

Моделирование на суперкомпьютере обтекания затвора судопропускного сооружения С1 системы защиты Санкт-Петербурга от наводнений



11 Моделирование на суперкомпьютере обтекания затвора судопропускного сооружения С1 системы защиты Санкт-Петербурга от наводнений

Проблема защиты Санкт-Петербурга от наводнений возникла с момента основания города. Катастрофические наводнения привели к необходимости строительства в Финском заливе защитной дамбы. Сегодня практически в полном объеме построена как сама дамба, так и судопропускные сооружения. Как показало математическое моделирование, в процессе затопления створок плавучего затвора могут возникать интенсивные колебания, грозящие разрушением всей конструкции.

АВТОРЫ:

Ю.Я. Болдырев — докт. техн. наук, проф., зав. каф. «Математическое и программное обеспечение высокопроизводительных вычислений» (МПОиВВ) физико-механического факультета (ФМФ) СПбГПУ

С.В. Лупуляк — канд. физ.-мат. наук, доц., доц. каф. «Прикладная математика» ФМФ СПбГПУ

Е.П. Петухов — асп. кафедры МПОиВВ ФМФ СПбГПУ

Ю.К. Шиндер — канд. физ.-мат. наук, доц. каф. МПОиВВ ФМФ СПбГПУ

Проблема защиты Санкт-Петербурга от наводнений возникла практически с момента основания города. Ряд катастрофических наводнений, унесших человеческие жизни и причинивших серьезный урон экономике города, привел к насущной необходимости построить в Финском заливе защитную дамбу (рис. 1, слева). Сегодня практически в полном объеме построена как сама дамба, так и являющиеся ее частями судопропускные сооружения С1 и С2.

Важнейшим элементом большого судопропускного сооружения С1 (рис. 1, справа) является плавучий затвор (батопорт), состоящий из двух подвижных створок, сделанных в форме понтонов, которые при угрозе наводнения выводятся на середину судопропускного канала и затапливаются. При этом, как показали физические эксперименты [2] и математическое моделирование [1,3], в процессе затопления створок могут возникать интенсивные колебания, грозящие разрушением всей конструкции. Причиной этих колебаний является то, что в процессе погружения створок между дном канала и нижней границей створок образуется сильное течение, обусловленное перепадом уровней воды в Финском заливе и в Невской губе. При этом наблюдается интенсивный процесс образования и схода турбулентных вихрей с нижней поверхности створок, приводящий к раскачиванию сооружения.

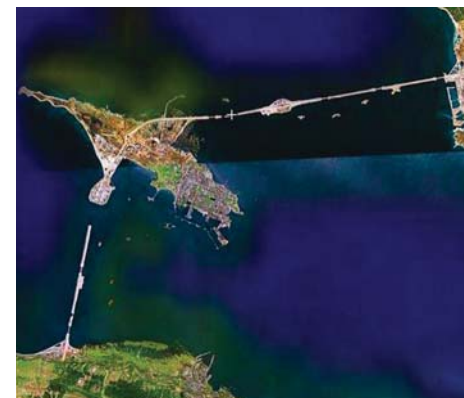


Рис. 1.

Дамба и судопропускные сооружения системы защиты Санкт-Петербурга от наводнений

Предметом проводимых исследований является изучение процесса обтекания затвора и нахождение действующих на него гидродинамических сил.

Работы в данном направлении ведутся коллективом межкафедральной лаборатории прикладной математики и механики физико-механического факультета СПбГПУ начиная с 2004 года.

На ранних этапах исследования проводились в существенно упрощенной двумерной постановке, позволяющей получить главным образом качественные модели процесса [1]. При этом моделировалась только подводная часть затвора, и задача решалась на весьма грубых расчетных сетках, состоящих из нескольких десятков тысяч конечных объемов, что позволяло использовать персональную вычислительную технику. В дальнейшем для получения более точных результатов нами рассматривались более сложные плоские модели, в частности учитывающие взаимодействие течения с воздушной средой. При этом начиная с 2005 года для решения приведенной задачи использовался восьмипроцессорный вычислительный кластер, а в дальнейшем и более мощные системы.

Более глубокое изучение обтекания гидродинамического затвора потребовало перехода от плоской модели течения к трехмерной пространственной модели. Необходимость перехода к трехмерным расчетам была, в первую очередь, вызвана тем, что сама природа процесса образования и схода турбулентных вихрей является существенно трехмерной.

Поскольку моделирование течения для всего затвора или даже одной створки является весьма вычислительно ресурсоемкой задачей, то целесообразно было рассмотреть только часть всего сооружения. В данном случае исследуется обтекание неподвижной секции затвора, составляющей четверть от одной створки.

Кратко остановимся на постановке пространственной задачи. На рис. 2 показаны расчетная область и система граничных условий. На входе и выходе (левая и правая границы на рис. 2) задаются уровень свободной поверхности и гидростатическое давление воды и воздуха соответственно ниже и выше уровня свободной поверхности. На верхней границе задается свободное протекание воздуха и противодействие. На дне и на створке задаются условия прилипания, а на боковых границах задается «стенка с проскальзыванием» — нормальная компонента скорости и касательные компоненты напряжений полагаются равными нулю.

Здесь нами рассматриваются два варианта заглубления батопорта (расстояние до дна 2 и 10 м), при этом уровень воды в Финском заливе выбран равным 18 м, а в Невской губе — 17 м, то есть перепад равен 1 м.

В работе использовались подробные расчетные сетки, насчитывающие до 16 миллионов конечных объемов.

Путем численного решения системы Навье—Стокса определяются поля скоростей, давления, концентрации воды и воздуха в зависимости от пространственных координат и от времени. Для расчетов использовался программный комплекс ANSYS Fluent 6.3 [4].

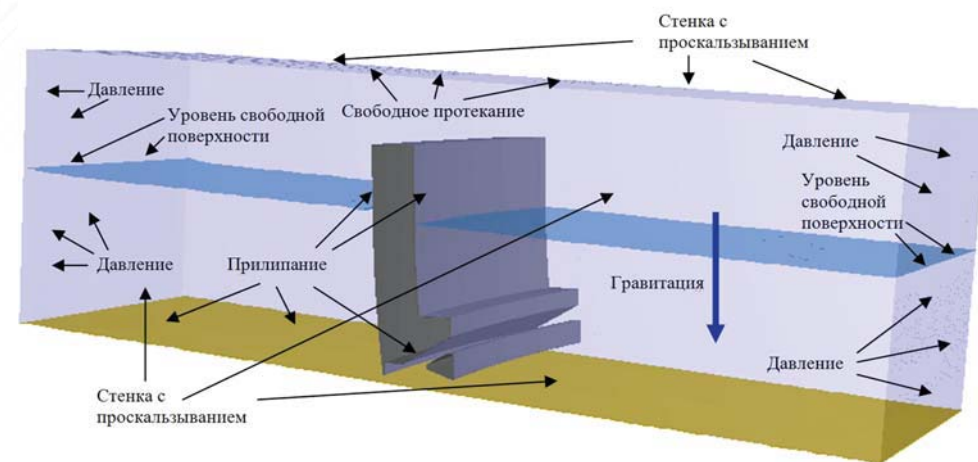


Рис. 2. Трехмерная модель батопорта

Турбулентность в данной работе моделировалась методом крупных вихрей, где для вычисления подсеточных напряжений использовалась модель Смагоринского—Лили с динамическим коэффициентом вязкости, реализованная в комплексе Fluent 6.3. Данный метод предполагает использование тонких расчетных сеток и малых шагов по времени и, следовательно, является весьма ресурсоемким. В то же время он позволяет получить наиболее реалистичную картину течения среди всех методов вычислительной гидродинамики, используемых в инженерной практике.

Для моделирования двухфазного течения (вода—воздух) использовалась модель VOF (Volume Of Fluid — объем жидкости), также реализованная во Fluent 6.3, а для дискретизации полученных уравнений (в рамках Fluent 6.3) использовались схемы второго порядка точности. При решении полученной алгебраической системы применялся алгоритм pressure based solver [4].

Временной отрезок, на котором решалась задача, выбирался таким образом, чтобы завершился процесс формирования статистически стационарного течения. Для разных задач время расчета течения на «установление» менялось от 70 до 180 сек. При этом шаг по времени варьировался от 10^{-4} сек. до 10^{-3} сек. и выбирался индивидуально для каждой задачи таким образом, чтобы обеспечить наилучшую сходимость.

Кратко приведем результаты расчетов для двух рассмотренных случаев — заглубления 2 и 10 м при перепаде уровней воды на затворе в 1 м.

Как выяснилось в ходе расчетов, общая картина течения для этих случаев существенно различна. Это наглядно видно на «мгновенных фотографиях» (рис. 3) изоповерхностей гидродинамического давления¹, а также поверхностей раздела воды и воздуха.

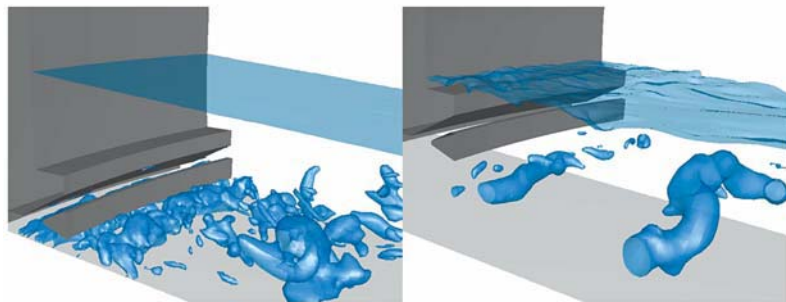


Рис. 3. Результаты моделирования для заглибления 2 м (слева) и 10 м (справа)

Слева показан случай заглибления 2 м, а справа — случай заглибления 10 м. Из рис. 3 хорошо видно, как распределяются вихревые структуры в пространстве. Если в случае заглибления 10 м наблюдается единый «вихревой жгут», сходящийся с нижней кромки створки, то в случае заглибления 2 м этот жгут разбивается на множество мелких вихрей.

В расчетах использовались многопроцессорные кластеры Лаборатории прикладной математики и механики. Всего в расчете был задействован практически весь ресурс двухсот пятидесяти шести процессорных ядер. Общее процессорное время, затраченное на проведение расчетов, составляет около ста пятидесяти тысяч часов. При этом среднее время численного решения каждого отдельного варианта задачи составляло около полутора месяцев.

На рис. 4 представлен график масштабируемости рассматриваемой задачи для случая расчетной сетки около 8 миллионов конечных объемов. Минимальное количество процессорных ядер на графике соответствует минимальному значению узлов кластера, обеспечивающих достаточный для расчета этой задачи объем оперативной памяти. Сплошная линия на рисунке отражает зависимость скорости вычислений от количества задействованных процессорных ядер. При этом для сравнения пунктирной линией показана идеальная линейная зависимость. По оси абсцисс отложено количество ядер, а по оси ординат скорость вычислений, отнесенная к своему значению для 16 ядер.

¹То есть давления, в котором не учитывается гидростатика и давление атмосферы.

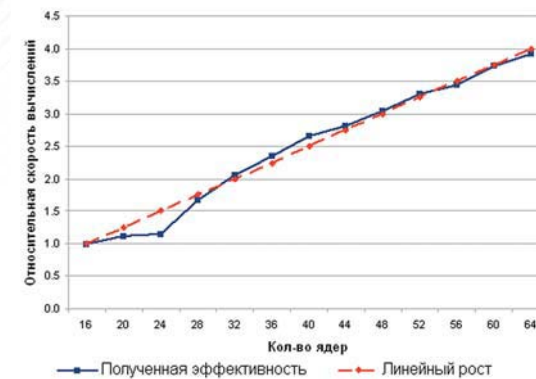


Рис. 4. Масштабируемость задачи для сетки, содержащей около 8 млн конечных объемов

Близость полученной эффективности к линейной, в частности, обусловлена тем, что используются расчетные сетки с большим количеством элементов и относительно небольшое число процессорных ядер.

Стоит отметить, что узлы кластера, используемого в расчетах, объединены с помощью сети Infiniband. Таким образом, данный график показывает высокую эффективность работы программно-аппаратного вычислительного комплекса, состоящего из ANSYS Fluent 6.3 и 6.4 вычислительных узлов с двухъядерными процессорами AMD Opteron 280 (всего 256 ядер) с общим объемом оперативной памяти 512 Gb, работающих под управлением Novell SLES 9.3.

Данная работа поддерживается корпорацией Microsoft (проект Dam) и грантами правительства Санкт-Петербурга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болдырев Ю.Я., Железнякова О.А., Лулуляк С.В. Численное моделирование турбулентного течения жидкости в судопропускном канале дамбы / Материалы научно-практической конференции и школы-семинара «Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий». СПбГПУ, 17-20 июня 2004. С. 181—188.
2. Klimovich, V., Chernetsov, V., Kupreev, V. Improvement of floating gate design for C-1 navigation pass of St. Petersburg flood protection barrier / 32nd Congress of IAHR the International Association of Hydraulic Engineering and Research, Venice, Italy, 2006.
3. Lupuleac S., Bolshev A., Shinder J., Petukhov E., Chernetsov V. The simulation of the Saint Petersburg flood defense system gate vibration under the loads from the moving water // *FIV2008, 30 JUNE — 3 JULY 2008, Prague, Czech Republic*
4. Fluent 6.3 User Manual, Ansys inc. 2007.