

Математическое моделирование сложных строительных конструкций и сооружений с использованием суперкомпьютеров

Ю.Я. Болдырев, Д.В. Климшин, А.С. Шанина

ГОУ «Санкт-Петербургский Государственный Политехнический университет»

На данный момент развитие компьютерных технологий достигло такого уровня, что появилась возможность с достаточно большой степенью точности моделировать сложные реальные объекты, уменьшить объем натурных экспериментов или, вообще, обходиться без них. С помощью высокопроизводительных вычислений стало возможно моделировать распределение воздушных потоков в масштабе целого микрорайона, поведение грунтовых массивов с использованием моделей грунтов, учитывающих их нелинейные свойства (drucker-prager, mohr-coulomb, cam-clay) на различных этапах строительства в 3-мерной постановке. Безусловно, это все очень вычислительно ресурсоемкие процессы [1], но их использование насущное требование практики. Для стандартных строительных конструкций такие затраты, как правило, неоправданны, но при проектировании уникальных объектов, высотных сооружений без таких технологий сегодня не возможно обойтись.

1. Введение

Существующие тенденции в строительстве (усложнение форм и нагрузок, индивидуальность, комбинированность конструкций и материалов), недостаточность нормативной базы, аварийность, принципиальная непредсказуемость разного рода воздействий и их сочетаний, уникальность каждого грунтового основания, геометрии самой конструкции, неопределенность и неполнота знаний о материалах и нагрузках вынуждают инженеров при проектировании проводить все более детальные исследования самих сооружений, их оснований и фундаментов. Причем большинство расчетов уже давно выходят за пределы установленных нормативных документов и используют сложные модели и современный математический аппарат. Разработка и совершенствование современных инженерных методов и математических технологий и их внедрение в сферу проектирования в строительной индустрии проводится с целью повышения надежности, безопасности и экономической эффективности зданий. На данный момент развитие компьютерных технологий достигло такого уровня, что появилась возможность с достаточно большой степенью точности моделировать сложные реальные объекты [2], уменьшить объем натурных экспериментов или, вообще, обходиться без них. С помощью высокопроизводительных вычислений стало возможно моделировать распределение воздушных потоков в масштабе целого микрорайона, поведение грунтовых массивов с использованием моделей грунтов, учитывающих их нелинейные свойства (drucker-prager, mohr-coulomb, cam-clay) [11] на различных этапах строительства в 3-мерной постановке. Безусловно, это все очень вычислительно ресурсоемкие процессы, но их использование насущное требование современной практики. Для стандартных строительных конструкций такие затраты неоправданны, но при проектировании уникальных объектов, высотных сооружений без таких технологий сегодня не возможно обойтись.

В данной статье приведен ряд задач строительной индустрии, для решения которых применены современные технологии математического моделирования в областях механики грунтов, вычислительной аэродинамики, строительной механики.

2.1 Расчет нелинейного поведения подкрановых колонн за пределом пластичности

Здесь нашей задачей является анализ устойчивости подкрановых колонн в нелинейной постановке с учетом упругопластической работы всех элементов [6]. Отметим, что такие колонны являются важными элементами конструкций в цехах промышленных предприятий. Данная за-

дача является особо актуальной при анализе возможности продления ресурса старых подкрановых колонн в промышленных цехах. При этом важным вопросом является возможность учета изменения толщины стенок профилей из-за ржавчины. Проводится сравнение результатов численного моделирования с аналитическими оценками (1) значения критической силы (Рис. 1):

$$P_{кр.аналит} = \frac{\pi^2 EJ}{l^2} \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 EJ}{l^2} \left(\frac{ab}{12EJ_b} + \frac{a^2}{24EJ_c} \right)}, \quad J = 2J_c + F_c \frac{b^2}{2}, \quad (1)$$

где E - модуль упругости материала, Fc - площадь поперечного сечения вертикальной ветви, Jb - момент инерции поперечного сечения распорки, Jc - момент инерции поперечного сечения вертикальной ветви относительно центральной оси, параллельной оси изгиба.

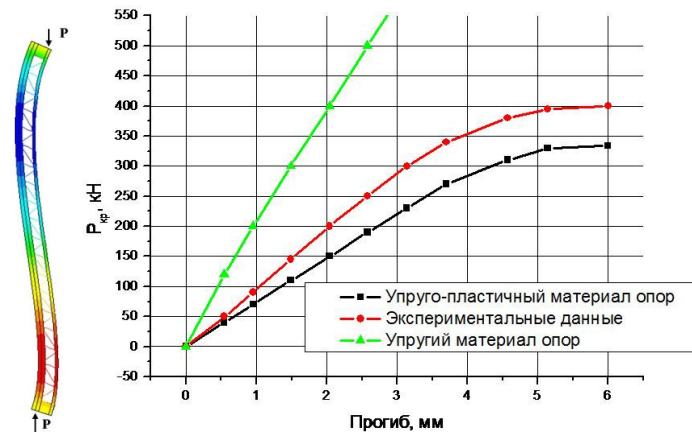


Рис. 1. Сравнение экспериментальных данных с результатами вычислений

2.2 Численное моделирование поведения уникальной металлической купольной конструкции диаметром 127 метров

Здесь представлены некоторые результаты расчета уникального металлического купола диаметром 127 метров (Рис. 2) [14], проведен выбор наилучшей конструктивной схемы [3], продемонстрирован расчет сложных узловых соединений в пространственной твердотельной постановке. Выявлено существование ряда ограничений и допущений, существенно влияющих на ход проектирования уникальных металлических конструкций. В частности, это касается методики учета жесткости узловых соединений конструкций [4], где необходимо проведение тщательного анализа того, что любой реальный узел металлической конструкции обладает некоей конечной жесткостью во всех направлениях, что не всегда учитывается в моделях современного проектирования. Представленные методики расчета позволяют учитывать реальную жесткость узловых соединений, анализировать поведение конструкции в нелинейной постановке.

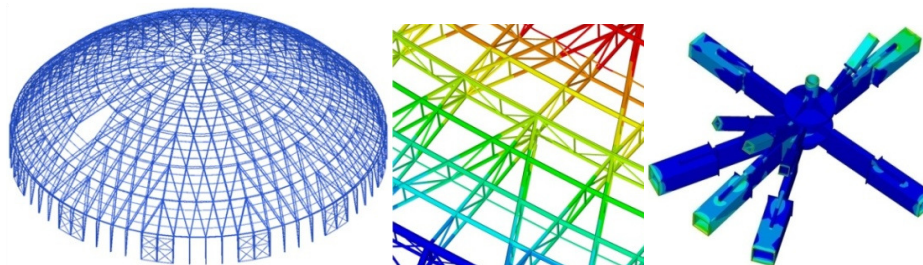


Рис. 2. Большепролетный металлический купол, результаты моделирования деформаций модели и поле напряжений отдельного узла в составе конструкции

2.3 Численное моделирование поведения бетонных конструкций со сложной геометрией с учетом напрягаемых элементов в теле бетона

В данном разделе представлена методика расчета бетонных конструкций со сложной геометрией с учетом напрягаемых элементов в теле бетона (Рис. 3, 4). Показано, что данная задача не может быть решена в большинстве программных комплексах из-за весьма существенных ограничений, как в инструментарии геометрического моделирования, так и в возможностях учета нелинейного взаимодействия бетона с напрягаемыми тросами. Отмечено, что применение напрягаемых тросов в конструкциях сооружений, является одной из наиболее сложных задач современного проектирования уникальных зданий, требующей дальнейших исследований [5]. В частности одной из проблем является методика учета скольжения троса в теле бетона, для чего в данной работе применяется специальное условие скользящего сопряжения (2):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{U_X^B - U_X^T}{U_Y^B - U_Y^T}; U_Z^B = U_Z^T \quad (\text{Б} - \text{бетон, Т} - \text{трос}) \text{ и жесткого сопряжения} \quad (2)$$

$$U_X^B = U_X^T; U_Y^B = U_Y^T; U_Z^B = U_Z^T$$

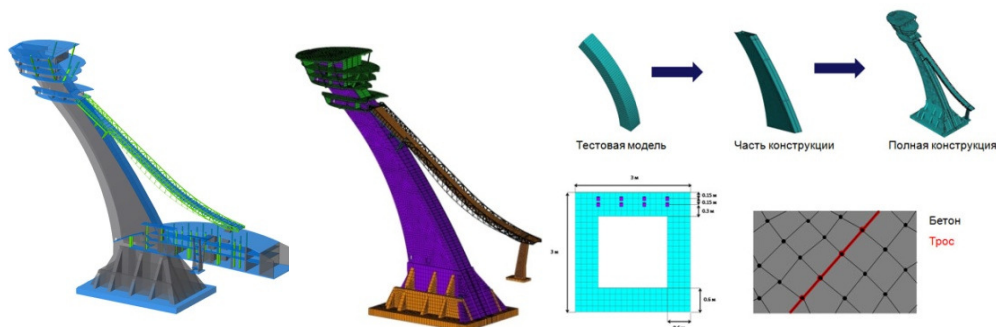


Рис. 3. Сооружение бетонного трамплина

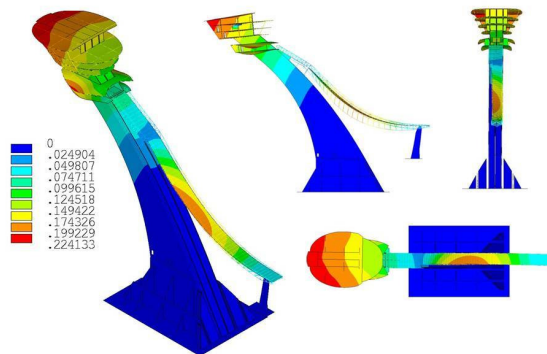


Рис. 4. Результаты применения разработанной методики – перемещения элементов сооружения (м)

С учетом возрастающей сложности возводимых сооружений, одним из наиболее перспективных направлений становится проектирование зданий с напрягаемыми элементами, которое представлено в работе. Основными преимуществами данного направления являются суммарная экономическая эффективность проведения монолитных работ и возведения сооружения в целом, сокращение расхода стали и бетона до 50%, а следовательно, и облегчение здания в 2-3 раза, уменьшение толщины перекрытия, значительное увеличение безопорных пролетов перекрытия [7], приобретение высокой несущей способности перекрытий всего за 3-4 дня, снижение суммарных затрат на строительство более чем в 2 раза.

2.4 Численное моделирование ветрового воздействия на комплекс трамплинов

Численное моделирование ветрового воздействия на здания и сооружения относится к классу задач прикладной аэродинамики. При проектировании высотных зданий важно полу-

чить детальную картину обтекания их ветром [7], при этом для объектов сложной формы, таких как рассматриваемый многофункциональный комплекс, такая задача, при решении ее в полном объеме (т.е. с учетом всех особенностей архитектурного решения фасада и ветрового профиля, - нарастания скорости ветра с высотой) достаточно трудоемка даже для современных программных комплексов и требует применения суперкомпьютерных ресурсов. Такой класс задач относится к области турбулентных течений за плохообтекаемыми телами, включая и отрывные течения.

Важным обстоятельством является то, что для данных объектов требуются испытания в аэродинамических трубах. Подобные эксперименты имеют ряд существенных недостатков таких как высокая стоимость их проведения, сложность изготовления моделей объектов, ограниченное количество обдуваемых направлений, и как следствие, качество оценки результатов.

Современные методы математического моделирования с использованием суперкомпьютеров позволяют:

- существенно сократить количество испытаний в аэродинамических трубах и в перспективе отказаться от них;

- уделить особое внимание тонким вопросам вибрационного и шумового воздействия ветрового потока в зонах углов здания и выступающих элементов, которые трудно реализуемы в физическом эксперименте;

- определять оптимальную по ряду критериев форму, размеры и ориентацию здания (например, исходя из минимизации отрицательного воздействия наружных климатических условий на энергетический баланс здания);

- разработать комплексную оценку влияния сооружений на окружающую застройку.

В данной работе представлено моделирование обтекания трамплинов спортивного комплекса. Используемый программный комплекс: ANSYS CFX (входит в состав вычислительной среды инженерного анализа ANSYS Workbench)

Проведен численный расчет турбулентного несжимаемого течения на основе решения системы уравнений Навье-Стокса (3), в состав которой входят уравнение неразрывности и уравнение переноса импульса:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

где u_j - ($j=1,2,3$) компоненты вектора скорости, p и ρ - давление и плотность воздуха, соответственно, а τ_{ij} - тензор напряжений для Ньютоновской жидкости (4):

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad , \quad (j,i=1,2,3), \quad (k=1,2,3) \quad (4)$$

где μ – динамическая вязкость воздуха, а S_{ji} – тензор скоростей деформаций (5):

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

Приведены результаты моделирования движения воздушных потоков в масштабе всего комплекса с учетом спортивного стадиона с трибунами, 2 трамплинов и рельефа местности с существенными перепадами высот (Рис. 5)[12]. Расчеты проводились на основе численного решения трехмерных уравнений аэродинамики с учетом турбулентности внешнего ветрового потока на основе модели k-ε. Уравнения движения преобразуется к виду, в котором добавлено влияние флуктуации средней скорости (в виде турбулентной кинетической энергии) и процесса уменьшения этой флуктуации за счет вязкости (диссипации). В данной модели решается 2 дополнительных уравнения для переноса кинетической энергии турбулентности и диссипации турбулентности.

Приведены результаты решения задач, в рамках которых определены аэродинамические коэффициенты ветрового давления на здания с учетом взаимного влияния сооружения друг на друга.

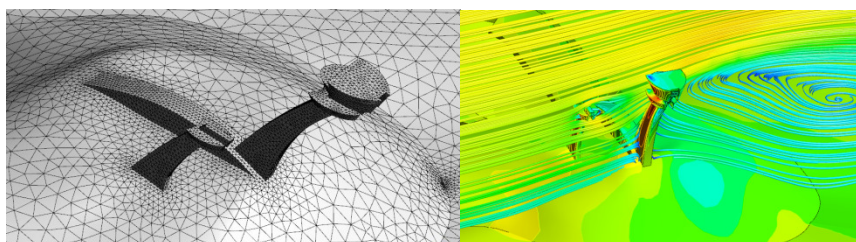


Рис. 5. Конечно - элементная сетка и характерное распределение воздушных потоков вокруг трамплина

2.5 Численное моделирование осадки комплекса трамплинов

Применение технологий математического моделирования [12] используется для расчета грунтовых массивов под сооружениями лыжных трамплинов с учетом взаимного влияния фундаментов [8,9]. Для этого разработана конечно-элементная модель грунтового массива, находящегося под трамплинами спортивного комплекса (Рис. 6). Проведены сравнительные расчеты в программных комплексах ANSYS/CIVILFEM и PLAXIS [13]. Также произведен линейный и нелинейный расчеты по деформациям массива грунта при совместном взаимодействии основания со всеми зданиями.

Осадки одного из трамплинов комплекса (Hs140) и примыкающего к нему зданию, полученные при учете нелинейных свойств, не удовлетворили нормативным требованиям [8,10].

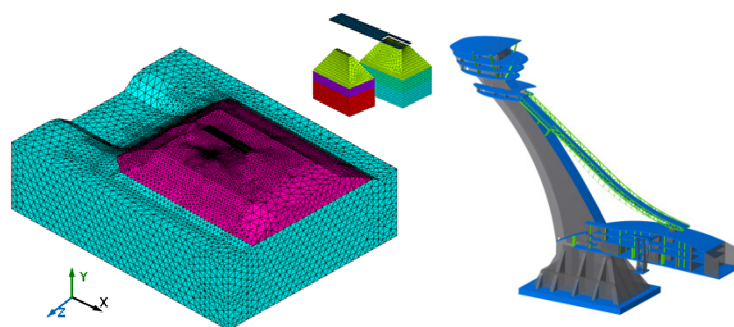


Рис. 6. Конструкция трамплина и насыпной грунтовой массив.

В результате, было предложено усиление насыпи и усиление подстилающего слоя, либо замена свайного фундамента на кессонный.

2.6 Численное моделирование поведения спуска в подземный пешеходный переход и влияние последствий строительства на пролегающий под ним канализационный коллектор

Был выполнен комплекс вычислительных исследований, направленный на определение условий, при которых возможно строительство спуска в подземный пешеходный переход, расположенного непосредственно над тоннельным канализационным коллектором, а также мероприятий по сохранности:

- 1) существующего тоннельного канализационного коллектора при строительстве и эксплуатации подземного пешеходного перехода;
- 2) подземного пешеходного перехода в случае аварии на тоннельном канализационном коллекторе.

Рассмотрены последовательно следующие этапы: до начала строительства ППП (подземного пешеходного перехода), разработка строительного котлована, нормальная эксплуатация ППП и ТКК (тоннельный канализационный коллектор) и аварийная ситуация при частичном обрушении коллектора. Предложено конструктивное решение защитного моста между ТКК и

ППП. Ниже показаны (Рис.7) показаны КЭ модель нормальной эксплуатации ППП, конструктивное решение подземного защитного моста.

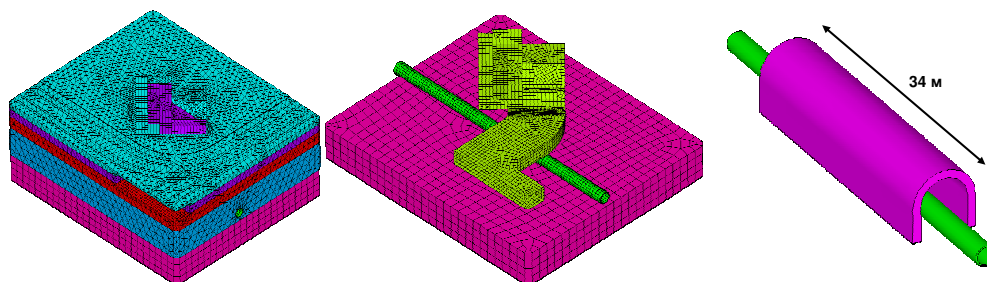


Рис. 7. КЭ модель нормальной эксплуатации ППП, конструктивное решение подземного защитного моста.

Результаты данного исследования использованы НИИ «Севзапінжтехнологія» при расчетном обосновании проекта подземного пешеходного перехода у станции метро «Академическая» в Санкт - Петербурге и при разработке патента № 60166 на полезную модель «Экранирующая конструкция между инженерным сооружением и находящимся под ним трубопроводом» (патентообладатель – Научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт «Севзапінжтехнологія»).

3. Выводы

Важнейшим выводом, который можно сделать по результатам данной работы является вывод о возможности и даже более о насущной необходимости применения современных технологий математического моделирования с использованием суперкомпьютеров для решения междисциплинарных задач инженерного анализа в сфере строительства. О насущной необходимости имеет смысл говорить по той простой причине, что «по большому счету» такому подходу нет альтернативы, поскольку большинство расчетов, как отмечалось, уже давно выходят за пределы установленных нормативных документов, используют сложные численные модели, современный математический аппарат и требуют мощных вычислительных ресурсов. Будучи уже весьма востребованными сегодня и, несомненно, все более востребованными в будущем, такие технологии требуют пристального внимания с многих точек зрения. Это и вопросы корректного применения программных комплексов и корректных же постановок задач в них, вопросы адекватности моделей и их адаптации к отечественной строительной сфере. Но только с их помощью возможно решать уникальные и не имеющие аналогов задачи проектирования зданий и сооружений и обеспечить конструкциям надлежащую надежность, безопасность и экономическую эффективность.

Литература

1. Болдырев Ю.Я. Суперкомпьютерные технологии - как современное воплощение междисциплинарного подхода в научно-образовательной деятельности// Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. № 4(103) 2010. СПб., Изд-во Политехнического ун-та. 2010. С. 99-105.
2. Болдырев Ю.Я., Лупуляк С.В., Петухов Е.П., Шиндер Ю.К. Моделирование на суперЭВМ обтекания затвора судопропускного сооружения С1 системы защиты Санкт - Петербурга от наводнений. Книга. Суперкомпьютерные технологии в науке и образовании (ред. В.А.Садовничий, Г.И.Савин, В.В.Воеводин). Изд-во МГУ, Москва, 2009. С. 89-95
3. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. – К., издательство «Факт», 2005. – 344 с.

4. Александров А.В. Лашеников Б.Я., Шапошников Н.Н; под редакцией Смирнова А.Ф. Строительная механика. Тонкостенные пространственные системы: учебник для вузов. М., Стройиздат, 1983-488с., ил.
5. Современное высотное строительство. Монография. М., ГУП "ИТЦ Москомархитектуры", 2007г. 400 с., ил.
6. Городецкий А.С. Вопросы расчета конструкций в упругопластической стадии с учетом применения ЭЦВМ.//ЭЦВМ в строительной механике. Труды первого всесоюзного совещания по применению ЭЦВМ в строительной механике (г. Ленинград, 1963г.). Л., М., Издательство литературы по строительству, 1966.
7. Николаев С.В. Безопасность и надежность высотных зданий - это комплекс высокопрофессиональных решений//UST-Build - 2004. Инф. сб., 2004. С. 8-18.
8. СП 52-102-2003 «Проектирование и устройство свайных фундаментов»
9. Терцаги К., Пек. Р. Механика грунтов в инженерной практике. М., 1958.
10. Малышев М.В. Прочность грунтов и устойчивость оснований и сооружений. М., Стройиздат, 1980
11. Schanz, T., Vermeer, P.A., Bonnier, P.G., (1999). The Hardening-Soil model: Formulation and verification. In: R.B.J. Brinkgreve, Deyond 2000 in Computational Geotechnics. Balkema, Rotterdam: 281-290
12. Болдырев Ю.Я., Климшин Д.В., Романов С.В., Шанина А.С.. Современные технологии математического моделирования для инженерного анализа и проектирования в строительстве. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. № 4(103) 2010. СПб., Изд-во Политехнического ун-та. 2010. С.106 -111.
13. Белов В.В., Болдырев Ю.Я., Романов С.В., Шанина А.С.. Опыт применения математического моделирования грунтовых оснований зданий и сооружений // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. № 5(108) 2010. СПб., Изд-во Политехнического ун-та. 2010. С. 103 - 108.
14. Белов В.В., Болдырев Ю.Я., Климшин Д.В., Шанина А.С. Современные технологии математического моделирования при расчетах большепролетных металлических сооружений// Научно-технические ведомости. Информатика. Телекоммуникации. Управление. № 5(108) 2010. СПб., Изд-во Политехнического ун-та. 2010. С. 151 - 156.