

УДК 532.517

Ю.В.Гурьев¹, М.З.Слуцкая¹, И.В.Ткаченко²

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Обоснована актуальность создания морских тренажеров нового типа для решения исследовательских и проектных задач. Обсуждены гидродинамические проблемы их разработки и показаны перспективные направления решения, основанные на методах вычислительной гидродинамики. Приведены примеры математического и программного обеспечения для прогнозирования гидродинамических характеристик, необходимых для тренажеров нового типа..

Использование морских тренажеров является в настоящее время эффективным средством подготовки и поддержания высокого уровня профессионального мастерства моряков и специалистов береговых служб обеспечения. Очевидным достоинством практического применения тренажеров является сокращение затрат на подготовку и переподготовку специалистов, уменьшение рисков аварий и катастроф в процессе обучения, возможность создания различных условий плавания, в том числе и экстремальных.

Современные морские тренажеры представляют собой сложные компьютерные системы с программным обеспечением, основанным на математических моделях различной степени сложности и адекватности. Степень адекватности (соответствия) реальным процессам в решающей степени определяется совершенством этих моделей и производительностью компьютеров. Существуют и используются как гражданские, так и военные морские тренажеры. Основное их отличие состоит в более жестких требованиях по адекватности, предъявляемых к военным образцам. Эти тренажеры могут моделировать работу как отдельных систем, устройств и установок, так и корабля в целом, а также корабельных соединений при их взаимодействии с самолетами, вертолетами и другой боевой техникой. Создаются так называемые комплексные тренажеры, на которых можно тренироваться практически всем корабельным специалистам.

Для эффективности тренажеров огромную роль играют системы визуализации, создающие визуальную картину моря со всеми объектами, кораблями-целями, условиями видимости и освещения обстановки. Так называемые продвинутые тренажеры могут создавать единую тренировочную среду с многоканальной системой визуализации, интерактивными 3D сценами, с отображением реальной акватории и рельефа морского дна, математическими моделями кораблей и иных наземных, надводных и воздушных объектов. Такие тренажеры могут иметь модульную систему, позволяющую оперативно менять условия плавания, сам объект и окружающую обстановку. В ряде тренажеров могут быть заданы различные погодные условия, отражающиеся не только на движении корабля, но и на работе его навигационных систем.

При всей развитости современных морских тренажеров практически все они ориентированы на подготовку специалистов в области эксплуатации морской техники и, как следствие, имитируют функционирование уже действующих образцов. Вместе с тем, существует объективная необходимость в создании нового типа морских тренажеров для

¹ Военно-морской инженерный институт (Санкт-Петербург)

² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (Санкт-Петербург)

© Ю.В.Гурьев, М.З.Слуцкая, И.В.Ткаченко, 2008

решения исследовательских и проектировочных задач. Такой тренажер должен обладать принципиально новыми свойствами и возможностями, например, такими как:

- имитация работы проектируемых морских объектов, существующих только в виртуальном пространстве;
- прогнозирование физических и технических характеристик разрабатываемых объектов;
- моделирование, исследование и управление физическими процессами, связанными с функционированием морских объектов, включая физические поля;
- решение оптимизационных задач проектирования и др.

Работая на таком тренажере, создатели новой техники – инженеры, проектанты, ученые – смогут получать информацию как о внешней, наблюдаемой со стороны, реакции объекта на различные управляющие воздействия или изменение внешних условий, так и о внутренних процессах в системах и конструкциях объекта, о его воздействии на окружающую среду. Новый тренажер должен обеспечить оперативную проверку эффективности инновационных технических и научных решений, снизить сроки и стоимость процесса проектирования, поднять технический и эксплуатационный уровень морских объектов.

Создание таких тренажеров предполагает существенное повышение требований к их математическому обеспечению и качественное расширение его состава. Математические модели тренажеров для обучения, как правило, не универсальны, имитируют отдельные функции конкретного объекта и при переходе к другому объекту требуют модернизации или замены. Эти модели могут быть приближенными, а в ряде случаев не иметь под собой содержательной физической модели и являться лишь «черным ящиком» с соответствующим входным и выходным сигналами. Кроме того, такие модели часто не замкнуты, т.е. требуют дополнительных данных, получаемых с помощью физического эксперимента. У разработчиков учебных тренажеров такие данные, как правило, есть, поскольку они имеют дело с уже построенными или спроектированными объектами.

При создании новой техники не замкнутость математических моделей может стать принципиальной проблемой, так как экспериментальное получение необходимых данных, особенно на начальных этапах проектирования, когда существуют различные варианты конструктивных решений как объекта в целом, так и его отдельных элементов, представляется, по известным причинам, практически невозможным.

В некоторых случаях недостающие данные получают с помощью приближенных (инженерных) моделей и расчетных методов. Однако в подавляющем большинстве случаев эти методы полуэмпирические и обеспечивают оценку искомых параметров для схематизированных условий и конструктивных решений. Кроме того, инженерные модели, как правило, линейны и позволяют приближенно предсказать только интегральные характеристики, тогда как для эффективного решения задач проектирования требуется получение и исследование более полной и подробной информации об объекте.

В этой ситуации реальной альтернативой могут и должны стать методы математического моделирования, описывающие не только функционирование объекта, но также и протекающие физические процессы и явления. Обязательным требованием к таким моделям должно быть условие их замкнутости, что позволит обеспечить работу тренажера при наличии только основных данных по геометрии конструкции, параметрам систем и физическому состоянию среды.

Разработка комплексных тренажеров для проектирования морской техники требует привлечения широкого круга специалистов в различных предметных областях. Обсуждение спектра проблем их создания выходит за рамки настоящей статьи, в которой будут рассмотрены вопросы, связанные с гидродинамическими аспектами разработки тренажеров для имитации управляемого движения морских объектов. Этот процесс является общим практически для всех морских тренажеров.

Постановка задачи динамики морских объектов и теоретические методы прогнозирования гидродинамических реакций. Математические модели движения (динамики) технических объектов, включая и морские объекты, основаны на шести дифференциальных уравнениях пространственного движения твердого тела [1], дополненных уравнениями кинематических связей. Запишем эти уравнения в связанной с объектом системе координат, начало которой поместим в центр масс объекта – точку G , продольную ось Gx_1 направим в нос, ось Gy_1 , лежащую в диаметральной плоскости, – вверх, а поперечную ось Gz_1 – на правый борт объекта. При совпадении этих осей с главными центральными осями инерции объекта уравнения движения принимают наиболее простой вид

$$\left. \begin{aligned} m \frac{dV_{x1}}{dt} + m(\omega_{y1}V_{z1} - \omega_{z1}V_{y1}) &= F_{x1}; & m \frac{dV_{y1}}{dt} + m(\omega_{z1}V_{x1} - \omega_{x1}V_{z1}) &= F_{y1}; \\ m \frac{dV_{z1}}{dt} + m(\omega_{x1}V_{y1} - \omega_{y1}V_{x1}) &= F_{z1}; \\ J_{xx} \frac{d\omega_{x1}}{dt} + (J_{zz} - J_{yy})\omega_{z1}\omega_{x1} &= M_{x1}; & J_{yy} \frac{d\omega_{y1}}{dt} + (J_{xx} - J_{zz})\omega_{x1}\omega_{z1} &= M_{y1}; \\ J_{zz} \frac{d\omega_{z1}}{dt} + (J_{yy} - J_{xx})\omega_{x1}\omega_{y1} &= M_{z1}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где V_{x1}, V_{y1}, V_{z1} и $\omega_{x1}, \omega_{y1}, \omega_{z1}$ – проекции поступательной и угловой скоростей объекта на соответствующие оси связанной системы; m, J_{xx}, J_{yy} и J_{zz} – соответственно масса и моменты инерции объекта относительно продольной, вертикальной и поперечной осей; $F_{x1}, F_{y1}, F_{z1}, M_{x1}, M_{y1}, M_{z1}$ – проекции главного вектора и главного момента внешних сил на соответствующие оси координат. В эти проекции входят гидростатические и гидродинамические реакции, возникающие на корпусе, органах управления, стабилизации и движения (например, гребной винт), а также выступающих частях объекта.

Для рассматриваемых задач интегрирование записанной системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений может быть выполнено только численно. Эта процедура хорошо отработана и успешно реализуется на любом современном компьютере при условии, что известны правые части уравнений, в первую очередь, гидродинамические реакции – силы и моменты. Проблема их определения остается одной из «вечных» проблем гидродинамики, над решением которой бьется уже не одно поколение ученых и инженеров.

В общем случае требуется определить гидродинамические реакции, действующие на объект сложной формы при пространственном неустановившемся движении под действием движителя и органов управления в реальных гидрометеорологических и гидрофизических условиях (течения, внутренние волны, неоднородные поля плотности и температуры, сложная геометрия дна и т.п.). До настоящего времени такая задача в строгой постановке с позиций теоретического решения даже не рассматривалась. Однако для создания тренажера-проектанта необходимо обеспечить ее решение. Возможно ли это с помощью существующих и практически используемых методов? Для ответа на этот вопрос проведем краткий анализ методов прогнозирования гидродинамических реакций, применяемых в науке о динамике и гидродинамике корабля, – в теории корабля, уделив основное внимание теоретическим методам.

В теории корабля задача определения гидродинамических сил в той или иной постановке решается в трех динамических разделах: ходкости, качке и управляемости. В каждом из них используются свои допущения и ограничения как на законы движения корабля, так и на характер течения и свойства жидкости [2, 3]. Уже одно это говорит о том, что

существующие подходы не универсальны и не обеспечивают решения рассматриваемой задачи в полном объеме.

Общей для всех этих разделов является гипотеза о независимости (разделении) сил различной физической природы, допускающая разложение главного вектора и главного момента гидродинамических реакций на три независимые составляющие – инерционную, вязкую и волновую. Их определение может быть выполнено независимо друг от друга и с помощью различных методов: теоретических, экспериментальных и их комбинации. Приближенность такого подхода очевидна. Его использование было оправдано тем, что полуэмпирические методы, построенные на его основе, во многих случаях обеспечивали приемлемые для практики результаты. К тому же следует признать, что до последнего времени реальной альтернативой использованию этой гипотезы не существовало.

Определенным развитием этой гипотезы можно считать раздельное определение гидродинамических реакций на различных частях объекта – корпусе, выступающих частях, движителе и т.д. Для учета эффекта гидродинамического взаимодействия применяются поправочные коэффициенты, получаемые, как правило, экспериментально.

Второй широко используемой гипотезой является гипотеза стационарности (квазистационарности) применяемая, главным образом, при определении вязких сил и волнового сопротивления. Силы инерционной природы находят без привлечения этой гипотезы. Согласно гипотезе стационарности для медленно изменяющихся процессов, к числу которых можно отнести и некоторые маневры корабля, например, выход и движение на циркуляции, гидродинамические реакции можно определять по мгновенным значениям кинематических параметров, например, угла дрейфа, пренебрегая нестационарностью движения объекта и вызванного течения, т.е. полагая эти параметры постоянными.

Перейдем к рассмотрению методов нахождения гидродинамических реакций в различных разделах теории корабля. В разделе сопротивление движению корабля (первый подраздел ходкости) определяют, как следует из названия, только одну составляющую гидродинамических реакций – сопротивление движению со стороны воды и воздуха. При этом полагают, что корабль движется с постоянной скоростью по или вблизи гладкой свободной поверхности. (Влияние волнения учитывают приближенно с помощью введения дополнительной силы). В теории корабельных движителей (второй подраздел ходкости) определению подлежит тяга движителей, например, упор гребного винта. Для задач проектирования ее определяют по данным модельных экспериментов.

Силу сопротивления движению воды разделяют на две главные составляющие – вязкостное и волновое сопротивление. Вязкостное сопротивление, возникающее при любых движениях морских объектов, определяется в настоящее время методами физического эксперимента. Основной и практически неразрешимой его проблемой остается масштабный эффект по критерию Рейнольдса (Этот критерий для модели, по крайней мере, на порядок меньше его натуральных значений). Существующие расчетные инженерные методики являются полуэмпирическими и носят приближенный, оценочный характер [2].

При нахождении волнового сопротивления могут быть использованы методы как физического, так и математического моделирования. Математические модели основаны на предположении о том, что жидкость является невязкой, а вызванное течение – потенциальным (безвихревым). Они остаются в основном линейными, пригодными для расчетов движения с малыми числами Фруда. Главным их недостатком является недостаточная точность определения волнового сопротивления. Известные попытки построения нелинейных моделей также не обеспечивают необходимой точности прогнозирования [22, 23].

В теории качки также исследуется прямолинейное движение, но в условиях взволнованной поверхности. Рассматриваются модели регулярного и нерегулярного морского волнения. Определению подлежат не все гидродинамические реакции, а только дополнительные силы, вызванные волнением и колебаниями корабля и непосредственно влияю-

щие на его качку, в первую очередь, на ее основные виды – вертикальную, бортовую и килевую. Здесь также используют потенциальную модель течения, учитывая в отдельных случаях влияние вязкости, например, при определении момента крена, с помощью эмпирических поправок.

В теории качки основные практические результаты получены в линейном приближении, когда малыми считают скорости движения корабля и жидкости, а также амплитуды колебаний корабля и вызванных волн. В последние годы появилось немало работ, в которых гидродинамические реакции определяются в нелинейной постановке [24, 25], однако и в этом случае используются существенные упрощения задачи, в частности, широко используется метод плоских сечений (двумерная модель).

В наиболее полном объеме гидродинамические реакции определяются в разделе управляемость, в которой изучается движение корабля по криволинейной траектории под действием управляющих и внешних воздействий. Однако проблема теоретического нахождения этих реакций в этом разделе теории корабля разработана даже слабее, чем в двух ранее рассмотренных. Еще академик А.Н.Крылов отмечал [4]: «...при настоящем состоянии знаний [эти реакции] могут быть установлены при весьма произвольных допущениях, вследствие этого решения уравнений, которые нетрудно получить с помощью этих допущений, едва ли могут иметь практическое значение». С тех пор радикального изменения в развитии прикладных теоретических методов их определения не произошло. Так, в современном издании энциклопедии машиностроения [3] отмечается: «Исследования управляемости базируются на экспериментальных данных по маневренности и гидродинамическим силам, получаемым в соответствующих лабораториях и при эксплуатации натуральных судов. Это коренным образом выделяет управляемость среди других вопросов теории корабля (статика, качка, ходкость), при изучении которых существенную роль играют теоретические способы». Таким образом, и в этом разделе теории корабля теоретические методы определения гидродинамических сил развиты совершенно недостаточно.

Следует также отметить, что в этих методах, как правило, рассматривают движение объекта в идеализированных условиях покоящейся и однородной жидкости или постоянного течения (за исключением качки), при отсутствии внутренних волн и границ потока, тем более границ нерегулярных, и т.д. В реальных морских условиях все эти дополнительные факторы могут оказать заметное влияние на динамику объекта.

Математические модели динамики и гидродинамики морских объектов в задачах проектирования. Рассмотрим современные модели динамики и гидродинамики морских объектов, используемые для решения задач проектирования, на примере одной из наиболее полных таких моделей – модели «Динамика» (ЦКБ МТ «Рубин») [6, 7]. В ней, основываясь на гипотезе независимости сил, главный вектор и главный момент внешних сил системы (1) разделяют на ряд составляющих. На первом шаге реакции делят на гидростатические и гидродинамические. Теоретическое определение гидростатических составляющих не вызывает принципиальных затруднений и проводится с учетом таких факторов, как обжатие корпуса и изменение плотности воды под действием гидростатического давления, а также за счет изменения балласта. Гидродинамические реакции представляют в виде суммы инерционной, вязкой и волновой компонент. Сила тяги винта также учитывается отдельно.

Инерционные реакции находят с помощью хорошо известного метода присоединенных масс. Основным его преимуществом является независимость присоединенных масс от кинематических параметров движения объекта, что дает возможность для данной его формы определить эти массы раз и навсегда. Указанное обстоятельство радикально упрощает вычисление инерционных сил, которые определяются с учетом нестационарности процесса на каждом шаге интегрирования уравнений движения по мгновенным значениям кинематических параметров – скоростей и ускорений.

Для теоретического определения этих масс приходится вводить новые допущения о том, что жидкость является невязкой, а вызванное течение – потенциальным. Несмотря на упрощения, теоретическое нахождение присоединенных масс для тел корабельной формы не является тривиальной задачей. Строгое аналитическое решение удастся получить для простейших тел: круга, эллипса, шара, эллипсоида. Поэтому на практике до сих пор широко используются приближенные аналитические методы (плоских сечений, эквивалентного эллипсоида), а также метод электромагнитной аналогии (ЭГДА) [5]. В модели «Динамика» эти величины считаются известными, что вынуждает применять внешние методы расчета присоединенных масс и делает уже на этом этапе модель незамкнутой.

Вязкие реакции в этой модели определяют для движения объекта в безграничной покоящейся и однородной жидкости и разделяют на две части. Первая – это силы и моменты, действующие на корпус с оперением и выступающими частями, вторая – реакции на рулях объекта, зависящие от углов перекаладки. Для их представления используются общие формулы гидродинамики:

$$R_i = c_i \frac{\rho V^2}{2} W^{2/3}, \quad M_i = m_i \frac{\rho V^2}{2} W, \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкости; $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$ – модуль поступательной скорости движения объекта; W – его объемное водоизмещение.

Входящие в (2) безразмерные коэффициенты вязких сил c_i и моментов m_i ($i = x, y, z$ – оси скоростной системы координат) для объекта заданной формы являются функциями кинематических параметров движения и критериев подобия. При принятых условиях нахождения вязких сил определяющим критерием остается число Рейнольдса. Установлено, что для большинства коэффициентов, кроме коэффициента сопротивления c_x и в определенной мере коэффициента момента крена m_x , наблюдается явление автомодельности по этому критерию, если $Re > 10^6$. Эти значения в экспериментах достигаются. На этом основании экспериментальные коэффициенты поперечных сил, моментов рысканья и дифферента переносятся на натуру практически без изменений. Для коэффициента сопротивления разработана приближенная процедура пересчета [2].

Однако даже в условиях автомодельности существует проблема получения значений коэффициентов в необходимом объеме и переноса полученных результатов в расчетную модель. Пусть, например, безразмерный коэффициент c_y зависит от пяти кинематических параметров: углов атаки α , дрейфа β и проекций угловой скорости $\omega_x, \omega_y, \omega_z$. Тогда его значения заполняют некоторую область шестимерного пространства $\{c_y, \alpha, \beta, \omega_x, \omega_y, \omega_z\}$, каждая точка которого соответствует величине коэффициента при конкретных значениях кинематических параметров. Экспериментальное определение силовых коэффициентов во всем реальном диапазоне изменений кинематических параметров представляет собой практически неразрешимую задачу. Эксперименты позволяют заполнить только некоторую ограниченную часть этой области, причем в дискретных точках, что требует выполнения дополнительной процедуры аппроксимации для получения необходимых значений коэффициентов в промежуточных точках. Таким образом, существующие экспериментальные методы не обеспечивают полной информации для определения силовых коэффициентов во всей области изменения кинематических параметров.

Аппроксимационные зависимости для силовых коэффициентов получают, в основном, двумя путями: либо с помощью процедуры разложения в ряды по кинематическим параметрам, либо с помощью полиномиальной аппроксимации экспериментальных кривых. На практике могут быть использованы различные варианты разложений, зависящие, в том числе, и от принятых допущений. Например, при выборе в качестве основных кинематических параметров углов атаки α и дрейфа β и проекций угловой скорости $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ можно использовать следующие зависимости:

матических параметров углов атаки, дрейфа, перекладки рулей δ и проекций безразмерной угловой скорости коэффициенты сил можно представить так:

$$c_i(\alpha, \beta, \delta, \bar{\omega}_x, \bar{\omega}_y, \bar{\omega}_z) = c_i(0) + c_i^\alpha \cdot \alpha + c_i^\beta \cdot \beta + c_i^\delta \cdot \delta + c_i^{\bar{\omega}_x} \cdot \bar{\omega}_x + \dots + c_i^{\alpha\beta} \cdot \alpha \cdot \beta + c_i^{\alpha\delta} \cdot \alpha \cdot \delta + c_i^{\alpha\bar{\omega}_x} \cdot \alpha \cdot \bar{\omega}_x + \dots + c_i^{\alpha\alpha} \cdot \alpha^2 + c_i^{\beta\beta} \cdot \beta^2 + c_i^{\delta\delta} \cdot \delta^2 + c_i^{\bar{\omega}_x\bar{\omega}_x} \cdot \bar{\omega}_x^2 + \dots \quad (3)$$

В эту формулу введены величины с верхним и нижним индексом, называемые гидродинамическими производными:

$$c_i^\alpha = \frac{\partial c_i}{\partial \alpha}; \quad c_i^\beta = \frac{\partial c_i}{\partial \beta}; \quad c_i^{\alpha\alpha} = \frac{\partial^2 c_i}{\partial \alpha^2}; \quad c_i^{\alpha\bar{\omega}_x} = \frac{\partial^2 c_i}{\partial \alpha \partial \bar{\omega}_x}; \quad \dots$$

При практическом использовании разложений (3) по изложенным выше причинам приходится ограничиваться конечным, и причем небольшим, числом членов ряда. Если в таком разложении остаются только члены, содержащие первые степени кинематических параметров, то полученная модель называется линейной, а если там содержатся члены более высоких степеней – нелинейной. В линейной модели происходит строгое разделение слагаемых, а, следовательно, и определяемых ими гидродинамических реакций, на так называемые позиционные и вращательные составляющие. Позиционные определяют гидродинамические реакции, возникающие при поступательном движении объекта, а вращательные, называемые также демпфирующими, – при его вращении.

В модели «Динамика» в качестве кинематических параметров приняты проекции поступательных и угловых скоростей, а для получения текущих значений коэффициентов между их дискретными значениями используется аппроксимирующие полиномы первой и второй степени. Например, для коэффициента подъемной силы применяется зависимость $c_y = a_y \cdot \bar{V}_y + b_y \cdot \bar{V}_y^2$, где a_y и b_y - коэффициенты аппроксимации, $\bar{V}_y = V_y/V$. Для сил и моментов, обусловленных работой рулей, используется аналогичное представление по углам перекладки каждой пары рулей.

Гидродинамические силы волновой природы разделяют на две составляющие, которые определяют раздельно. Первая из них обусловлена затратами энергии на создание собственной (корабельной) волновой системы, а вторая возникает за счет воздействия морского, в общем случае, нерегулярного ветрового волнения. Для их определения используют полуэмпирический подход.

В работе [7] гидродинамические модели «Динамики» расширены за счет учета одного из важнейших гидрофизических условий, влияющих на динамику морских объектов, – неоднородности плотности воды (пикноклин) по глубине и возникающих вследствие этого внутренних волн. Приближенная модель такого учета была предложена в работах [9, 11]. Она основана на линейной теории качки корабля и ряде упрощающих предположений, связанных со структурой поля плотности и моделью внутреннего волнения. Это неоднородное по глубине поле приближенно описывается с помощью двухслойной модели, в которой изменение плотности происходит скачкообразно на величину $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$ (где ρ_1 и ρ_2 - плотности жидкости соответственно над и под пикноклином) на средней по глубине плоскости пикноклина. Внутреннее волнение моделируется одномодовой волной, создающей колебания жидкости по косинусоидальному закону [10].

Метод определения силового воздействия внутренних волн на объект основан на основных положениях линейной теории качки Крылова-Хаскинда, в которой гидродинамические реакции представляются в виде суммы (суперпозиции) трех составляющих: главной (крыловской) части, инерционно-демпфирующих и дифракционных реакций.

Относительно просто могут быть определены главные части возмущающих сил. Для этого необходимо проинтегрировать по смоченной поверхности объекта давления, создаваемые волной, при условии, что эта поверхность проницаема. Эта процедура требует

достаточно точного математического описания поверхности корпуса, и, по-видимому, по этой причине в работе [9] для вычисления этих реакций используются приближенные алгебраические формулы.

Инерционно-демпфирующие реакции, обусловленные движением, в том числе колебаниями объекта вблизи невозмущенного скачка плотности, в модели [7, 11] не рассматриваются, а для дифракционных составляющих применяются приближенные подходы теории качки корабля под действием поверхностного волнения.

Расчетные формулы для инерционной части дифракционных реакций основаны на использовании значений присоединенных масс объекта в безграничной жидкости и значений соответствующих проекций главных частей возмущающих сил. Отсутствие строго теоретического обоснования такого подхода и его приближенный характер очевиден. Для расчета демпфирующих составляющих дифракционных сил и моментов используются полуэмпирические зависимости.

Рассматривая модели динамики морских объектов других авторов [8, 9], можно заметить их принципиальное сходство. Некоторое отличие существует в модели [9]. В ней предпринята попытка расширить область применения математического моделирования для прогнозирования вязких гидродинамических реакций. Авторы этой работы, полагая, что мощь современных компьютеров недостаточна для решения этой задачи методами непосредственного моделирования течений вокруг морских объектов, предлагают использовать циркуляционно-отрывную теорию, предложенную К.К.Федяевским в середине прошлого века. К достоинствам этой теории следует отнести адекватную физическую модель обтекания удлиненных тел под углами атаки. Однако ее практическое применение затруднено тем, что эта модель является незамкнутой и требует дополнительных экспериментальных данных. Кроме того, получаемые с ее помощью результаты в ряде случаев заметно расходятся с опытными данными.

Тем не менее, в [9] используют эту модель, применяя гипотезу плоских сечений и базу экспериментальных данных о коэффициентах сопротивления цилиндров бесконечного удлинения с различной формой поперечного сечения и расчетные данные о присоединенных массах этих сечений. Применение этой устаревшей модели с известными недостатками в наше время представляется неоправданным.

Важно подчеркнуть, что рассмотренные модели и методы позволяют прогнозировать только суммарные гидродинамические характеристики – силы и моменты. Определение распределенных характеристик и физических полей, описание структуры и особенностей течения остается за рамками этих моделей.

Выполненный анализ теоретических методов прогнозирования гидродинамических реакций позволяет сделать следующие выводы:

- практическое определение этих реакций выполняется на основе полуэмпирических и эмпирических методов, позволяющих находить только суммарные реакции путем суперпозиции отдельных составляющих без учета их взаимного влияния;
- эти методы основаны на упрощающих гипотезах и допущениях, излишней схематизации течений и не обеспечивают учет реальных гидрофизических условий;
- экспериментальные методы позволяют получить далеко неполную базу данных о гидродинамических коэффициентах, а получаемые на ее основе аппроксимационные описывают только часть области их изменения;
- отдельные попытки разработки теоретических (инженерных) методов базируются на устаревших и не замкнутых моделях, не имеющих перспективы развития;
- экспериментальная направленность существующих методов и перечисленные недостатки не позволяют применять их при создании тренажеров для решения исследовательских и проектировочных задач.

Следовательно, для создания математического и программного обеспечения морских тренажеров нового типа требуется разработка замкнутых математических моделей. В них с необходимой полнотой должны учитываться реальная геометрия и кинематика объекта, гидродинамические условия плавания, а также прогнозироваться не только суммарные, но и полевые гидродинамические характеристики.

Направления создания математических моделей для прогнозирования гидродинамических характеристик морских объектов. Указанное выше математическое и программное обеспечение может быть разработано на основе моделей и методов вычислительной гидродинамики (ВГД, или CFD – в англоязычной версии). Эти модели основаны на непосредственном решении уравнений движения жидкости и позволяют рассчитать не только интегральные гидродинамические характеристики, но и распределенные (скорости, давления, касательные напряжения и т.д.) в любой точке потока. В индустриально развитых странах методы ВГД уже широко используются в проектировании кораблей [25].

Для решения поставленной задачи можно применить две группы методов ВГД. Методы первой группы основаны на численном решении уравнений движения вязкой жидкости Навье-Стокса или их модификаций, а методы второй – на решении уравнений невязких течений, дополненных той или иной вихревой моделью для приближенного учета влияния вязкости среды. Методы первой группы можно назвать методами прямого моделирования вязкости жидкости, а методы второй группы – косвенного моделирования.

У каждой группы есть свои преимущества и недостатки, которые надо учитывать при их выборе для решения рассматриваемой задачи. Неотъемлемым качеством численного метода должна быть возможность определения искомых реакций на каждом шаге интегрирования уравнений движения объекта. Это накладывает принципиальные ограничения на время выполнения расчета, которое существенно различается у методов первой и второй группы. Методы второй группы по быстродействию на несколько порядков эффективней методов первой группы. С другой стороны, методы, основанные на моделях вязких течений, позволяют решать поставленную задачу в более полной постановке, с меньшим числом допущений и, следовательно, с большей степенью адекватности.

Рассмотрим подробнее эти методы и задачи, которые они могут решать при создании тренажеров для проектирования морских объектов.

Методы ВГД с косвенным учетом влияния вязкости. При движении объекта в реальной вязкой жидкости ее динамическое воздействие проявляется через давления p и касательные напряжения τ . Их суммарное воздействие сводится к главному вектору $\vec{R} = \vec{R}(p, \tau)$ и главному моменту $\vec{M} = \vec{M}(p, \tau)$ гидродинамических сил. Методы ВГД с косвенным учетом вязкости основаны на том, что для удлиненных тел большинство проекций \vec{R} и \vec{M} , за исключением силы сопротивления, формируются за счет гидродинамический давлений при незначительной роли касательных напряжений. Давления, в отличие от трения, действуют как в вязкой, так и невязкой жидкости (в невязкой жидкости $\tau = 0$). Однако их распределение в этих жидкостях по поверхности движущегося тела заметно отличается, что во многом определяется влиянием вихрей, возникающих в вязкой жидкости. Если же в невязкий поток ввести вихревые структуры, моделирующие такое влияние, то можно получить модель, позволяющую удовлетворительно прогнозировать большинство гидродинамических реакций.

Первые эффективные методы расчета гидродинамических реакций, основанные на таком моделировании, были созданы около ста лет назад в теории крыла. Однако область их применения ограничивается телами, имеющими плавно обтекаемую заднюю острую кромку. Такой характер обтекания позволил сформулировать дополнительное условие, известное как постулат Чаплыгина-Жуковского, дающее возможность определить параметры вихревой системы крыла и сделать модель замкнутой.

Для тел, отличных от крыльев, например, корпусов морских объектов, близких по форме к телам вращения, методы теории крыла оказались неэффективными. Для таких тел потребовалась разработка специальных методов, в которых учитывались бы особенности обтекания удлиненных тел без протяженной задней кромки. Начало их разработки было положено в работах Кармана и Джонса, а затем продолжено К.К.Федяевским, С.М.Белоцерковским, Л.Д.Волковым и др. Эти методы имели различную степень сложности, общим для них было наличие существенных упрощений и незамкнутость, что делает невозможным их применение при создании морских тренажеров нового типа.

Задача создания замкнутой модели расчета обтекания удлиненных тел была решена в работах [12-15]. Эта модель основана на методе гидродинамических особенностей и включает непрерывный слой источников-стоков (простой слой), расположенных на смоченной поверхности корпуса, и вихревую систему, моделирующую продольные вихри пограничного слоя, возникающие при поперечном обтекании. Введение вихревого слоя, расположенного вблизи поверхности корпуса в его кормовой оконечности, позволяет косвенно учесть влияние вязкости жидкости на распределение гидродинамических давлений.

В этой модели неопределенным параметром оставалась координата начала вихревой системы. В ходе численного эксперимента было установлено правило ее определения. Для тел без цилиндрической вставки в качестве начала вихревого слоя следует принять поперечное сечение максимальной площади, а для тел, имеющих такую вставку, – начало кормового заострения корпуса. Это условие позволило сделать предложенную модель замкнутой.

Разработанная вихревая модель включает две расчетные схемы: линейную, соответствующую обтеканию при малых углах атаки, и нелинейную, предназначенную для расчета течений при умеренных (до $16-20^{\circ}$) значениях этого угла. Линейная схема предполагает, что обтекание корпуса происходит без отрыва потока на подветренной его стороне, а траектории жидких частиц, по которым должны располагаться продольные вихри, незначительно отклоняются от меридиональных сечений корпуса.

Предложенная модель не использует гипотезу разделения гидродинамических сил, учитывает реальную геометрию корпуса и выступающих частей, а также их взаимодействие в жидкости, пространственный и нестационарный характер течения. Важным ее достоинством является возможность учета гидрофизических факторов, например, пикноклина и внутреннего волнения. Такое расширение было выполнено в работах [16, 17]. На основе предложенной модели была разработана программа «Hull-3D» и выполнены многочисленные тестовые расчеты, показавшие удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных результатов.

Методы ВГД, основанные на решении уравнения движения вязкой жидкости. В настоящее время в прикладной гидродинамике модели, основанные на уравнениях Навье-Стокса, считаются наиболее строгими математическими моделями вязких течений. Хотя существуют аргументы, ставящие под сомнение адекватность этих уравнений при изучении турбулентных течений, согласимся с теми, кто считает, что для решения задач корабельной гидродинамики эти уравнения могут быть использованы.

Существуют три основных подхода к решению задач динамики вязкой жидкости: прямое численное моделирование (DNS), метод крупных вихрей (LES), решение осредненных по времени уравнений Навье-Стокса – уравнений Рейнольдса (RANS); помимо них существуют различные гибридные подходы, основанные, как правило, на комбинировании основных методов.

Про первые DNS, теоретически наиболее точные методы, можно сказать, что прогнозы их практического использования для расчета натуральных течений совпадают с прогнозами овладения управляемой термоядерной реакцией по времени – это должно произойти лет через пятьдесят. Современный уровень производительности суперкомпьютеров поз-

воляет выполнять с их помощью решение модельных задач при значениях числа Рейнольдса на несколько порядков отстоящих от натуральных.

Методы LES и RANS позволяют выполнять расчеты натуральных течений, в том числе и в интересах кораблестроения, правда, при использовании самой производительной вычислительной техники. Оба подхода основаны на разделении масштабов течения на крупномасштабные и мелкомасштабные составляющие, то есть на ограничении числа степеней свободы турбулентного движения путем моделирования мелкомасштабной его части. В первом случае это осуществляется путем пространственной фильтрации, во втором – осреднением по временному интервалу.

Сравнивая эти методы с позиций практического применения, следует отметить, что методы, основанные на решении уравнений Рейнольдса, требуют меньшего времени для расчета, чем методы крупных вихрей, в которых прямым образом разрешается 80% энергии потока, что требует более детального сеточного разрешения. Однако последние точнее описывают нестационарные течения. Поэтому ряд задач может быть эффективно решен и теми и другими методами, а для решения некоторых, например, отличающихся значительной степенью нестационарности, методы LES могут обеспечить более адекватный прогноз. Особенно ярко преимущества метода крупных вихрей проявляются при исследовании распределенных характеристик – нестационарных гидродинамических полей, вихревых структур и др.

Для практической реализации этих методов создается специальное программное обеспечение - пакеты программ ВГД (в англоязычной терминологии CFD). Существуют два основных типа таких пакетов - коммерческие и университетские. Первые разрабатываются крупными корпорациями и специализированными фирмами и позволяют решать широкий круг задач, обладают большим набором математических моделей турбулентности, включают специальные программы построения расчетных сеток, обработки и анализа полученных результатов, развитый графический интерфейс и рабочую документацию. Примерами таких «тяжелых» пакетов являются зарубежные *Fluent*, *Star-CD*, *CFX* и др. Отечественные разработки, например, *FlowVision*, к сожалению, по своим возможностям пока уступают зарубежным, что связано, не в последнюю очередь, с нашим отставанием в использовании высокопроизводительных компьютерных систем.

Университетские пакеты, называемые также кодами, имеют более узкую направленность и позволяют решать существенно меньший круг задач, эти пакеты существенно хуже документированы, имеют менее развитый и дружелюбный интерфейс. Заметным преимуществом этих пакетов является гибкость, возможность оперативной модернизации и развития непосредственно авторами пакета, что делает их привлекательными при создании программного обеспечения морских тренажеров для решения проектировочных задач. Включение в состав такого обеспечения коммерческого пакета может создать серьезные трудности, например, при масштабировании задачи или решении специфических задач.

В качестве примера университетского пакета можно указать пакет FlowFES (Flow Finite-Element Simulator) [18], в котором помимо традиционных двухпараметрических RANS моделей турбулентности реализован метод крупных вихрей. Метод основан на интегрировании отфильтрованных (осредненных) по пространству уравнений Навье-Стокса, дополненных замыканием турбулентных (подсеточных) напряжений по модели Смагоринского. Как уже отмечалось выше, достоинством метода крупных вихрей является более точное определение нестационарных и турбулентных характеристик потока по сравнению с традиционными двухпараметрическими моделями турбулентности. Уравнения движения жидкости во FlowFES записаны в подвижной, связанной с телом системе координат, что дает возможность исследовать гидродинамику произвольно движущегося объекта. Решение системы дифференциальных уравнений в частных производных осуществляется конечно-элементным методом Галеркина-Петрова с линейным интерполяционным

базисом. В коде использован конечный элемент в форме тетраэдра, что позволяет проводить расчеты как на структурированных, так и неструктурированных расчетных сетках. Последнее имеет особо важное значение при моделировании тел произвольной формы, например, подводных объектов с выступающими частями. Метод имеет 2-й порядок точности аппроксимации по пространству. Интегрирование по времени производится с помощью явной и неявной схем расщепления. Для нахождения давления в коде применен проекционный метод, основанный на решении уравнения Пуассона для поправок давления, являющийся более современным по сравнению с SIMPLE алгоритмами, использующимися в большинстве коммерческих пакетов.

Основное достоинство программного обеспечения для непосредственного моделирования вязких течений состоит в принципиальной возможности учета всех факторов и особенностей поставленной выше задачи прогнозирования гидродинамических характеристик. Такое моделирование может стать полномасштабной альтернативой физическому эксперименту. Недостатком являются значительные затраты времени на вычисления, что не позволяет использовать эти пакеты в процессе интегрирования уравнений движения.

Примеры практического использования методов ВГД. Авторы настоящей статьи имеют опыт в создании математического и программного обеспечения, основанного на моделях прямого и косвенного учета вязкости жидкости, а также опыт применения одного из так называемых «тяжелых» гидродинамических пакетов *Fluent* для решения гидродинамических задач, актуальных при разработке тренажеров нового типа. Ниже приведены некоторые результаты компьютерного моделирования подобных задач.

На рис. 1 и 2 представлены расчеты различными методами гидродинамических реакций на корпусе дирижабля «Акрон», форма которого близка к форме некоторых морских объектов – тело вращения с относительным удлинением 6. Были определены безразмерные коэффициенты нормальной силы c_{y1} и продольного момента m_{z1} , отнесенные к скоростному напору и объемному водоизмещению в соответствующей степени, в диапазоне изменения угла атаки от 0 до 14°.

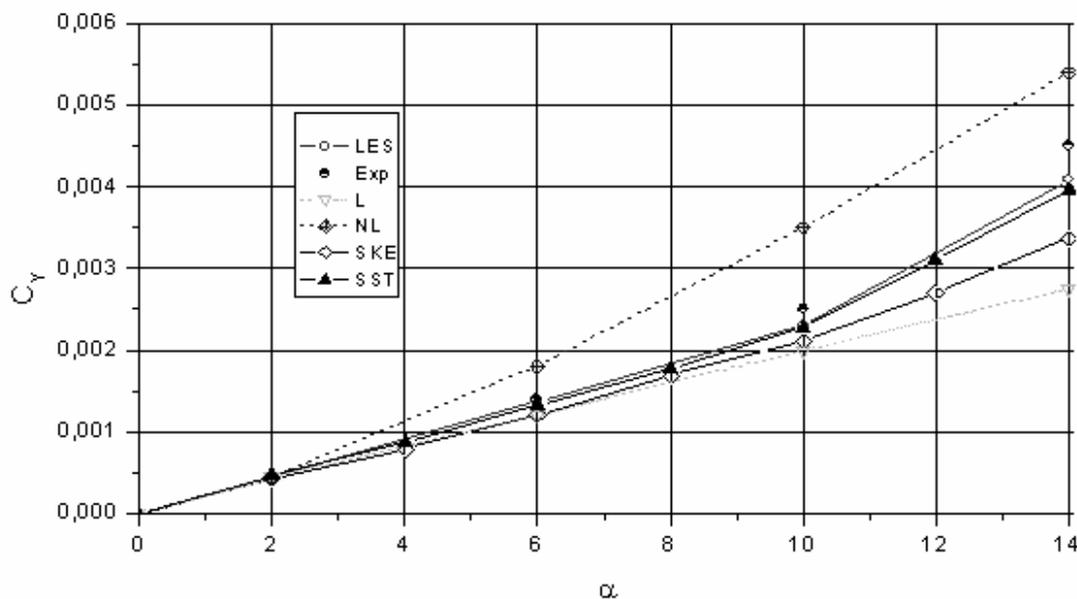


Рис. 1. Коэффициент нормальной силы дирижабля «Акрон» в зависимости от угла атаки: exp – эксперимент; LES и NL – метод LES и нелинейная вихревая модель [15]; SST и SKE – SST и «стандартная» k-е модель [20]

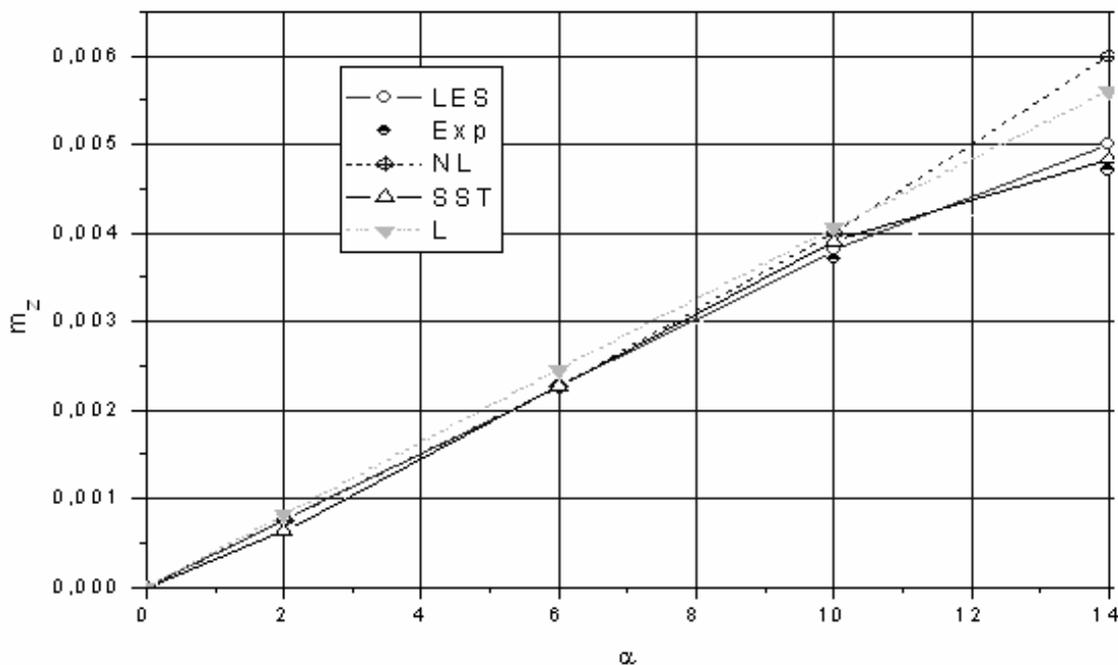


Рис. 2. Коэффициент продольного момента дирижабля «Акрон» в зависимости от угла атаки

Расчетные результаты получены с помощью программы «Hull-3D» при косвенном учете вязкости (L – линейная, NL – нелинейная схема обтекания корпуса), путем решения системы уравнений Рейнольдса (RANS) с применением двух моделей турбулентности («стандартная» k - ϵ модель (SKE) и SST модель Ф.Ментера) и методом крупных вихрей (LES). На этих же графиках дискретными точками нанесены результаты экспериментов в аэродинамической трубе. Анализ полученных результатов показывает, что модели, основанные на решении уравнений вязкого течения, дают достаточно близкие результаты, хорошо согласующиеся с экспериментом. Модель с приближенным учетом вязкости обеспечивает худшее согласование, особенно с ростом угла атаки даже при использовании нелинейной схемы. Тем не менее, все три метода ВГД можно рекомендовать для прогнозирования гидродинамических реакций морских объектов.

Выбор конкретного метода следует делать, в первую очередь, с учетом таких факторов, как требуемое компьютерное время для одного значения кинематических параметров, диапазон их изменения, геометрия объекта и некоторых других. Расчеты с помощью программы «Hull-3D» (приближенное моделирование вязкости) требуют для расчета при одном наборе значений кинематических параметров и в зависимости от выбора схемы обтекания (линейная или нелинейная) и сложности геометрии объекта от нескольких секунд до нескольких минут машинного времени ПК. Расчеты на основе решений уравнений Рейнольдса, выполненные с помощью пакета Fluent, проводились для половины корпуса, мощность сетки составляла 550000 конечных объемов. Расчеты с помощью пакета *FlowFES* были проведены на неструктурированной сетке, состоящей из двух миллионов расчетных ячеек – конечных элементов.

На рис. 3 представлена картина обтекания турбулентным потоком модели подводной лодки SUBOFF, представляющей собой тело вращения длиной 4.356 м диаметром 0.508, имеющей рубочное ограждение (профиль NACA 0014, относительное удлинение 0.27) и хвостовое оперение – горизонтальные и вертикальные стабилизаторы (профиль NACA 0018, относительное удлинение 1.2), полученная с помощью пакета *FlowFES* (метод LES). Эти результаты демонстрируют возможности моделирования отрывных течений, обра-

зующихся при этом вихревых структур и полей скоростей, давлений и касательных напряжений. Такая возможность позволяет проводить глубокий и наглядный анализ сложных течений, необходимый для научного обоснования принимаемых конструкторских решений.

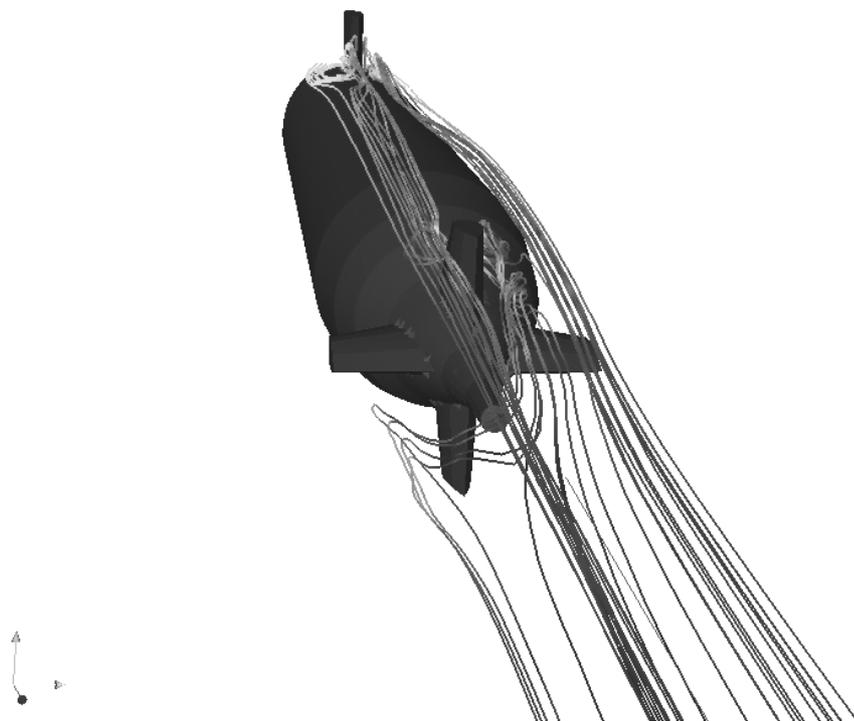


Рис. 3. Обтекание подводной лодки SUBOFF

тела относительно пикноклина в рассмотренном диапазоне чисел Фруда (0,05-0,2) происходит всплытие глубинного кильватерного следа. Механизм этого явления обусловлен взаимодействием вихревого жгута с поверхностью раздела жидкостей разной плотности, которая в данном случае ведет себя подобно экрану.



Рис. 4. Всплытие вихревого жгута за эллипсоидом вращения удлинением 6:1 при его движении в стратифицированной жидкости над пикноклином

В том же отчете [18] и в [21] приводятся результаты расчетов вынужденных внутренних волн, создаваемых движением объекта вблизи скачка плотности, а также возникающих при этом гидродинамических реакций.

В статье обоснована актуальность создания морских тренажеров нового типа, предназначенных для информационной поддержки процесса проектирования морских объектов. Такие тренажеры должны обладать дополнительными возможностями по сравнению с тренажерами для обучения и основываться на новом математическом и программном обеспечении. Из всего многообразия возникающих при этом проблем в статье рассмотрены только гидродинамические вопросы разработки такого обеспечения, которые необходимо решить для имитации управляемого движения морских объектов.

Главный вывод проведенного анализа состоит в том, что существующие методы прогнозирования гидродинамических реакций не пригодны для решения рассматриваемой задачи и им на смену должны прийти методы вычислительной гидродинамики, позволяющие прогнозировать практически любые гидродинамические характеристики объекта, включая гидрофизические поля. Методы ВГД обладают рядом преимуществ, которые особенно четко проявляются при проектировании новой техники, когда отсутствуют достоверные данные о гидродинамических характеристиках создаваемого объекта. К числу таких преимуществ относятся:

- возможность оперативного получения практически всей гидродинамической информации с учетом всех определяющих факторов без привлечения экспериментальных данных;
- возможность исследования физических свойств и структуры течений с предсказанием таких явлений, как нелинейные эффекты, кавитация, отрыв потока и др.;
- возможность проведения серийных расчетов с целью решения оптимизационных задач проектирования;
- учет реальных свойств объекта и гидрофизических условий плавания;
- перспективность, связанная с постоянным развитием математических моделей, численных методов и ростом производительности вычислительной техники.

В настоящее время уже существует математическое и программное обеспечение, разработанное, в том числе, и авторами настоящей статьи, позволяющее решать многие гидродинамические проблемы создания тренажеров нового типа. Модели верхнего уровня, обеспечивающие прямой учет вязкости жидкости, но требующие больших затрат машинного времени даже на высокопроизводительных современных компьютерах, могут быть использованы для замены экспериментальных методов в существующих технологиях расчета динамики морских объектов, а также могут поставлять необходимую информацию для моделей нижнего уровня. Эти модели, основанные на косвенном учете вязкости, обладают высоким быстродействием, что позволяет применять их непосредственно в процессе интегрирования уравнений динамики на каждом шаге по времени, правда, при некоторых ограничениях в учете всех физических факторов. Использование такого подхода позволит практически впервые объединить силовую и траекторную задачи динамики твердого тела на уровне совместного решения уравнений движения тела и жидкости.

Представленные результаты являются теоретическим и практическим обоснованием для разработки тренажеров управляемого движения морских объектов для решения исследовательских и проектных задач.

Summary

In the present paper the actual problem of the creating of the new type of sea simulator for solution the design and research tasks is considered. The hydrodynamics aspects of the developing of such kind simulator and perspective CFD methods for their creating are discussed. The examples of the mathematical models and computers software for the prediction of the hydrodynamics characteristics for this simulator are described.

Литература

1. *Рождественский В.В.* Динамика подводной лодки. Л.: Судостроение, 1970.
2. Справочник по теории корабля. В 3 т. / Под ред. Я.И.Войткунского. Л.: Судостроение, 1985.
3. Машиностроение. Энциклопедия. Р.IV. Расчет и конструирование машин. Т.IV-20. Корабли и суда. Кн.1. Общая методология и теория кораблестроения. М.: Машиностроение; СПб.: Политехника, 2003.
4. Собр.трудов акад.А.Н.Крылова. Т.IX. Ч.II. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1949.
5. *Короткин А.И.* Присоединенные массы судостроительных конструкций. Справочник. СПб.: Морской вестник, 2007.
6. *Каверинский А.Ю., Карлинский С.Л.* Верификация методики компьютерного моделирования на основе анализа движения ПЛ при экспериментальном выполнении вертикальных маневров // Сб.науч.тр. «Фундаментальная и прикладная гидрофизика». № 1. СПб.: Наука, 2008. С.70-79.

7. Отчет по НИР «Аномалия». СПбНЦ РАН, 2006.
8. Отчет по НИР «Гидродинамика–ЭП». СПб.: ОАО «НТП «Нави-Далс», 2008.
9. Отчет по НИР «Аномалия». СПбНЦ РАН, 2004.
10. *Миропольский Ю.В.* Динамика внутренних гравитационных волн в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 302 с.
11. *Пыльнев Ю.В., Разумеенко Ю.В., Кормилицин Ю.Н.* Проблемы учета изменчивости гидрофизических полей Мирового океана при проектировании и эксплуатации подводных лодок // Сб.науч.тр. ВМИИ. СПб., 2002.
12. *Гурьев Ю.В.* Метод расчета обобщенных присоединенных масс тел корабельной формы // В сб. «Инженерно-технический опыт». № 69. СПб, 1995.
13. *Гурьев Ю.В. и др.* Практические результаты применения численного метода определения позиционных и вращательных производных объектов подводной морской техники. Материалы 4-ой Международной конференции по морским интеллектуальным технологиям «МОРИНТЕХ'2001». СПб.: «Моринтех», 2001.
14. *Гурьев Ю.В., Красиков В.И., Калинин О.С.* Нелинейная математическая модель прогнозирования позиционных и вращательных характеристик ПЛ. Материалы НТК, посвященной 95-летию со дня рождения А.Н.Патрашева. СПб.: ВМИИ, 2005.
15. *Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В.* Моделирование гидродинамических реакций, действующих на подводные объекты, методами вязкой и невязкой жидкости. Труды НТК «Проблемы мореходных качеств судов и корабельной гидромеханики». ХLI Крыловские чтения. СПб., 2003.
16. *Гурьев Ю.В., Красиков В.И., Слуцкая М.З.* Прогнозирование гидродинамических реакций в задачах динамики подводных объектов с учетом гидрофизических полей океана. Труды VIII-ой Международной конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПбНЦ РАН, 2006.
17. *Слуцкая М.З.* Численное определение гидродинамических реакций, действующих на подводный объект в условиях внутреннего волнения. Труды IX-ой Международной конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПбНЦ РАН, 2008.
18. Отчет по НИР «Гидродинамика–МИК». СПб.: ОАО «НТП «Нави-Далс», 2008.
19. *Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В., Стацюк И.В.* Моделирование взаимодействия морских объектов с гидрофизическими полями Океана. Труды IX-ой Международной конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПбНЦ РАН, 2008.
20. *Никущенко Д.В.* Применение методов динамики вязкой жидкости для определения гидродинамических характеристик подводных объектов. Сб.тр. СПбГУ, Прикладная математика, информатика, процессы управления. 2007. Сер.10. Вып.4. С.50-59.
21. *Ткаченко И.В., Гурьев Ю.В.* Моделирование обтекания тел вращения потоком стратифицированной жидкости на основе метода крупных вихрей. // Сб.науч.тр. «Фундаментальная и прикладная гидрофизика». № 1. СПб.: Наука, 2008. С.80-87.
22. *Dawson C.W.* A Practical Method for Solving Ship-Wave Problems // Proceedings of the Second International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics. 1977. P.30-38.
23. *Клубничкин А.М., Тимошин Ю.С., Чичерин И.А.* Расчет нелинейных корабельных волн панельным методом. // В сб.: Проблемы практического прогнозирования сопротивления воды движению судов. Сборник статей к 100-летию со дня рождения И.В.Гирса. СПб.: ЦНИИ им.акад.А.Н.Крылова. 2002. С.32-59.
24. *Семенова В.Ю.* Разработка метода расчета нелинейной качки судов. Дис. на соискание уч.ст.докт.техн. наук. СПб.: СПбГМТУ, 2005.
25. *Carton J., Radosavljevic D.* The value of CFD in ship design and analysis // Marine Engineers Review. February, 2008. P.24-26.

Статья поступила в редакцию 28.10.2007 г.