

# Суперкомпьютеры для высотного строительства — виртуальное моделирование аэродинамики и расчет ветровых нагрузок на фасады высотных зданий и комплексов

Задача имеет следующие параметры: число Маха 0,206, число Рейнольдса 14 000 (по диаметру цилиндра). В следе за цилиндром размещено 1400 контрольных точек для записи эволюции во времени. Финальная адаптированная сетка со сгущением к краю струи, к области взаимодействия струи с цилиндром и к области контрольных точек, имеет размер  $9 \cdot 10^6$  узлов,  $5 \cdot 10^7$  тетраэдров, безразмерное время интегрирования 1700, задействовались 1024 ядра. На рис. 2 (сверху) показана схема расчетной области и расположение контрольных точек. Снизу на рис. 2 показан пример неструктурированной адаптированной сетки (огрубленной для визуализации в 8 раз).

На рис. 3 показана картина течения (огрубленная, 12% от полного разрешения), вид сбоку и вид сверху полей модуля скорости и завихренности. В результате расчета была успешно получена информация, позволяющая сделать вывод о расположении источников звука в следе за цилиндром.

Были выполнены аналогичные расчеты для конфигурации “зазор”, воспроизводящей взаимодействие турбулентности с зазором в конструкции летательного аппарата, и конфигурации “две стойки”, воспроизводящей шум от обтекания стоек шасси самолета. На рис. 4 показаны картины течения для данных конфигураций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. Abalakin, A. Dervieux, and T. Kozubskaya, “Computational Study of Mathematical Models for Noise DNS”, AIAA-2002-2585 paper.
2. Ilya Abalakin, Alain Dervieux, Tatiana Kozubskaya, High Accuracy Finite Volume Method for Solving Nonlinear Aeroacoustics Problems on Unstructured Meshes, Chinese Journal of Aeroanautics, 19 (2), (2006), pp. 97-104.
3. V. Kopiev, I. Abalakin, G. Faranosov, A. Gorobets, T. Kozubskaya, N. Ostrikov, M. Zaitsev, Experimental and numerical localization of noise sources for cylinder in round jet, Trilateral Russian-French-German Workshop “Computational experiment in aeroacoustics”, Svetlogorsk, September 22-25, 2010, book of abstracts, pp. 75-78.



### 3 Суперкомпьютеры для высотного строительства – виртуальное моделирование аэродинамики и расчет ветровых нагрузок на фасады высотных зданий и комплексов

Применение суперкомпьютеров позволило создать «виртуальную аэродинамическую трубу» и проводить компьютерное моделирование аэродинамического обтекания для определения ветровых нагрузок современных комплексов высотных зданий. Специалистами компании ЗАО «Т-Сервисы» проведены расчеты жилого высотного комплекса из пяти зданий, позволившие с высокой точностью получить пространственные поля давления, воздушных потоков и ветровых нагрузок. Проведенные расчеты сделали возможным, не прибегая к дорогостоящим экспериментальным исследованиям в аэродинамических трубах, получить исчерпывающие для проектировщиков, архитекторов и строителей расчетные данные, необходимые для определения конструктивной прочности и надежности фасадов и степени комфортности пешеходных зон в окрестности строительного комплекса. Применение суперкомпьютеров позволяет по-новому подойти к решению реальных промышленных задач городского высотного строительства.

#### АВТОРЫ:

**Н.А.Владимирова** – канд. физ.-мат. наук, доцент, руководитель отдела анализа гидрогазодинамических процессов и тепломассопереноса Центра вычислительной экспертизы ЗАО «Т-Сервисы», холдинг «Т-Платформы»;  
e-mail: Natalia.Vladimirova@t-services.ru

**А.Е.Ефимов** – руководитель отдела структурного анализа Центра вычислительной экспертизы, ЗАО «Т-Сервисы», холдинг «Т-Платформы»;  
e-mail: Andrey.Efimov@t-services.ru

**О.Э.Мельник** – докт. физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН, Научный руководитель Центра вычислительной экспертизы, ЗАО «Т-Сервисы», холдинг «Т-Платформы»;  
e-mail: Oleg.Melnik@t-services.ru

Специалисты компании ЗАО «Т-Сервисы», входящей в холдинг «Т-Платформы», в своей деятельности основываются на применении высокопроизводительных вычислительных технологий и методик компьютерного моделирования для решения широкого класса промышленных задач. Без использования ресурсоемких расчетов и виртуального моделирования физических процессов на современных суперкомпьютерах большинство актуальных и важных задач для таких отраслей промышленности, как строительство, автомобилестроение, авиастроение и др., решены быть не могут.

Так, с развитием суперкомпьютеров и высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем стало возможным проводить виртуальное моделирование аэродинамического обтекания высотных зданий для определения ветровых нагрузок. Расчеты на суперкомпьютерах позволяют практически полностью заменить используемые в настоящее время дорогостоящие эксперименты в аэродинамических трубах.

Сокращение свободных территорий под строительство в Москве и других крупных городах приводит к необходимости строить высотные здания (выше 50–100 м). Высотное здание — это сложный организм, где должны быть взаимосвязаны все проектные решения инженерных систем, а опыта проектирования и длительной эксплуатации таких зданий в отечественном градостроении практически нет. Аэродинамический режим обтекания высотного здания характеризуется повышенными значениями давления ветра и сложными траекториями воздушных потоков по высоте и по периметру строения. Для высотного здания при расчете ветровых нагрузок и тепловых потерь необходимо учитывать распределение скорости ветра по высоте. Воздействие верхних слоев воздуха на нижние при обтекании здания потоком ветра приводит к увеличению скорости воздуха у поверхности земли. Особая аэродинамика высотного здания предъявляет высокие требования к его конструктивной прочности. Большая разность давлений на наружной и внутренней поверхностях ограждающих конструкций здания определяет направление и величину фильтрации воздуха через наружные ограждающие конструкции. Кроме этого, наружная поверхность здания, подверженная воздействию солнечной радиации, в летнее время достаточно сильно нагревается, что приводит к образованию восходящих потоков теплого воздуха в приповерхностном слое. Из-за больших ветровых нагрузок на высотные здания возникает определенная опасность при открывании окон верхних этажей для их очистки или проветривания помещений. Например, особую опасность вызывает одновременное открывание окон, ориентированных на наветренную и подветренную стороны

здания. В этом случае в помещении могут возникнуть очень сильные воздушные потоки, вызывающие разрушительные воздействия.

В районах со слабой сейсмичностью ветровые воздействия на высотные здания являются, по существу, основными, а в целом аэродинамическое воздействие наружного климата на высотное здание является экстремальным. Поэтому исследования аэродинамики занимают значительную часть в общем объеме проектных работ. Как правило, до появления суперкомпьютеров, эти исследования включали в себя физическое моделирование в аэродинамической трубе. С приходом эры суперкомпьютеров экспериментальные исследования в аэродинамических трубах вытесняются математическим моделированием на базе новейших компьютерных технологий и программных комплексов.

Основные трудности при проектировании высотных зданий состоят в том, что используемые до настоящего времени строительные нормы и правила [1], [2] не содержат рекомендаций по расчету аэродинамических коэффициентов для сложных по форме и крупногабаритных сооружений, в том числе для высотных зданий. Ветровые нагрузки на такие сооружения зависят как от геометрии самих зданий, так и от их аэродинамической интерференции и особенностей окружающего рельефа.

При подготовке московских городских строительных норм [3] в 2005 г. предусматривалось, что используемые при проектировании величины аэродинамических ветровых нагрузок должны быть основаны на результатах аэродинамических испытаний крупномасштабных макетов в трубах.

В настоящее время современные аппаратно-программные комплексы позволяют на базе самых продвинутых вычислительных технологий и численных методов проводить численное моделирование стационарного и/или нестационарного турбулентного отрывного обтекания ветровым потоком высотных зданий (как отдельно стоящих на земле, так и комплексов зданий) и определять аэродинамические коэффициенты и ветровые нагрузки на фасады зданий.

Высокопроизводительные расчеты позволяют получать подробные и точные пространственные распределения давления и воздушных потоков, рассчитывать и визуализировать траектории частиц пыли или примесей в окрестности высотных комплексов.

В настоящей статье представлены результаты решения задачи аэродинамического обтекания и расчета ветровых нагрузок, действующих на комплекс из 5 высотных (до 101 м) зданий, выполненного специалистами компании «Т-Сервисы» для инжиниринговой компании ЗАО «МонАрх-УКС». Расчеты проводились на суперкомпьютере на базе blade-платформы T-Blade, разработанной в компании Т-Платформы

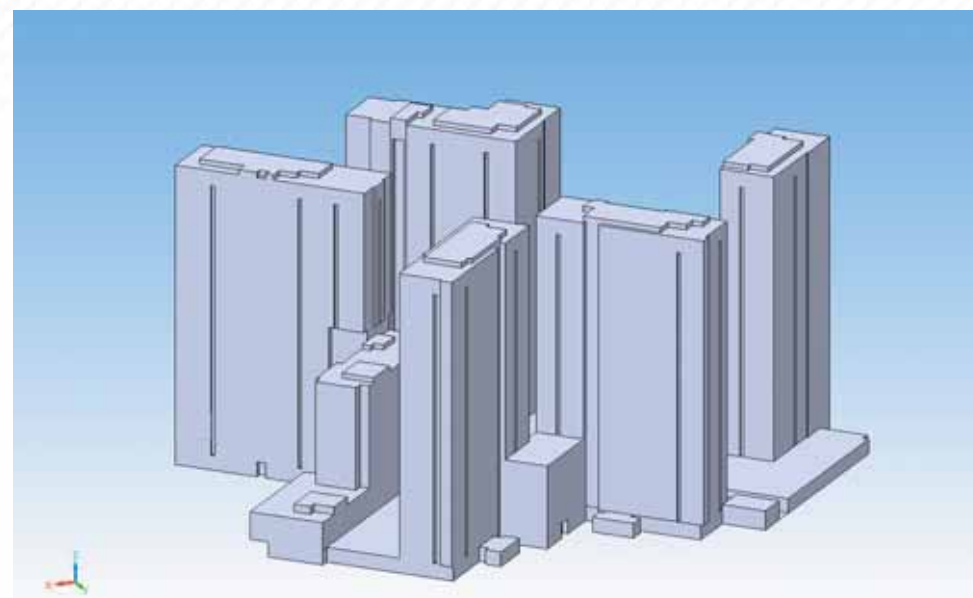


Рис. 1.  
Геометрическая конфигурация высотного комплекса

и построенной на 10 двухпроцессорных лезвиях, каждое из которых включает процессор 2×Intel(R) Xeon(R) CPU E5410@2,33GHz. Лезвия соединены в единую систему высокопроизводительной коммуникационной сетью InfiniBand DDR.

На рис. 1 представлена общая геометрическая конфигурация рассматриваемого высотного комплекса.

На основании чертежей зданий была сгенерирована полномасштабная трехмерная твердотельная CAD-модель комплекса сооружений и сформирована математическая трехмерная полноразмерная (натурная) расчетная область с сеткой из 13,5 млн объемных ячеек. Расчеты проведены в программном CFD (Computational Fluid Dynamics) - комплексе на основе численного решения трехмерных уравнений газовой динамики Навье—Стокса с учетом турбулентности воздушного ветрового потока. В расчеты закладывался логарифмический профиль скорости ветра в приземном слое атмосферы, определяемый в соответствии с изменением по высоте скоростного напора, обеспечивающего требуемые значения нормативных ветровых нагрузок для заданного ветрового района.

Компьютерное моделирование и расчеты ветрового давления на фасады отдельных строений комплекса проведены для 8 направлений ветрового

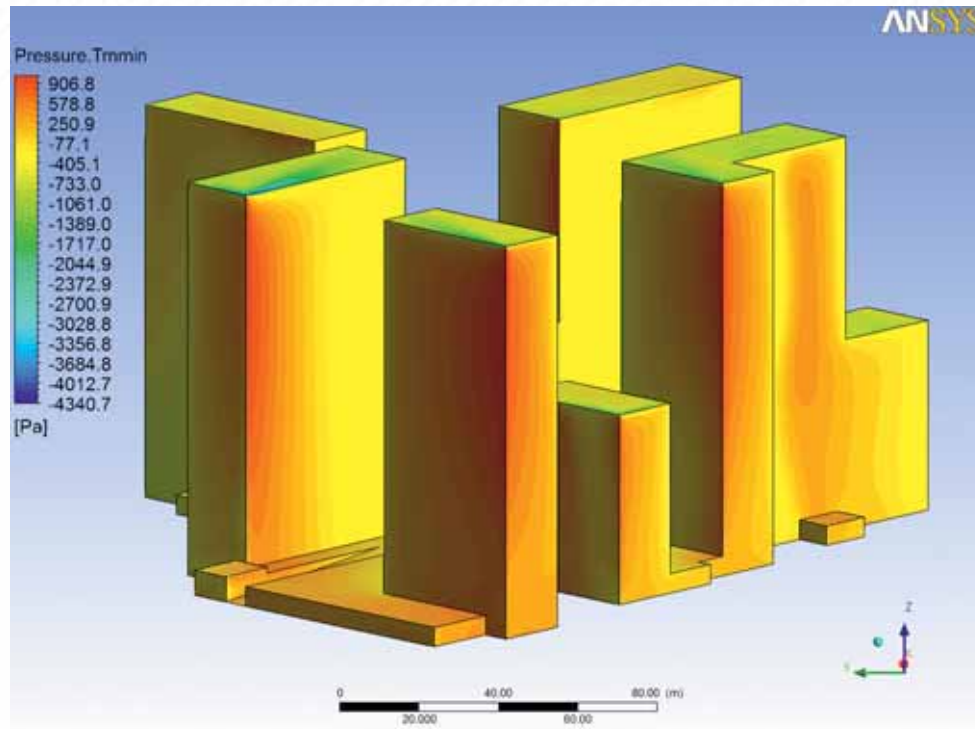
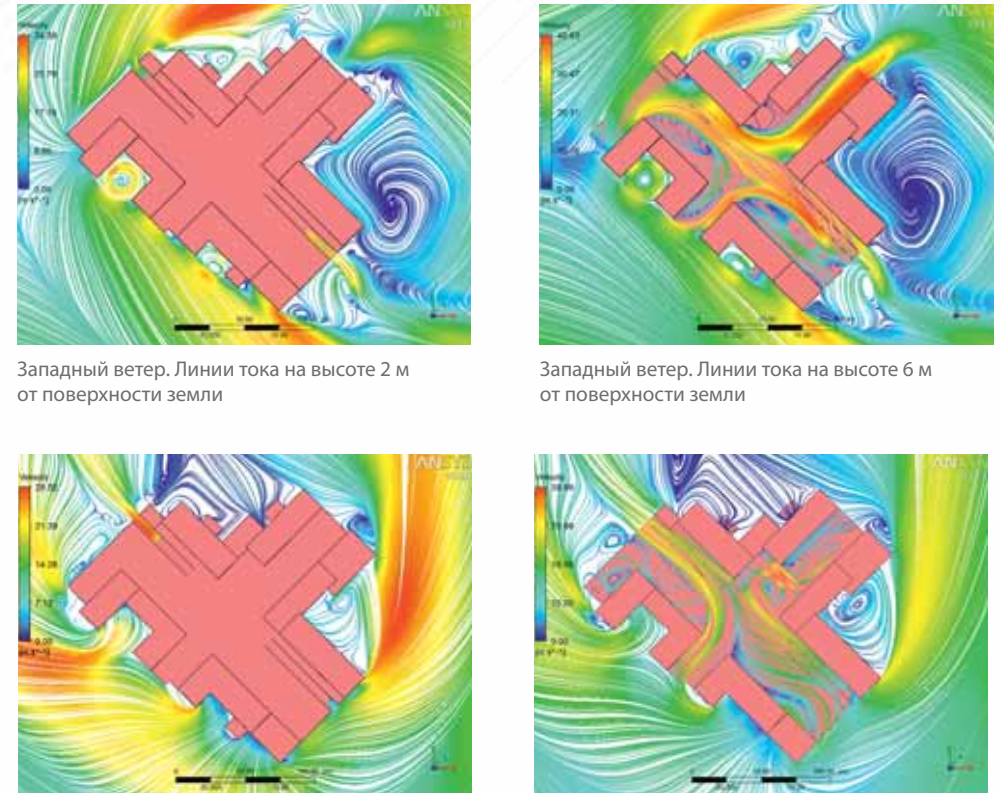


Рис. 2. Распределения ветрового давления по фасадам комплекса для наиболее неблагоприятного варианта нагружения (западный ветер). Направление ветра – перпендикулярно к плоскости рисунка

потока — 8 угловых значений по азимуту с интервалом 45 градусов. Каждый расчет средней и пульсационной составляющей ветровой нагрузки на все фасады зданий требовал 15–20 часов работы суперкомпьютера. По результатам этих расчетов выявлено направление ветра (западный), при котором реализуется «наихудший» вариант обтекания с максимальными величинами ветровых нагрузок на фасадах зданий и ограждающих конструкциях, вместе с определением мест их локализации (рис. 2).

Для каждого режима обтекания проводилась также визуализация воздушного потока в окрестности высотного комплекса с целью оценки уровня комфортности внутренних и внешних пешеходных зон (рис. 3 — «наихудший» режим, западный ветер, и «благоприятный» режим, южный ветер).



Западный ветер. Линии тока на высоте 2 м от поверхности земли

Западный ветер. Линии тока на высоте 6 м от поверхности земли

Южный ветер. Линии тока на высоте 2 м от поверхности земли

Южный ветер. Линии тока на высоте 6 м от поверхности земли

Рис. 3. Структура воздушного потока (линии тока) в пешеходных зонах комплекса высотных зданий (вид сверху)

Расчеты и визуализация направления и величины скорости воздушного потока между отдельными зданиями высотного комплекса позволили выявить наименее критичные застойные зоны (области синего цвета на рис. 3) и наиболее критичные области (зоны ярко-красного цвета на рис. 3), где при определенном сезонном направлении ветра могут реализоваться достаточно большие скорости движения воздуха в пешеходных зонах.

Накопленный специалистами компании «Т-Сервисы» опыт в области компьютерного моделирования аэродинамики высотных зданий и сооружений позволяет сделать вывод, что использование суперкомпьютеров дает возможность проводить массовые расчеты аэродинамических ветровых нагрузок для вновь строящихся и проектируемых высотных комплексов. Применение суперкомпьютеров позволяет на новом уровне решать реальные промышленные задачи высотного строительства, стоящие перед архитекторами, проектировщиками и строительными компаниями.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП 2.01.07-85\*. Нагрузки и воздействия. Строительные нормы и правила. М., 2009.
2. СТО 36554501-015-2008. Стандарт организации. ФГУП «НИЦ «Строительство». М., 2008.
3. МГСН 4.19-05 Многофункциональные высотные здания и комплексы. М., 2005.

# Суперкомпьютерное моделирование и допланетная химическая эволюция

