

ОРГАНИЗАЦИЯ РЕСУРСОЕМКОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

А. Б. Дегтярев^{1,2,}, В. Н. Храмушин¹*

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Рассмотрена реализация вычислительных экспериментов в рамках концепции «виртуального полигона». Расчеты в масштабе реального времени приводят к высокой потребности в вычислительных ресурсах. Практическая невозможность обеспечить использование как одной универсальной математической модели, так и безграничных ресурсов приводит к применению моделей, соответствующих текущему сценарию моделирования. В этом случае возникает необходимость: 1) распознавания ситуации, в которой находится моделируемый объект; 2) выбора соответствующей математической модели; 3) динамического конфигурирования необходимых вычислительных ресурсов. В качестве приложения выбран морской виртуальный полигон.

The implementation of computational simulation within the framework of the “virtual testbed” concept is considered. Real-time calculations result in high computational demands. The practical impossibility of ensuring both the use of one universal mathematical model and unlimited resources leads to the use of models corresponding to the current simulation scenario. In this case, the need arises: 1) to recognize the situation in which the simulated object is located; 2) to select an appropriate mathematical model; 3) to dynamically configure the required computing resources. A marine virtual testbed was chosen as an application.

PACS: 07.05.Tr; 89.20.Fi

ВВЕДЕНИЕ

Концепция «виртуального полигона» основана на высокопроизводительных алгоритмах моделирования изучаемого физического явления без потери качества воспроизводимых процессов [1]. Одной из самых сложных областей такого рода является морская гидродинамика, так как для нее требуется интеграции достаточно большого количества разнородных моделей.

Применение устойчивых неявных численных схем здесь не рассматривается, поскольку практика показывает неконтролируемое сглаживание гидродинамических процессов в подобластях с большими градиентами.

* E-mail: a.degtyarev@spbu.ru

Сквозной и повсеместный анализ результатов моделирования допускается при использовании явных численных схем. Они позволяют гибридно перестраивать физические модели и математические алгоритмы непосредственно в процессе интерактивного управления вычислительными процессами. Тем не менее, к сожалению, часто при постановке задач вычислительного моделирования следует вывод о невозможности моделирования с заданной инженерной точностью из-за чрезмерной востребованности вычислительных ресурсов.

Инженерные подходы в морской гидродинамике (как и в любой другой сложной технической области) традиционно доводят любую техническую задачу до приемлемого уровня, адекватно соответствующего теоретическим, эмпирическим или экспериментальным результатам. На практике такие исследования ограничиваются частными решениями и часто сводятся к авторскому «ноу-хау», которое трудно обобщать и весьма рискованно применять в случае существенных изменений исследуемых объектов.

Организация экспертных систем на базе высокопроизводительных вычислительных систем позволяет синтезировать различные теоретические подходы с инженерными методами в морской гидромеханике. Целью является объединение оптимальных по контексту модулей моделирования, визуализации и анализа данных в реальном времени.

Представлена идея реализации такой системы в текущей редакции виртуального полигона. Последовательный набор вычислительных моделей строится от простейших кинематических представлений до сложных модулей, требующих высокопроизводительных вычислительных ресурсов. Опыт специалистов от исследователя до морского инженера формализуется в базе знаний экспертной системы в виде правил. По этим правилам, исходя из внешних условий, состояния исследуемого объекта, режима движения и задач моделирования, в распределенной вычислительной среде выбираются простейшие, но достаточные для адекватного моделирования динамики судна вычислительные модули. В дальнейшем они интегрируются. Это возможно на основе концепции виртуального персонального суперкомпьютера.

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ

Концепция построения вычислительных алгоритмов в рамках виртуального полигона (в том числе и морского) заключается в разделении расчетов по физическим процессам. При гидродинамическом моделировании используется корпускулярно-континуальный подход с возможностью применения явных численных схем на всех этапах пошагового исполнения вычислительных экспериментов в реальном или опережающем времени [2].

В правой части расчетной сетки (рис. 1) показано условное смещение подвижной частицы жидкости, которое происходит за один шаг расчет-

приоритетный параллельный поток должен выполнять полноценную графическую визуализацию результатов моделирования. Допускается, что время прорисовки графической сцены может превышать расчетные такты моделирования собственно физических процессов (видимые деформации малы).

Эксперименты могут перегрузить доступные вычислительные ресурсы, например, при слишком мелких сетках, что само по себе становится хорошим тестом для отладки приоритетов операций в параллельных процессах интерактивного управления и графической визуализации [6].

Иной подход требуется для численного решения при анализе гидродинамического состояния и прогноза опасных явлений для морских портов и рейдовых акваторий (рис. 2). Прибрежная длинноволновая гидродинамика и процессы взаимодействия океана и атмосферы в отличие от корабельной гидромеханики оперируют не секундными, а минутными периодами волновых процессов. Практическая значимость в моделировании прибрежной гидродинамики определяется временем заблаговременности морских прогнозов. Такие результаты мы можем также получить лишь на основе прямых вычислительных экспериментов.

Проведение серии вычислительных экспериментов позволяет сделать оценки механизмов проявлений длинноволновых процессов вблизи побережья в зависимости от прилегающей геометрии морского дна:

а) Фронт первого вступления волны цунами обычно имеет максимальную крутизну при выходе на побережье. Прибрежные отмели могут отсрочить приход волны, однако это повышает риск значительного усиления высоты волны.

б) При длительном воздействии волновые структуры систематизируются так, что стоячие волны максимальной высоты концентрируются на изобатах порядка 10–15 м, как бы защищая берег от размыва.

в) Если у побережья отсутствуют условия формирования стоячих волн, то возникает риск выбросов волновой энергии как бы по волноводам в сторону побережья. Такие участки побережья нуждаются в особом районировании, которое вполне успешно осуществляется с помощью вычислительных экспериментов.

При прохождении сильных штормов в действие включаются все вышеописанные волновые эффекты, которые могут приводить к локальным проявлениям опасных морских наводнений и экстремальных течений в самых неожиданных участках морского побережья. Для прогноза возможных катастрофических проявлений на морском побережье необходимо проведение серии опережающих вычислительных экспериментов с оценками для наиболее опасных траекторий атмосферных циклонов. Это обуславливает применение контекстно адекватных математических моделей, каждая из которых для ее эффективной реализации требует свою вычислительную среду.

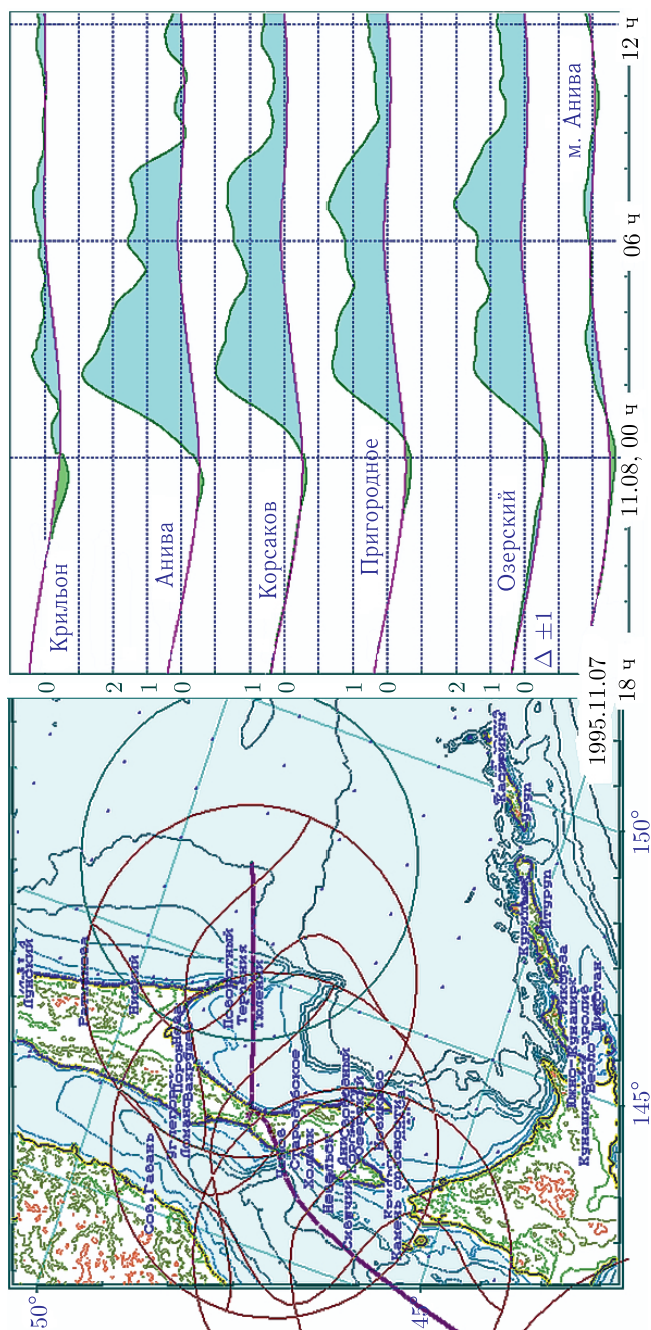


Рис. 2. Моделирование воздействия циклона с использованием синоптических прогнозов гидрометеослужбы. Слева на карте приведен маршрут и оценочный размер по замкнутым изобарам циклона, справа — прогнозируемый по результатам вычислительного эксперимента ход уровня моря

СЦЕНАРИИ РАБОТЫ ВИРТУАЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Любой виртуальный полигон (морской, виртуальный ускоритель, виртуальный дата-центр) ориентирован на моделирование различных, заранее заданных или интерактивно управляемых сценариев [5]. Так, например, для морского полигона можно рассмотреть следующие возможные сценарии: маневрирование в штормовых условиях, глиссирование, движение в канале, швартовка, движение на мелководье, последствия землетрясения и возникновение цунами, наводнения и нагоны и т. д. Каждый сценарий имеет свою специфику, когда упор делается на исследование влияния того или иного явления.

Поскольку в любом сценарии не требуется абсолютно точного воспроизведения всех физических явлений, необходимо сосредоточиться на точном учете явления нужной природы. Так, например, проведение полного и достаточно точного вычисления для всего океанского побережья (см. рис. 2) весьма накладно и поэтому в прогностических расчетах не оправданно. В этом случае опережающие расчеты целесообразно проводить с большим охватом окружающих океанских вод, потому как на больших дистанциях волна вытягивается до ожидаемых или предварительно рассчитанных периодов. При подходе к особо защищаемому побережью волновое поле переносится на утоненную сетку с меньшей площадью морской акватории.

Поэтому следствие — под каждый сценарий нужна своя математическая модель, с одной стороны, достаточно точная и отражающая требуемое явление, с другой стороны, позволяющая обеспечить реальное время в рамках концепции виртуального полигона. Все эти модели предъявляют специфические требования к вычислительной среде, т. е. к объему используемой оперативной памяти, вычислительным мощностям, характеру межпроцессорного соединения, средствам хранения и т. д. При этом контекст задачи может меняться в процессе моделирования, что требует перехода от одной модели к другой.

ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫБОРА КОНТЕКСТНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Сформулированные требования удовлетворяются организацией базы знаний и экспертной системы, в которой по ситуации используется та модель, которая наиболее близка.

На рис. 3 представлена схема разработанной экспертной системы по выбору контекстной математической модели для работы виртуального полигона.

Важной частью программного комплекса является объемная база данных по различным водоизмещающим объектам, гидрографическим условиям и их модификациям. Здесь присутствуют различные модели волнения, комплекс для изучения волновых процессов [4], т. е. распро-

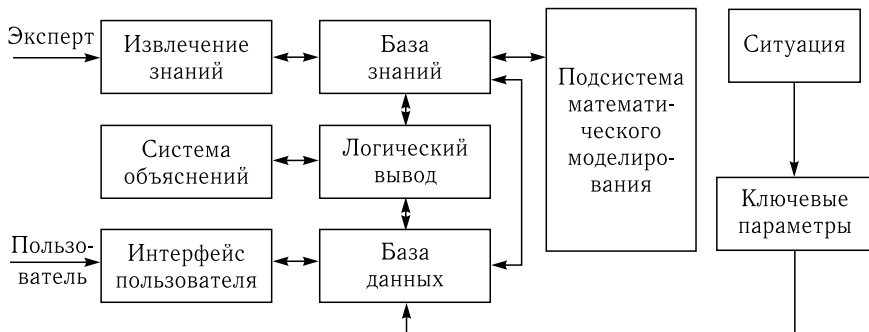


Рис. 3. Схема экспертной системы виртуального полигона

странения, прохождения через открытые расчетные границы и отражения волн от подвижных поверхностей, в том числе с закритическими скоростями. Результаты уточненных вычислительных экспериментов затем формализуются для приемлемых в инженерном плане решений по весьма сложным и неоднозначным гидродинамическим изысканиям.

ОРГАНИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ

Программная реализация различных используемых моделей может требовать для их эффективного исполнения различного набора компьютерных ресурсов. Гибкое изменение объема памяти, вычислительных ресурсов, средств хранения возможно при использовании суперкомпьютеров. Использование кластерных систем, гетерогенной распределенной вычислительной инфраструктуры осложняется проблемами коммуникации различных вычислительных узлов, жесткой структурой соединений и другими проблемами. Выход здесь возможен в использовании концепции виртуального персонального суперкомпьютера [3]. Его основная идея заключается в виртуализации всех компонентов вычислительной системы: памяти, адресного пространства, процессоров, сети и т. д. В результате мы получаем очень мощную SMP-систему, спроектированную для решения конкретной задачи. Этот же подход позволяет достаточно быстро и эффективно реконфигурировать систему под заданный тип задачи, особенно если заранее в базе знаний экспертной системы описаны возможные сценарии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматриваемые в работе суперкомпьютерные технологии опираются на весьма совершенную технику моделирования сложных гидродинамических или технологических процессов, где комплексное оснащение

типовой вычислительной архитектуры графическими и интерактивными интерфейсами позволяет проводить вычислительные эксперименты в реальном времени как с целью поисковых проектных изысканий, так и в эксплуатационном освоении новой техники и инженерных систем в параллельно моделируемых природных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bogdanov A. et al.* Virtual Testbed: Concept and Applications // LNCS. 2020. V. 12254. P. 3–17.
2. *Богданов А. В., Дегтярев А. Б., Храмушин В. Н.* Трехмерная тензорная математика вычислительных экспериментов в гидромеханике // Вычисл. технологии в естест. науках. Методы суперкомп. моделирования. Сер. «Механика, управление, информатика». Ч. 3. Сб. тр. ИКИ РАН. 2015. С. 34–48; <https://iki.cosmos.ru/sites/default/files/publications/2015supercomp3.pdf>.
3. *Bogdanov A. et al.* Virtual Supercomputer as Basis of Scientific Computing // Horizons Comp. Sci. Res. 2015. V. 11. P. 159–198.
4. *Degtyarev A.* New Approach to Wave Weather Scenarios Modeling // Contemporary Ideas on Ship Stability and Capsizing in Waves. Fluid Mechanics and Its Applications. Springer, 2011. V. 97. P. 599–617.
5. *Degtyarev A., Khramushin V.* Computational Simulation as a Tool of Investigating the Behavior of a Marine Object in Storm Conditions // Phys. Part. Nucl. 2025. V. 56, No. 6. P. 1422–1426.
6. *Degtyarev A., Khramushin V.* Real-Time Simulation, Decomposition of Mathematical Models and Algorithms of Interactive Control and Visualization // Phys. Part. Nucl. 2024. V. 55, No. 3. P. 313–316.