

© В.С. Никитин  
© V.S. Nikitin

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ – ЭФФЕКТИВНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ СУДОСТРОЕНИЯ

### NUMERICAL SIMULATION – AN EFFICIENT APPROACH TO APPLIED PROBLEMS IN SHIPBUILDING

УДК 629.5:519.6

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-5-8

Создание цифровых платформ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования является одним из приоритетных направлений в развитии информационных технологий. На государственном уровне это утверждено программой «Цифровая экономика Российской Федерации», принятой Правительством РФ в 2017 г., и «Стратегией развития информационного общества». Речь идет о важных инновациях, требующих даже от самых консервативных отраслей науки поиска новых путей выполнения как теоретических, так и прикладных исследований. Применение суперкомпьютерных технологий, основанных на использовании особо мощных ЭВМ и пакетов программ, ориентированных на параллельные вычисления, ускоряет расчеты на несколько порядков, что обеспечивает многовариантное 3D-моделирование технических объектов с использованием полномасштабных виртуальных компьютерных моделей оборудования и позволяет решать многокритериальные и многопараметрические задачи.

Еще несколько лет назад о возможности использования численного моделирования было принято говорить как о конкурентном преимуществе того или иного предприятия, но сегодня будет правильнее называть его конкурентной необходимостью. Наступило время высокопроизводительных компьютерных технологий, и без их использования кораблестроительная наука не сможет разрабатывать перспективные проекты, предлагать рентабельные решения, развиваться и в конечном счете обеспечивать обороноспособность страны. Рыночная экономика диктует свои условия и Крыловскому государственному научному центру: ведущие

конструкторские бюро отрасли находятся в активном процессе создания и внедрения в практику проектирования собственных вычислительных суперкомплексов и технологий численного моделирования. Можно предположить, что в среднесрочной перспективе необходимость выполнения работ этими потенциальными заказчиками на экспериментальной базе нашего предприятия будет сокращаться нарастающими темпами. Сохранить свое положение и востребованность в отрасли возможно за счет интенсивного развития численного моделирования, подкрепленного использованием собственной экспериментальной базы для валидации разрабатываемых технологий и подтверждения тем самым уровня выполняемых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в части использования численного моделирования.

Конструкторские бюро, создающие и применяющие электронную 3D-модель проекта, выполняют лишь часть задачи обеспечения цифрового предприятия, не равнозначную так называемой информационной модели. Последняя должна содержать полную структурированную информацию об изделии на всех этапах его жизненного цикла, включая 3D-модель. Необходим единый судостроительный аналитический центр, способный оценить целесообразность и риски внедрения отдельных элементов цифровой экономики. Эта роль может быть отведена ФГУП «Крыловский государственный научный центр», оснащенный самым мощным в отрасли суперкомпьютером производительностью 75,2 терафлопс. Особыми преимуществами нашего предприятия, способными обеспечить плавный переход к информационной

модели в судостроении, в том числе к виртуальному эксперименту, являются:

- наличие наработанных методик расчетов в различных областях судостроительной науки и уникального кадрового состава, владеющего методиками проведения физического эксперимента на объектах экспериментальной базы центра по всем отраслевым типам задач;
- команда с многолетним опытом в области высокопроизводительных вычислений;
- территориальная близость квалифицированного персонала, суперкомпьютера и объектов экспериментальной базы Крыловского центра, позволяющая обеспечивать рациональное сочетание физического и виртуального экспериментов с точки зрения повышения точности и корректности результатов расчетов, сроков исполнения работ, а также возможность детальной и достоверной верификации и валидации разрабатываемых моделей и методик для дальнейшего развития направления в интересах отрасли и оборонно-промышленного комплекса.

Остановимся на некоторых особенностях использования высокопроизводительных вычислительных технологий в проектах, исследованиях и разработках Крыловского центра. При решении повседневных задач судостроения важным инструментом стала вычислительная гидродинамика (CFD). Приведем ряд примеров задач, для которых применение CFD стало необходимостью:

- Предварительная отработка формы обводов, т.е. расчеты с вариацией формы с целью получения либо наилучших, либо заданных гидродинамических характеристик, как правило, с последующим изготовлением модели и проведением ее испытаний. Здесь численный эксперимент может конкурировать с физическим, позволяя проводить исследования с достаточно мелким шагом, анализировать составляющие сопротивления и одновременно снижать потребность в последующих переделках физической модели. Если в середине XX века говорилось об испытаниях десятков моделей для важных заказов, то в 70–80 гг. прошлого века нормой стало 2–4 модели. Сейчас, с введением в практику CFD-отработки, редкий заказчик позволяет сделать 2 модели по одному заказу.
- Проведение расчетов характеристик, которые невозможно получить в ходе эксперимента. Примером может служить расчет гидродинамических сил на каких-либо элементах единой

конструкции (например, движительной колонки) или поле скоростей в потоке, натекающем на задний гребной винт соосной пары.

- Оценка «масштабного эффекта», т.е. сопоставительные расчеты для условий проведения модельного эксперимента и натуральных условий.

Все это находит отражение и на страницах Трудов Крыловского государственного научного центра. Например, в данном сборнике приводится исследование готовности технологии численного моделирования для решения таких проблем динамики судна, как движение танкера и изменение положения контейнеровоза под волновой нагрузкой. Для задач входа судна в циркуляцию и качки судна на регулярном волнении при различных курсовых углах волны получено хорошее согласование результатов численного моделирования с экспериментальными данными. Проведенные работы показали, что современное состояние численных методов и суперкомпьютерной техники позволяет с достаточной для инженерных задач точностью прогнозировать характеристики динамики объектов морской техники.

В Крыловском центре разрабатываются специализированные методы численного моделирования для решения задач теории корабля. Пример такой разработки представлен в статье, посвященной оптимизации конфузоров и диффузоров кавитационных труб. Отличием данного метода от коммерческих программных пакетов является высокое быстродействие и учет специфики конкретных заказов.

Для разработки методики определения запаса на развитую кавитацию гребного винта ледокола предложен числовой показатель, характеризующий устойчивость гребного винта против развитой кавитации, а также схема, позволяющая объединить результаты испытаний в кавитационной трубе и кавитационном бассейне. Наличие подобных методов позволит развивать численное моделирование явлений, происходящих в кавитационном бассейне.

Актуальной является и проблема внедрения CFD-методов для решения задач судовой энергетики: расчетные исследования теплогидравлических процессов, характерных для энергетического оборудования; оптимизация элементов энергетических установок. В статье, посвященной численному моделированию свободно-конвективного течения около вертикальной поверхности нагрева, исследованы процессы теплообмена в условиях свободной

конвекции, характерные для элементов энергетических установок и судовых систем, в частности при обогреве цистерн арктических судов.

Для проведения расчетного моделирования последствий аварий водоохлаждаемого реактора, связанных с потерей теплоносителя (типа LOCA), разработана физико-математическая модель, описывающая динамику протекания аварии в защитной оболочке ЯЭУ, и программа расчета параметров среды в оболочке. При использовании противоаварийной барботажно-спринклерной системы может быть обеспечена требуемая эффективность снижения давления для выбранной конструкции защитной оболочки, а разработанная методическая база и программа расчета давления и температуры в помещениях позволяют определить параметры противоаварийной системы.

Реализация всех вышеперечисленных проектов стала возможной благодаря активному внедрению численного моделирования в практику работы ученых Крыловского центра. Но для справедливой оценки роли вычислительных методов необходимо учитывать, что даже математические расчеты, сделанные с помощью самых высоких технологий, не способны полностью заменить физический эксперимент. Исключением могут стать те случаи, когда требования к точности определения рассчитываемых характеристик, обеспечивающих проектирование, не слишком высоки (допустима погрешность 10–20 %) или же когда физический эксперимент может быть выполнен только с такой же точностью.

Сегодня немногие заказчики соглашались на чисто расчетное исследование в обеспечение проектирования судна. Этот подход возможен лишь из соображений экономии. При этом можно было бы привести ряд примеров, когда результаты такой попытки не тратить лишние средства были весьма негативными и специалистам Крыловского центра приходилось искать пути ликвидации последствий неточности проектирования. Поэтому в работе над проектами современное численное моделирование должно сочетаться с физическим экспериментом.

Это подтверждают выводы обзорной статьи, посвященной современным задачам развития ледовой ходкости. В ней выполнен обзор 153 литературных источников, посвященных этому научному направлению, и выявлены основные пути его дальнейшего исследования. Ими являются как разработка математических моделей движения судна,

численных технологий описания ледовых условий и различных ледяных образований, современных методов исследования и расчета параметров воздействия льда на движительно-рулевые комплексы судов в целом и гребные винты в частности, так и развитие методов модельного эксперимента в ледовых бассейнах и проведения натурных испытаний судов в различных ледовых условиях.

Не меньший интерес представляют материалы сборника, раскрывающие различные актуальные вопросы отечественного кораблестроения. Исследовано влияние высокотемпературного окисления и солевой коррозии на скорость разрушения образцов из порошковых материалов с использованием аддитивных технологий. Показана возможность замены литейных материалов на порошковые при эксплуатации в морской атмосфере.

Для решения проблемы энергообеспечения потребителей в удаленных арктических регионах рассмотрен вариант применения атомных станций малой мощности на базе плавучих и блочно-транспортных энергоблоков.

Программы испытаний электроэнергетических систем корабля должны предусматривать одновременные испытания всего оборудования, входящего в состав электростанции. На швартовных испытаниях нужно проверять работу электрооборудования во всех предусмотренных проектом режимах корабля с учетом надежности действия и обеспечения электрической энергии необходимого качества. Основную роль в создании требуемой нагрузки играют нагрузочные устройства мощностью 1250 кВт, созданные в ЦНИИ СЭТ. Для обеспечения приемлемых массогабаритных характеристик разработаны активно-индуктивные элементы нагрузочных устройств на основе соленоидов с водяным охлаждением. Развитие электроэнергетических комплексов сопряжено с необходимостью детального исследования электромагнитного и электродинамического взаимодействия всех составляющих частей. В статьях, раскрывающих эту тему, оценены электродинамические силы при протекании токов, подчеркнута важность закрепления витков в конструктивных элементах диэлектрического каркаса соленоидов во избежание их смещения и межвитковых замыканий. Данные исследования содержат не только теоретические результаты, но и практические рекомендации по конструктивному исполнению элементов нагрузочных устройств.

Актуальность изучения поля температуры аномального слоя воды, образующегося на границе

раздела «вода – воздух» и получившего название «поверхностная пленка воды», объясняется необходимостью выявления влияния гидродинамических возмущений, происходящих на глубинных горизонтах при эксплуатации морского транспорта, а также других морских объектов на поле температуры свободной морской поверхности. Кроме того, с этим полем связаны достаточно хорошие перспективные возможности решения экологических проблем. Сформулированы положения модели границы раздела «вода – воздух», которая может иметь практический интерес для решения задач климатической, экологической изменчивости морской среды, а также задач эксплуатации водной акватории в процессе судоходства.

Решена задача формирования поля звуковых давлений в слое воды, ограниченном поверхностью воды и дном. Рассмотрено влияние характеристик дна и поверхности воды на уровень звукового давления в присутствии тела заданной формы.

Исследованы пробы донных осадков из районов захоронения радиоактивных отходов в Новоземельской впадине Карского моря и измерены распределения удельной активности донных осадков по глубине для идентификации затопленных объектов, являющихся источниками радиоактивного загрязнения морской среды.

Показана высокая эффективность тонкого армированного вибропоглощающего покрытия на основе полимерной пленки. Практическое значение работы состоит в возможности применения данного покрытия для уменьшения уровней вибрации конструкций в широком диапазоне частот.

Представлена технология создания виброакустических стендов, являющаяся практическим поэтапным руководством, которое может оказать су-

щественную помощь предприятиям судостроительной отрасли в создании собственных экспериментальных установок. Принципиальная особенность такого стенда – высокая пропускная способность, позволяющая проводить испытания серийно выпускаемых изделий в сроки, установленные графиками их изготовления и поставки на стапель под монтаж. Работа основана на структурном анализе и обобщении опыта создания виброакустических стендов АО «ПО «Севмаш» и интеграции их в производственно-технологический цикл.

Наконец, приведены особенности построения систем управления гребными электроприводами, входящими в состав систем электродвижения универсальных атомных ледоколов нового поколения. Рассмотрено одно из технических решений, направленных на повышение качества протекания электромеханических процессов, в части выравнивания нагрузки статических преобразователей частоты, входящих в состав систем электродвижения. Также представлены результаты компьютерного моделирования, подтверждающие корректность предлагаемых решений, что лишний раз доказывает необходимость наличия неразрывной связи между реальным и виртуальным экспериментами.

Следует добавить, что, по экспертным оценкам, полное вытеснения физического эксперимента численным моделированием не случится даже в долгосрочной перспективе. Причем говорить это можно не только о сфере судостроения, но и о смежных отраслях промышленности. Речь идет скорее о замене значительной части испытаний на численное моделирование физических процессов и явлений, и эта тенденция сегодня очевидна в работе большинства лабораторий и исследовательских отделов Крыловского центра.