размерности и очень мелким шагам по времени. Однако приведенный ниже пример показывает, что ее решение возможно уже сейчас, даже в более широкой постановке, с учетом работающего гребного винта.

В рассматриваемом примере расчет течения выполняется с помощью осредненных по Рейнольдсу нестационарных уравнений Навье-Стокса (URANS). Дискретная сеточная модель состоит из 3 млн ячеек. Сетка создавалась автоматически, при помощи автоматизированной сеточной технологии компании CD-adapco. Однако в областях, где ожидалось значительные градиенты скоростей и давлений, было выполнено дополнительное «ручное» измельчение сетки. Винт был помещен в цилиндрический сеточный блок, который вращается вокруг оси винта и соприкасается с окружающей жидкостью по скользящей поверхности. Движение управляющей поверхности руля учитывалось при помощи искажения сетки (mesh distortion). По мере перемещения руля в новую позицию на каждом временном шаге происходит деформация структуры сеточного блока. При использовании этой процедуры достаточно построить сеточную модель только один раз, не создавая серии сеточных моделей для разных положений руля, что существенно сокращает объем работы по созданию сетки и заданию параметров расчета.

Расчет маневра требует согласованного решения уравнений движения твердого тела с шестью степенями свободы и уравнений турбулентного движения жидкости. Расчет начинается в начальный момент времени при заданных кинематических параметрах с вычисления гидродинамических полей, последующего интегрирования напряжений трения и давлений на твердых поверхностях для нахождения гидродинамических сил и моментов. Затем решаются уравнения движения для получения мгновенных значений кинематических параметров движения лодки. Эта информация используется для перестроения сеточной модели, которая вращается и движется вместе с твердым телом в инерциальной системе отсчета, после чего выполняется гидродинамический расчет в новом положении объекта. Проведенные исследования, в частности результаты, представленные на рис. 4, показали, что численное моделирование позволяет с достаточной для проектирования точностью предсказать все необходимые кинематические и динамические параметры лодки при криволинейном движении.

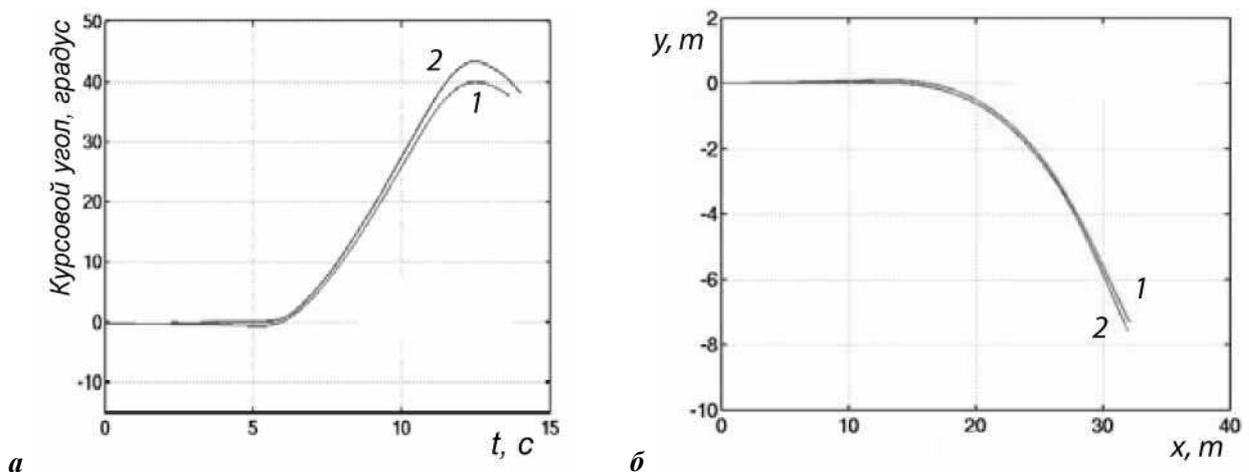


Рис. 4. Численное прогнозирование кинематических параметров при движении подводной лодки в горизонтальной плоскости: *а* – изменение во времени курсового угла; *б* – траектория центра масс лодки. 1 – расчет, 2 – измерения.

Отмечая несомненные успехи компьютерного моделирования сложных задач гидродинамики и динамики корабля, следует заметить, что уровень развития математических моделей и недостаточная производительность даже суперкомпьютеров не позволяют решать эти задачи в наиболее полной постановке с учетом многочисленных физических факторов. В приведенном выше примере расчета динамики подводной лодки и в других известных численных решениях [1] рассматриваются наиболее простые модели внешней среды – однородная безграничная жидкость или свободная поверхность с регулярным морским волнением. Вместе с тем актуальной задачей гидродинамического анализа в настоящее время является учет натуральных гидрофизических условий – стратификация жидкости, пространственно-временная неоднородность, создаваемая нерегулярным поверхностным и внутренним волнением, вихре-волновое взаимодействие и ряд других.

Для решения задач такой сложности целесообразно включать в численный анализ полуэмпирические и приближенные теоретические модели. Примером могут служить исследования гидродинамики и динамики подводных объектов в натуральных гидрофизических условиях, выполненные группой специалистов в области гидрофизики, гидродинамики и динамики подводных объектов, представляющих РАН, проектные и учебные заведения Санкт-Петербурга [8].

Такое сочетание позволило учесть основные гидродинамические факторы, влияющие на движение подводного объекта: нерегулярное морское, нерегулярное и вызванное

поверхностное волнение, внутренние волны и вязкость жидкости, основные факторы нестационарности и неоднородность среды. Вместе с тем использование эмпирических данных о гидродинамических реакциях и приближенных расчетных методов потребовало привлечения традиционных гипотез о независимости сил различной природы, стационарности, допущений об однородности поля скорости при нахождении вязких и инерционных сил, приближенного моделирования внутреннего волнения, влияния на него движущегося объекта и ряд других.

Была исследована динамика подводного объекта для нескольких характерных режимов, таких как установившееся движение под и над скачком плотности, всплытие на заданную глубину с пересечением пикноклина и некоторые другие. Наиболее сложным для управления движением оказался маневр, связанный с пересечением скачка плотности с последующим удержанием объекта на заданной, относительно небольшой глубине погружения.

Управление объектом существенно усложнялось, особенно на малых скоростях движения, при наличии поверхностного и внутреннего волнения. На рис. 5 представлены данные о движении объекта при попытке всплытия на глубину 15 м при наличии пикноклина и поверхностного волнения силой 5 баллов. Расчеты показывают, что при скорости 3 уз не удастся удержать объект от несанкционированного выброса на поверхность моря. Указанный факт объясняется противоречивыми требованиями к управлению плавучестью при пересечении пикноклина и компенсации силы «подсоса». В результате корректное управление при всплытии в условиях пикноклина, близкого к поверхности моря, и одновременного воздействия поверхностного волнения представляет проблему, решение которой облегчается наличием оперативной информации о гидрологическом разрезе и параметрах волнения на поверхности моря. Следует отметить, что осуществление этого маневра еще более усложняется в случае силового воздействия внутренних волн, имеющего знакопеременный характер.

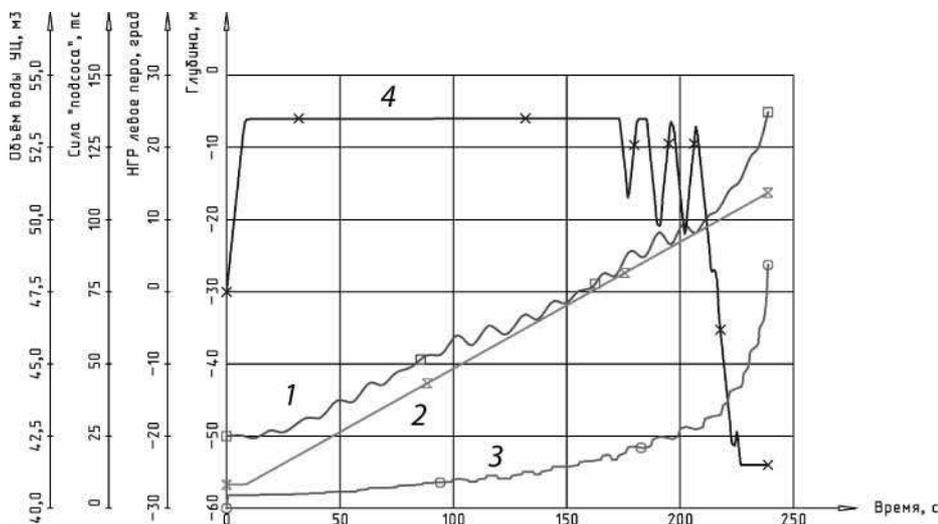


Рис. 5. Всплытие объекта с пересечением скачка плотности в условиях поверхностного волнения: 1 – глубина, м; 2 – НГР левое перо, градус; 3 – сила «подсосов», мс; 4 – объем воды УЦ, м<sup>3</sup>.

Кроме расчета гидродинамических характеристик морских объектов важной задачей современного гидродинамического анализа являются прогнозирование и исследование различных полей, включая кильватерные следы, поля скоростей и напряжений при движении тел в неоднородной среде и др. Полученные в этом направлении результаты

могут использоваться при создании и эксплуатации систем управления физическими полями корабля [9].

В качестве примера можно указать на работы [10–12], в которых приводятся результаты численного моделирования методом крупных вихрей структуры течения за удлиненным телом и крылом конечного размаха, движущихся в районе изменения плотности жидкости по глубине (пикноклин). В частности, было установлено, что вихревой след за телом и крылом всплывает только при движении над пикноклином, а при движении под ним не может его преодолеть главным образом вследствие отрицательной плавучести более тяжелых жидких частиц, выведенных из равновесия указанными телами.

На рис. 6 приводятся картины вихревого следа за крылом, движущимся под углом атаки  $\alpha = -20^\circ$ , подтверждающие сказанное о развитии этого следа над и под пикноклином. Следует также отметить, что при таком движении крыло оказывает различное по интенсивности возмущающее воздействие на слой стратифицированной жидкости: амплитуда внутренних волн, вызванных крылом, находящимся под пикноклином, оказывается в 2–3 раза больше, чем при движении над ним.

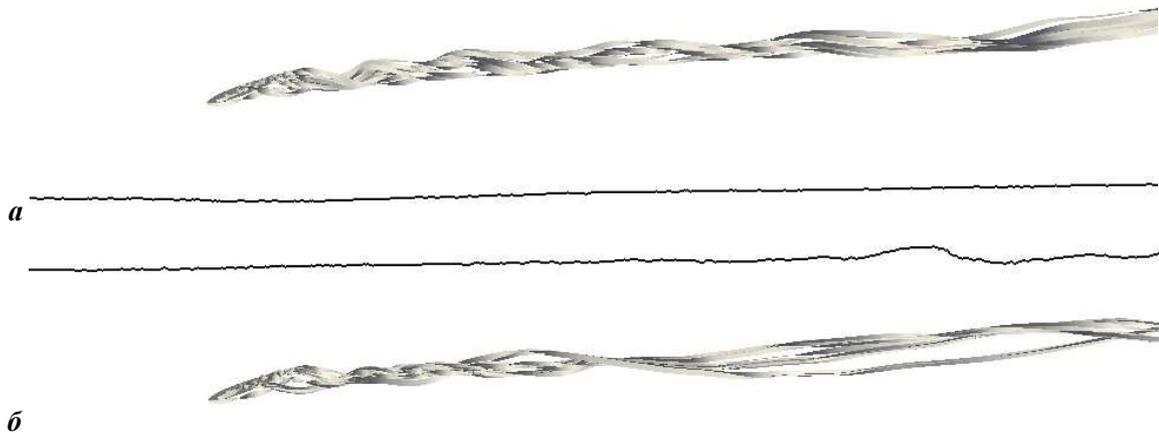


Рис. 6. Структура потока за крылом, движущимся над (а) и под (б) пикноклином при  $\alpha = -20^\circ$ , значениях числа Рейнольдса (Re) и внутреннего числа Фруда (Fr), равным  $6.9 \cdot 10^6$  и 34.4 соответственно.

Весьма сложным для исследования и анализа является течение, создаваемое при движении объекта внутри слоя переменной плотности. На рис. 7 дана компьютерная картина развития следа за эллипсоидом вращения удлинения б, движущегося внутри скачка плотности под различными углами атаки.

При малых углах атаки смешение слоев стратифицированной жидкости между собой практически отсутствует (рис. 7, а). В поле плотности наблюдаются возмущения, которые могут быть отождествлены со случайными внутренними волнами, порожденными турбулентными вихрями. По мере увеличения угла  $\alpha$  слои жидкости начинают перемешиваться между собой, вихревое движение жидкости становится более развитым (рис. 7, б). При больших углах атаки превалируют процессы смешения, отрыв и вихревой характер движения жидкости (рис. 7, в). Поле плотности в ближнем следе стремится к однородности. Важно отметить, что при движении внутри пикноклины преобладают турбулентные эффекты в вызванном течении, тогда как при движении над и особенно под скачком плотности ярко выражены волновые эффекты.

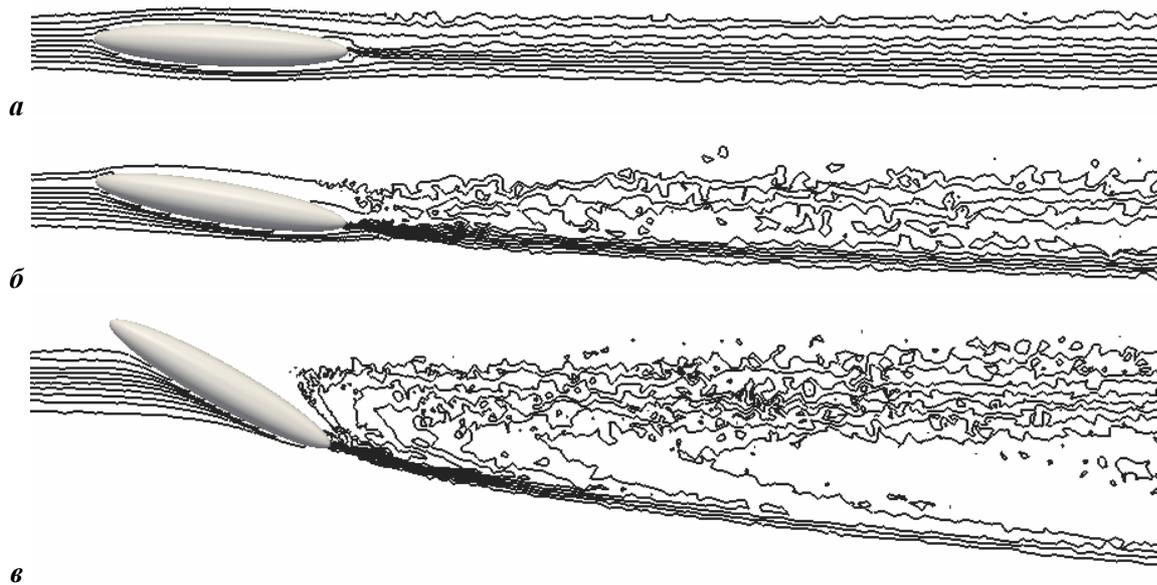


Рис. 7. Картины течения в диаметральной плоскости эллипсоида удлинения 6 при углах атаки  $3^\circ$  (а),  $10^\circ$  (б),  $30^\circ$  (в) и значениях числа Рейнольдса, а также внутреннего числа Фруда соответственно:  $Re = 0.7 \cdot 10^6$ ,  $Fr = 208.9$ .

Анализ приведенных выше, а также не вошедших в настоящую статью достаточно многочисленных результатов компьютерного моделирования в гидродинамическом анализе (монография, статьи, сайты) показывает возможность использования самого современного метода моделирования для решения актуальных практических задач кораблестроения. Созданные модели и программное обеспечение дают реальную возможность прогнозировать интегральные, распределенные и полевые гидродинамические характеристики объектов реальной формы с учетом различных физических факторов в их взаимодействии. Для решения наиболее сложных физических задач эффективным остается совместное применение методов и моделей как численного, так и физического эксперимента.

В ближайшей перспективе можно надеяться на возрастание возможностей вычислительной гидромеханики, связанных в первую очередь с ростом производительности компьютеров и расширением их применения. Повышение производительности обеспечит применение более адекватных моделей течений, например турбулентных, – переход от широко используемого сейчас моделирования на основе уравнений Рейнольдса с замыкающими их полуэмпирическими моделями турбулентности, сначала – к использованию дополнительно к этим уравнениям дифференциальных уравнений для турбулентных напряжений, а затем – к уравнениям метода крупных вихрей.

Второй тенденцией должно стать все более широкое использование мультидисциплинарного подхода, обеспечивающего моделирование в одной модели всех определяющих физических процессов решаемой задачи. Примеров такого подхода в мире уже достаточно. Он широко используется в авиа-, автомобиле- и машиностроении, в частности энергомашиностроении, и ряде других. Например, при проектировании летательных аппаратов мультимедийное моделирование обеспечивает прочностной анализ и оптимизацию конструкции аппарата, его агрегатов и узлов; моделирование аэроупругости на дозвуковых и сверхзвуковых режимах полета, анализ термонагруженности, исследование живучести в аварийных ситуациях, а также проектирование и расчет конструкций из композиционных материалов и ряд других. К сожалению, в отечественном кораблестроении методы компьютерного моделирования применяются не столь широко.

Для успешного внедрения современных методов инженерного анализа в кораблестроении необходимо совместное решение трех основных задач: 1) разработка математического и программного обеспечения; 2) создание суперкомпьютерного центра кораблестроения; 3) подготовка высококвалифицированного персонала.

Решение этих задач потребует объединения усилий отраслевых институтов и конструкторских бюро, организаций РАН, компьютерных фирм и профильных вузов. Результатом должно стать создание компьютерной среды «Виртуальный корабль» – системы математического моделирования, реализующей принципы и методы PLM-технологий (управление жизненным циклом изделий от проектирования до утилизации) для различных объектов морской техники – надводных и подводных кораблей и аппаратов, плавучих платформ, морского оружия и т.д. Важным шагом на пути создания этой компьютерной среды должен стать комплекс гидродинамического анализа «Виртуальный бассейн». Комплекс должен обеспечивать решение задач гидродинамического проектирования корабля всех уровней сложности (исследовательских и прикладных), включая задачи динамики и гидрофизических полей. Его внедрение позволит перейти к принципиально новой технологии проектирования морских объектов, основанной на компьютерном исследовании всех их параметров еще на стадии разработки, при минимальной роли физического эксперимента, а в пределе – и без него.

#### Литература

1. Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В. Компьютерные технологии в корабельной гидромеханике. СПб.: Военно-морской инженерный институт (филиал) ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им.Н.Г.Кузнецова», 2010. 326 с.
2. Климантович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса: новый подход к статистической теории открытых систем / Изд. 2-е. М.: КомКнига, 2007. 328 с.
3. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
4. [www.saec.ru/starcad\\_series](http://www.saec.ru/starcad_series).
5. Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В. Моделирование гидродинамических реакций, действующих на подводные объекты методами вязкой и невязкой жидкости // Тр. НТК «Проблемы мореходных качеств судов и корабельной гидромеханики». XLI Крыловские чтения. СПб., 2003.
6. Kim S-E., Niyredy R. Assessment of Turbulence Models for Stern and Wake Flow Past a Modern VLCC Hull Form // Fluent TECHNICAL NOTES TN115, 2000.
7. Аксенов А.А., Шмелев В.В., Печенюк А.В., Станков Б.Н., Пасечник В.Г. Гидродинамический анализ судна в программном комплексе FlowVision // Рациональное управление предприятием. 2007. № 3.
8. Guriev U.V., Rodionov A.A. Dynamics of submarine objects in complicated hydro physical conditions // Int.Conf. on Subsea Technologies, 25–28 June 2007, St.-Petersburg, Russia.
9. Якушенко Е.И., Гурьев Ю.В. Бортовой информационно-измерительный комплекс – перспективное решение задач обеспечения скрытности и защиты морских объектов // Пятая междуна. конф. «Военно-морской флот и судостроение в современных условиях». 25–26 июня 2009, Санкт-Петербург, Россия.
10. Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В., Слуцкая М.З. Моделирование обтекания тел вращения потоком стратифицированной жидкости на основе метода крупных вихрей // Сб. науч. тр. «Фундаментальная и прикладная гидрофизика». 2008. № 1. СПб.: Наука, 2008.
11. Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В. Структура течения за погруженным телом вблизи пикноклина // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2010. № 1.
12. Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В., Якушенко Е.И. Влияние жидких границ на обтекание крыла малого удлинения //Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2011. № 4.

Статья поступила в редакцию 26.05.2009 г.

