

Опубликовано: В.Л. Якушев, В.Н. Симбиркин, А.В. Филимонов. Решение большемерных задач строительной механики методом конечных элементов в программном комплексе STARK ES// Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы: Сб. трудов международной научно-практической конференции. – М.: МГСУ, 2010. – С. 516-526.

Решение большемерных задач строительной механики методом конечных элементов в программном комплексе STARK ES

В.Л. Якушев, В.Н. Симбиркин, А.В. Филимонов

Учреждение РАН «Институт автоматизации проектирования», ООО «Еврософт», г. Москва, Россия

1. Введение

В России развернута работа по реализации крупномасштабных строительных проектов. К их числу относится, например, строительство комплекса «Москва-Сити», высотных зданий в Москве, Санкт-Петербурге, Сочи, Новороссийске и других крупных городах, а также уникальных спортивных сооружений (Олимпийские объекты в Сочи, новый футбольный стадион на Крестовском острове в Санкт-Петербурге и др.). Кроме того, за последние годы произошел ряд аварий и катастроф с разрушением строительных объектов, например, Аквапарк и Басманного рынка в Москве, машинного зала Саяно-Шушенской ГЭС и др. Это способствовало ужесточению требований к расчетным моделям сооружений и точности их реализации численными методами.

В ходе научно-исследовательских и проектных работ возникла необходимость существенного развития вычислительных средств и информационных технологий для обеспечения надежности и экономичности строительства и эксплуатации указанных объектов. Сейчас предъявляются всё большие требования к подробности конечно-элементных моделей сооружений, и, следовательно, растет размерность моделей, что делает невозможным их анализ на располагаемой оперативной памяти персональных ЭВМ. Актуальной проблемой также является достижение высокой скорости решения задач.

Следует заметить, что проектирование многих крупных строительных объектов в России уже сейчас выполняется проектно-строительными фирмами Европы, США и других стран. Эти фирмы имеют соответствующий опыт, в том числе в применении программных продуктов и вычислительных систем большой мощности. К сожалению, в России разработки САЕ- и САД-систем для автоматизации инженерных расчетов и конструирования в строительстве никем не финансируются, разработка программного обеспечения ведется небольшими фирмами за счет средств, получаемых, в основном, от другой коммерческой деятельности. В дальнейшем отсутствие отечественных исследований и разработок в данном направлении приведет к тотальному господству в инженерной практике западных программных продуктов и технологий, как это уже произошло в ряде отраслей.

Разработка отечественного САЕ-продукта, в том числе для мощных ЭВМ с параллельной архитектурой, соответствует современным тенденциям развития автоматизации исследований и проектирования в строительстве. При этом могут быть более полно реализованы перспективные отечественные подходы к расчету строительных конструкций с использованием единых трехмерных

Опубликовано: В.Л. Якушев, В.Н. Симбиркин, А.В. Филимонов. Решение большемерных задач строительной механики методом конечных элементов в программном комплексе STARK ES// Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы: Сб. трудов международной научно-практической конференции. – М.: МГСУ, 2010. – С. 516-526.

моделей всех несущих конструкций сооружения и основания, учитывающих пространственный характер воздействий, физическую и геометрическую нелинейность, технологию и последовательность возведения конструкций и другие важные факторы.

В качестве базы для внедрения высокоэффективных алгоритмов использован программный комплекс STARK ES, разработанный в ООО «ЕВРОСОФТ» (Москва, Россия) и предназначенный для расчета пространственных строительных конструкций на прочность, устойчивость и колебания [4,6].

2. Метод подконструкций

Одним из эффективных методов решения большемерных задач строительной механики в форме метода конечных элементов (МКЭ) является технология подконструкций [2,3,5]. При применении этого метода, во-первых, требования к оперативной памяти существенно уменьшаются, т.к. нет необходимости создавать и хранить в оперативной памяти компьютера полную матрицу жесткости для всей модели. Во-вторых, данные по подконструкциям независимы, что позволяет эффективно распараллелить задачу и существенно сократить время ее решения. Это особенно важно при решении нелинейных задач [8]. Дополнительно, при небольшой модификации метода можно получить существенные организационные выгоды, такие как возможность выделения однотипных «супер-элементов», разделение конструкции на линейную и нелинейную или на постоянную и моделируемую части и т.п.

В STARK ES метод подконструкций реализован еще в 1990-х годах и широко используется в практике строительного проектирования.

Рассмотрим решение задачи статического расчета методом подконструкций для модели стадиона в Санкт-Петербурге, содержащей свыше 2.5 миллионов степеней свободы (рисунок 1).

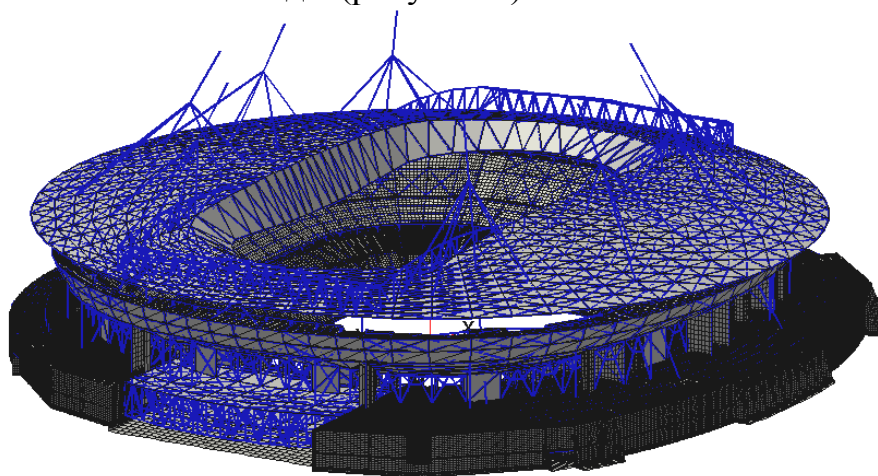


Рисунок 1. Конечно-элементная модель стадиона

При решении данной задачи была построена древовидная структура подконструкций, в которой одни подконструкции состояли из других, тем самым давая возможность не решать систему уравнений сразу относительно

всех внешних переменных, а находить их постепенно. Таким образом модель стадиона была разбита на 43 подконструкции, дерево исключения для которых показано на рисунке 2. Латинскими буквами обозначены названия подконструкций, некоторые из которых показаны на нижеприведенном рисунке 3.

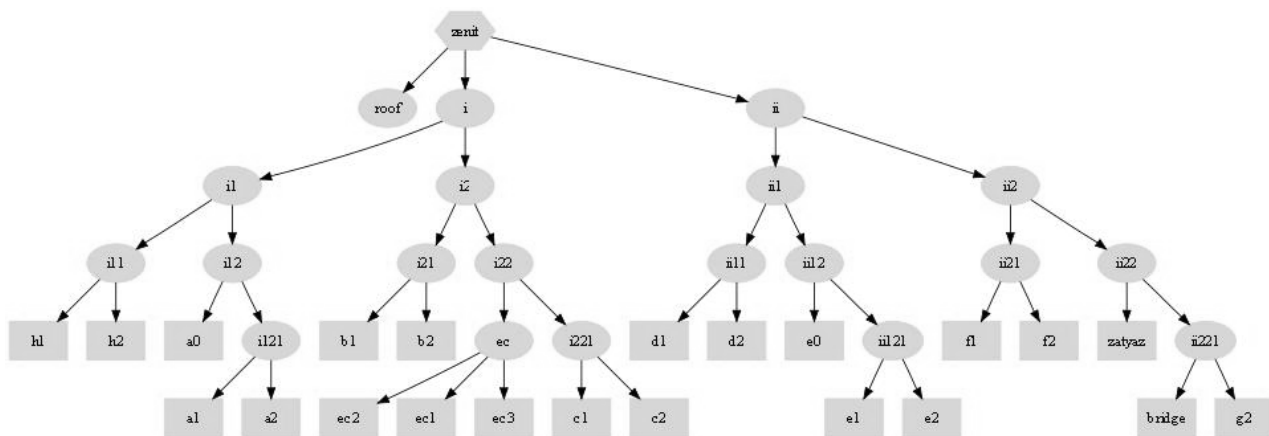


Рисунок 2. Дерево исключения

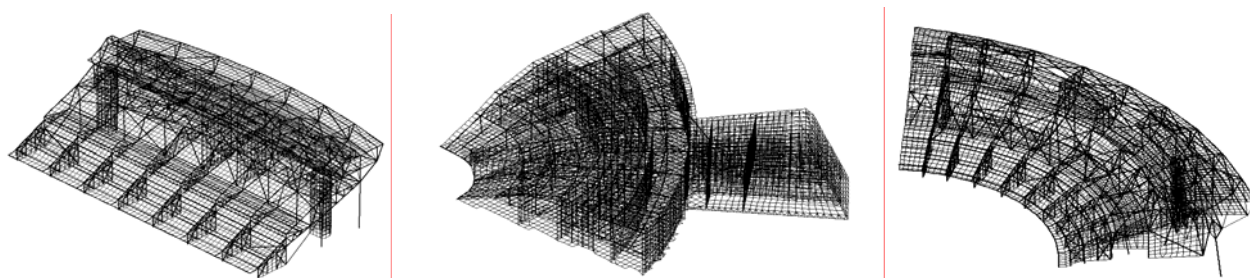


Рисунок 3. Вид отдельных подконструкций: слева - трибуны верхнего уровня, секция «А», в центре - трибуны нижнего уровня, секция «В», справа - трибуны верхнего уровня, секция «Н»

На этом примере установлено, что требования к оперативной памяти существенно уменьшаются. Если для матрицы жесткости всей конструкции необходимо 5664 Мб оперативной памяти, то для нахождения в памяти одной самой большой подконструкции достаточно 727 Мб, что существенно увеличивает порядок решаемой задачи.

3. Фронтальные методы

Другим способом, позволяющим решать системы уравнений МКЭ большой размерности, может служить фронтальный метод исключения неизвестных [1,7].

Фронтальный метод позволяет произвести факторизацию матрицы жесткости путем сборки и исключения уравнений только для её части. Элементы матрицы жесткости могут быть получены заранее и записаны на диск или создаваться во время решения. Часть неизвестных, которая участвует в исключении на каждом шаге, называется фронтом и образует фронтальную матрицу. Для получения решения необходимо нахождения в памяти только фронтальной матрицы, т.к. после исключения части уравнений, вычисленные

Опубликовано: В.Л. Якушев, В.Н. Симбиркин, А.В. Филимонов. Решение большемерных задач строительной механики методом конечных элементов в программном комплексе STARK ES// Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы: Сб. трудов международной научно-практической конференции. – М.: МГСУ, 2010. – С. 516-526.

элементы факторизованной матрицы жесткости не изменяются и могут быть сохранены на диск. При одновременной обработке нескольких независимых фронтов метод называется мультифронтальным и может быть распараллелен.

Таким образом, так же, как и метод подконструкций, фронтальный метод не требует хранить в памяти полную матрицу жесткости для всей модели и может эффективно использоваться для организации параллельных вычислений.

В настоящее время данный метод реализован в ПК STARK ES 2011 2RUN для применения на персональных ЭВМ.

Приведем сопоставительные данные по производительности двух рассматриваемых методов решения систем линейных уравнений в STARK ES. Для анализа отобран ряд конечно-элементных моделей проектируемых строительных объектов из практики института ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Основные характеристики расчетных моделей сооружений представлены в таблице 1, а на рисунках 1 и 4 приведен общий вид некоторых из них.

Таблица 1. Описание моделей строительных конструкций

№ п/п	Наименование объекта	Кол-во узлов	Кол-во конечных элементов	Кол-во степеней свободы	Плотность матрицы жесткости, %
1	Оболочка покрытия 2-й сцены Мариинского театра, С.-Петербург	22 733	6 670	40 020	0.261
2	Спортивно-досуговый центр	15 801	14 797	88 782	0.251
3	Нефтедобывающая платформа	28 623	17 312	98 650	0.249
4	Горнолыжный спуск «Воробьевы Горы», Москва	34 822	18 760	112 560	0.166
5	Высотное здание комплекса «Новосити», Новороссийск	33 612	32 626	195 024	0.139
6	22-эт. здание по ул. Параллельная, Сочи	41 257	48 267	247 542	0.149
7	Жилой комплекс «Корол. парк», Сочи	62 408	42 762	256 572	0.222
8	Высотное здание «Москва-Сити», Н=380 м	125 932	178 059	755 592	0.048
9	Стадион «Газпром-Арена», С.-Петербург, модель I	230 386	159 686	798 230	0.026
10	Большая ледовая арена, Сочи	172 285	148 315	889 890	0.047
11	Высотное здание 1	270 695	284 000	1 623 600	0.014
12	Стадион «Газпром-Арена», С.-Петербург, модель II (см. рис. 1)	426 071	577 500	2 534 446	0.012

Опубликовано: В.Л. Якушев, В.Н. Симбиркин, А.В. Филимонов. Решение больших задач строительной механики методом конечных элементов в программном комплексе STARK ES// Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы: Сб. трудов международной научно-практической конференции. – М.: МГСУ, 2010. – С. 516-526.

13	Высотное здание 2	541 295	568 000	3 247 200	0.006
14	Высотное здание 3	811 895	852 000	4 870 800	0.004
15	Высотное здание 4	1 339 015	1 403 570	8 033 520	0.003

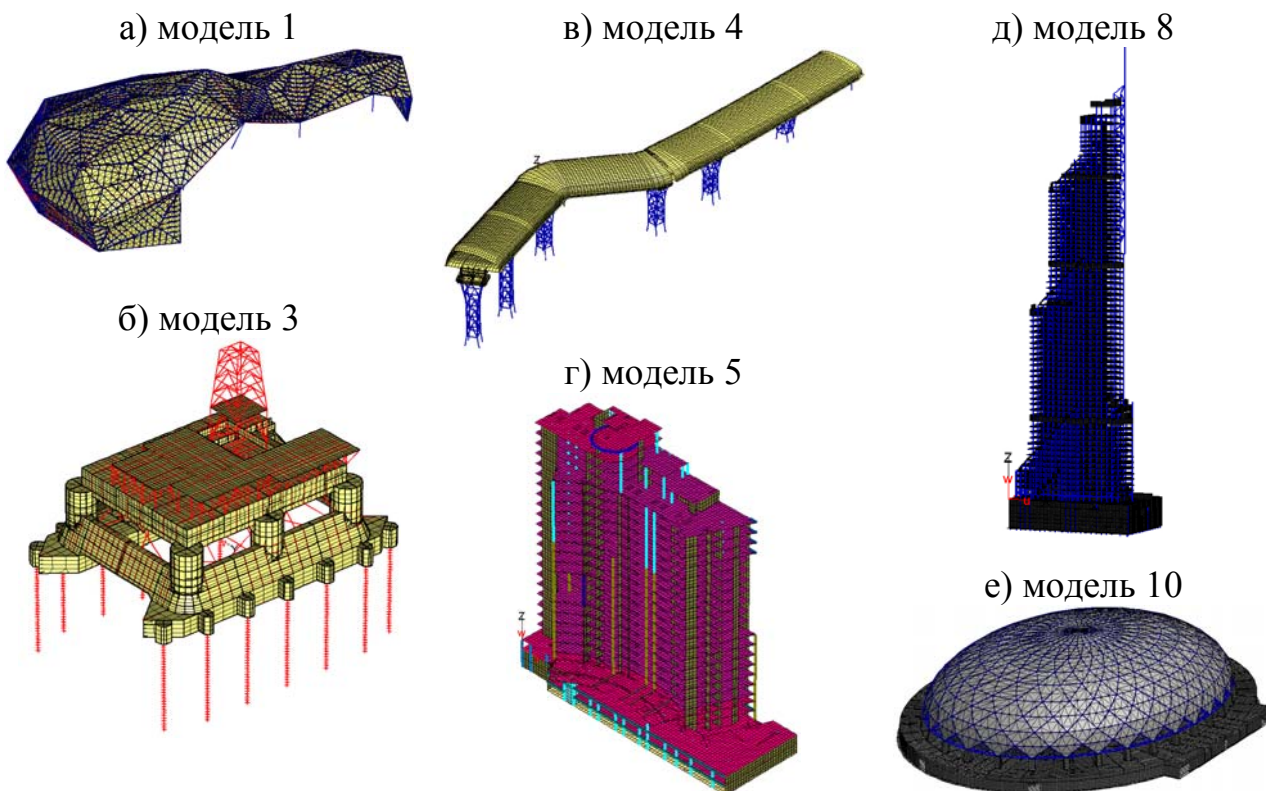


Рисунок 4. Общий вид конечно-элементных моделей сооружений.

В представленной выборке примеров присутствуют разнообразные по своим свойствам модели сооружений различной архитектурной формы с числом неизвестных узловых перемещений от сорока тысяч до восьми миллионов.

В табл. 2 приведено время решения задачи линейного статического расчета рассматриваемых моделей двумя методами. Приведенные данные получены с использованием только одного вычислительного ядра процессора.

Таблица 2. Продолжительность решения задач линейной статики (Intel Core 2 Duo E6400, 2133 МГц, 2048 Мб RAM, ОС MS Windows XP)

Номер модели	Кол-во нагружений	Время расчета, мин		t_s/t_f
		с использованием метода подконструкций (STARK ES 2010), t_s	с использованием фронтального метода (STARK ES 2011), t_f	
1	13	0.73	0.22	3.3
2	13	0.85	0.7	1.2
3	28	1.35	0.7	1.9
4	1	1.07	0.5	2.1
5	35	7.77	1.87	4.2
6	28	7.55	3.32	2.3
7	4	10.98	5.9	1.9
8	15	24.88	10.73	2.3
9	32	14.0	7.78	1.8
10	25	42.76	18.7	2.3
11	2	12.42	10.32	1.2
12	32	63.33	44.78	1.4
13	2	-	23.55	-
14	2	-	43.43	-
15	2	-	54.85	-

Данные из таблицы 2 показывают, что фронтальный метод решения систем уравнений обеспечивает скорость решения задач линейной статики строительных конструкций в среднем в 2.1 раза выше, чем метод подконструкций. Кроме того, этим методом можно анализировать задачи размерностью до восьми миллионов неизвестных, что в STARK ES не представляется возможным с помощью других методов.

4. Решение задач на собственные значения

При численном исследовании работы сооружений при динамических воздействиях используется расчет конструкций на собственные колебания. Он сводится к нахождению собственных значений и векторов большемерных матриц. К задаче на собственные значения приводится и расчет конструкций на устойчивость.

Для анализа эффективности численных методов были выбраны два наиболее распространенных метода решения задач на собственные значения – метод итерирования подпространства и блочный метод Ланцоша со сдвигами [1]. Оба метода реализованы в ПК STARK ES 2011 2RUN. При этом алгоритм метода итерирования подпространства использован совместно с методом подконструкций, а метод Ланцоша использован совместно с фронтальным методом исключения неизвестных.

Опубликовано: В.Л. Якушев, В.Н. Симбиркин, А.В. Филимонов. Решение большемерных задач строительной механики методом конечных элементов в программном комплексе STARK ES// Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы: Сб. трудов международной научно-практической конференции. – М.: МГСУ, 2010. – С. 516-526.

В таблице 3 приведена продолжительность решения задачи собственных колебаний двумя методами для моделей из таблицы 1. Во всех случаях метод Ланцоша оказался быстрее метода итерирования подпространства (в среднем – в 26 раз), а для модели 1 выигрыш в скорости решения составил более 150 раз.

Таблица 3. Продолжительность решения проблемы собственных значений (Intel Core 2 Duo E6400, 2133 МГц, 2048 Мб RAM, ОС MS Windows XP)

Номер модели	Кол-во искомым собств. пар	Время расчета, мин		t_p/t_L
		методом итераций подпространств (STARK ES 2010), t_p	методом Ланцоша (STARK ES 2011), t_L	
1	200	463.0	3.0	154.3
2	200	285.2	10.9	26.2
3	25	16.9	2.8	6.0
	40	24.6	2.5	9.8
	100	214.2	5.5	38.9
	150	424.8	6.4	66.4
4	150	506.5	5.9	85.8
5	40	745.4	18.6	40.1
6	20	216.0	20.1	10.7
7	25	406.2	70.4	5.8
8	6	79.5	58.6	1.4
9	25	200.7	90.8	2.2
	40	375.2	94.8	4.0
	90	629.9	249.0	2.5
	200	4377.0	659.7	6.6
10	75	1344.2	946.7	1.4
11	10	83.5	50.0	1.7
12	10	725.2	648.3	1.1
13	10	-	266.2	-
14	6	-	938.9	-

Кроме того, выполнен анализ скорости сходимости рассматриваемых методов при различном числе определяемых собственных значений на примере двух расчетных моделей. Полученные графики представлены ниже. Кривая с треугольниками соответствует методу Ланцоша, а с кружками – методу итерирования подпространства.

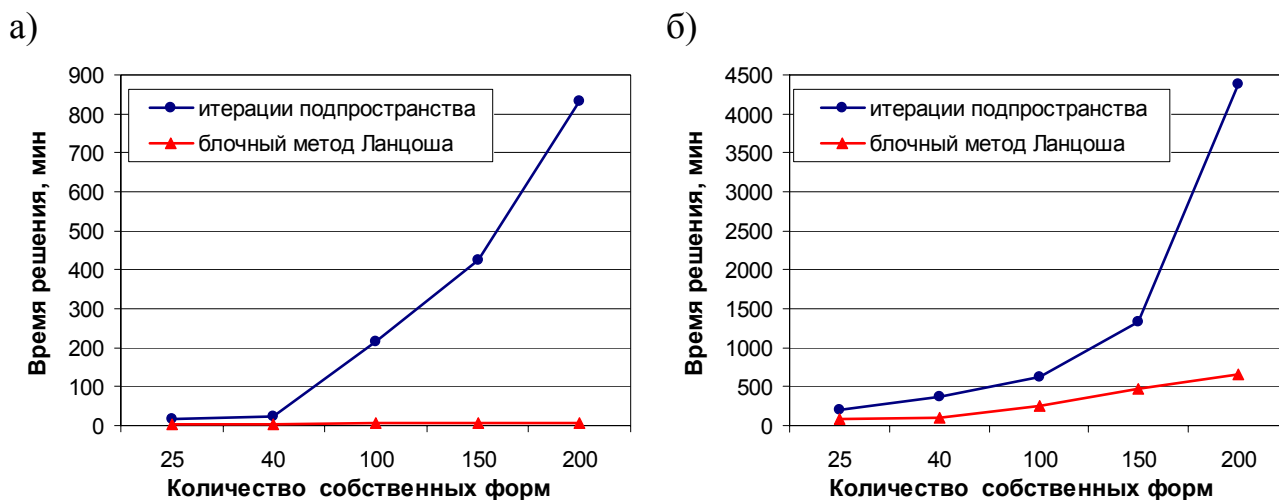


Рисунок 5. Скорость решения задачи на собственные значения для модели 3 (а) и для модели 9 (б).

Из рисунка 5 видно, что у метода итерирования подпространства при возрастании количества собственных форм значительно уменьшается скорость сходимости и увеличивается время решения задачи (в теории – экспоненциально), а скорость метода Ланцоша остается практически постоянной.

Следует заметить, что достигнутое увеличение скорости решения задачи обязано не только собственно методу Ланцоша, но и более эффективному алгоритму факторизации матриц высокого порядка на основе мультифронтального метода, реализованному в сочетании с методом Ланцоша (это видно из таблицы 2). Метод же итераций подпространства при расчетных схемах относительно большой размерности использован только в сочетании с методом подконструкций.

5. Выводы

1. Представляется целесообразным продолжить развитие **отечественных** разработок по реализации эффективных численных методов решения большемерных задач строительной механики на персональных и высокопроизводительных ЭВМ.

2. В программном комплексе STARK ES 2011 наиболее эффективными оказались мультифронтальный метод для решения систем линейных алгебраических уравнений и блочный метод Ланцоша со сдвигами для решения задач на собственные значения. Эти методы позволили увеличить размерность решаемых на ПЭВМ задач до восьми миллионов неизвестных, а также существенно увеличить скорость решения задач по сравнению с другими используемыми в программе методами.

3. В ближайшей перспективе видится применение итерационных методов [1,7] наряду с прямыми методами решения систем линейных уравнений, а также более широкое использование возможностей высокопроизводительных

Опубликовано: В.Л. Якушев, В.Н. Симбиркин, А.В. Филимонов. Решение большемерных задач строительной механики методом конечных элементов в программном комплексе STARK ES// Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы: Сб. трудов международной научно-практической конференции. – М.: МГСУ, 2010. – С. 516-526.

вычислительных систем, имеющих распределенную многопроцессорную архитектуру.

Список литературы

1. Bathe, K.-J. Finite Element Procedures. – New Jersey: Prentice Hall, 1996. – 1037 р.
2. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И., Потапенко А.Л. Методы динамического синтеза подконструкций в задачах моделирования сложных инженерных систем// Строительная механика и расчет сооружений. – 2006. – №6. – С. 45-52.
3. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. – М.: Изд-во АСВ, 2009. – 360 с.
4. Жук Ю.Н., Симбиркин В.Н. Программный комплекс STARK ES// Современное высотное строительство: монография. – М.: ИТЦ Москомархитектуры, 2007. – 464 с.
5. Жук Ю.Н., Симбиркин В.Н., Филимонов А.В., Якушев В.Л. Применение метода подконструкций для решения больших задач методом конечных элементов// С.-Петербургский научный форум «Наука и общество», Информационные технологии: Тезисы докладов, С.-Петербург, 21-25 сентября 2009 г. – С. 255-259.
6. Симбиркин В.Н., Фросин А.В. Развитие и взаимодействие компонентов автоматизированной системы инженерного анализа СТАРКОН для массового применения в строительстве// Строительная механика и расчет сооружений. – 2010. – №5. – С. 67-71.
7. Фиалко С.Ю. Сопоставление прямых и итерационных методов решения больших конечно-элементных задач строительной механики// В кн.: Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – К.: Сталь, 2002. – С. 552-569.
8. Якушев В.Л. Устойчивость тонкостенных конструкций с учетом начальных несовершенств // Строительная механика. – 2010. – № 1. – С. 43-46.