

УДК 624.04

В. А. Игнатьев, А. В. Игнатьев, И. С. Завьялов

Волгоградский государственный технический университет

ТЕХНИКА ФОРМИРОВАНИЯ РЕДУЦИРОВАННЫХ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ СЛАУ ВЫСОКИХ ПОРЯДКОВ, ОПИСЫВАЮЩИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОДНОМЕРНЫХ И ДВУМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассматриваются проблемы, возникающие при применении метода конечных элементов к расчету сложных конструкций и сооружений, представленных расчетными схемами с большим числом конечных элементов. Описан разработанный алгоритм редуцирования конечно-элементных СЛАУ высокого порядка, описывающих напряженно-деформированное состояние одномерных и двумерных конструкций. Выполнен расчет и анализ результатов расчета пластинки на основе алгоритма редуцирования конечно-элементной системы уравнений с аналитическим результатом и результатами, полученными на основе метода конечных элементов в форме классического смешанного метода.

Ключевые слова: метод конечных элементов в форме классического смешанного метода, изгибаемая тонкая пластинка, системы линейных алгебраических уравнений высоких порядков, редуциционный метод, алгоритм построения редуцированной системы уравнений.

Введение

Метод конечных элементов (МКЭ) — один из наиболее распространенных и эффективных методов численного анализа, который широко используется в инженерных расчетах и научных исследованиях. При решении задач строительной механики МКЭ чаще всего используется в виде метода перемещений. Изучение существующих публикаций по теории МКЭ и практике его применения в программных комплексах показало, что традиционная форма МКЭ в перемещениях, лежащая в основе многих программных комплексов, имеет свои преимущества, но существует также ряд нерешенных проблем, которые могут повлиять на точность результатов расчетов и требуют верификации. Эти нерешенные проблемы традиционной формы МКЭ в перемещениях способствовали развитию других форм МКЭ: МКЭ в напряжениях, МКЭ в виде метода сил, МКЭ в смешанной форме и гибридных вариантах [1—6]. В частности, авторы разрабатывают метод конечных элементов в форме классического смешанного метода строительной механики. Его теоретическое обоснование, разработка соответствующих физических и математических моделей конечных элементов и алгоритмов расчета различных типов конструкций и сооружений в линейной и нелинейной постановке приведены в работах [7, 8] и др.

Принимая во внимание тенденции к усложнению архитектурно-конструктивных решений и повышению требований к точности расчета моделей зданий и сооружений, расчеты на статику, динамику и устойчивость с использованием программных комплексов, реализующих МКЭ, приводят к увеличению размерности задач (порядок матриц коэффициентов при неизвестных достигает 2 млн уравнений и более).

Также стоит отметить, что на этапе оптимизации конструктивных решений при поиске приемлемого проектного решения может возникать необходимость неоднократно вносить изменения в расчетную модель и повторять расчет на каждом этапе изменения расчетной схемы.

Кроме того, большинство задач строительной механики плохо обусловлены из-за использования различных типов конечных элементов, большого разброса жесткости и нерегулярных сеток.

В этом случае традиционные методы решения СЛАУ оказываются неэффективными, и возникает потребность в разработке высокопроизводительных методов, учитывающих разреженность матриц, устойчивых к плохой обусловленности и могущих эффективно работать с ограниченным объемом памяти в условиях задач большой размерности.

Следует отметить, что обычно решение СЛАУ занимает большую часть времени расчета задачи на компьютере. Кроме того, от этого этапа напрямую зависит качество и точность решения задачи в целом. Работа всего комплекса во многом зависит от выбора метода решения СЛАУ, алгоритма и качества его реализации.

На основе этих требований возникает необходимость разработки и внедрения в расчетные программные комплексы высокоэффективных методов решения систем конечно-элементных уравнений высоких порядков.

В настоящее время наметились и используются два варианта решения или обхода данной проблемы.

Первый заключается в разработке методов и алгоритмов, связанных с непосредственным решением больших СЛАУ (различные варианты упорядочения и преобразования матрицы коэффициентов при неизвестных, использование итерационных методов и т. д.) [9—16].

Второй путь — разработка физических моделей сложных конструкций с поэтапным переходом от простой модели к более сложной с использованием результата расчета предыдущей грубой модели при построении более сложной последующей. Здесь следует отметить метод суперэлементов (подконструкций) [17—21], интерполяционные методы (сеточные методы) [22], а также сплайн-методы [23—27].

Мы предлагаем методику решения конечно-элементных СЛАУ высокого порядка, описывающих напряженно-деформированное состояние (НДС) одномерных и двумерных конструкций, которая основана на алгоритме редуцирования этого СЛАУ.

Цель исследования — реализация алгоритма построения редуцированной системы конечно-элементных уравнений, описывающих НДС конструкции на примере жестко защемленной по контуру пластинки.

Для достижения целей исследования решены *задачи*:

- построить редуцированную конечно-элементную СЛАУ, полученную на основе МКЭ в форме классического смешанного метода (КСМ) для жестко защемленной пластинки с разбиением на конечно-элементную сетку 8×8 (рис. 6);
- построить редуцированную конечно-элементную СЛАУ, полученную на основе МКЭ в форме КСМ для жестко защемленной пластинки с разбиением на конечно-элементную сетку 16×16 (рис. 7).

В такой постановке на основе теории МКЭ в форме КСМ и реализующих его алгоритмов, разрабатываемых авторами статьи, эти задачи решены впервые.

Практическое значение полученных результатов состоит в доказательстве эффективности впервые разработанного алгоритма редуцирования конечно-элементных СЛАУ высоких порядков, получаемых на основе МКЭ в форме КСМ. Его потенциал для сокращения вычислительных ресурсов и обеспечения более эффективного моделирования может иметь огромные преимущества для различных инженерных приложений и является насущной потребностью в современной инженерной практике.

Материалы и методы

Предложенный алгоритм построения редуцированной системы конечно-элементных уравнений, описывающих НДС одномерной или двумерной конструкции, основан на аппроксимации основных неизвестных смешанного метода в узлах мелкой сетки через значения тех же неизвестных в узлах крупной сетки. Данный алгоритм может быть значительно упрощен, если принять линейную интерполяцию основных неизвестных между узлами грубой сетки.

Выбор линейной интерполяции также связан с тем, что в ряде случаев весьма затруднительно подобрать нелинейную аппроксимирующую функцию и обосновать ее выбор.

Алгоритм построения редуцированной системы уравнений состоит из нескольких этапов.

1. Рассматриваемая конструкция представляется совокупностью конечных элементов. Выделяются две конечно-элементные сетки: сетка с крупными ячейками и обозначением узлов I, J и сетка с мелкими ячейками и обозначением узлов i, j . Примем I, J за главные узлы, а узлы i, j за второстепенные. Конечно-элементная модель с разбиением на главные и второстепенные узлы для одномерной конструкции показана на рис. 1, для двумерной конструкции — на рис. 2. Количество узлов мелкой конечно-элементной сетки является кратным по отношению к узлам крупной конечно-элементной сетки, и оно является одинаковым для всех областей крупной сетки.

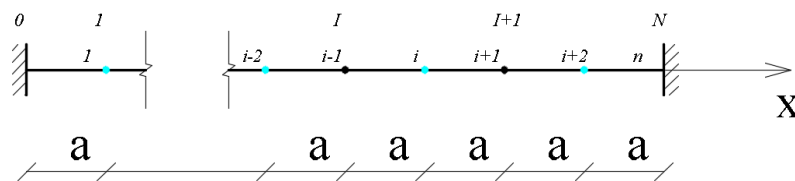


Рис. 1. Расчетная модель одномерной конструкции, представленная совокупностью стержневых конечных элементов с разбиением на крупную и мелкую конечно-элементную сетку

2. Устанавливается связь между смешанными неизвестными узлов мелкой конечно-элементной сетки i, j и крупной конечно-элементной сетки I, J . В рассматриваемой области выполняется линейная интерполяция значений основных неизвестных смешанного метода в узлах мелкой сетки через значения тех же неизвестных в узлах крупной сетки. Формальное изображение такой интерполяции для одномерной конструкции показано на рис. 3, для двумерной конструкции — на рис. 4. Для установления связи между перемеще-

ниями и усилиями узлов i, j и I, J находятся коэффициенты линейных интерполяционных полиномов, позволяющих выразить значения основных неизвестных смешанного метода в узлах мелкой сетки через те же значения неизвестных в узлах крупной сетки для всех областей крупной сетки.

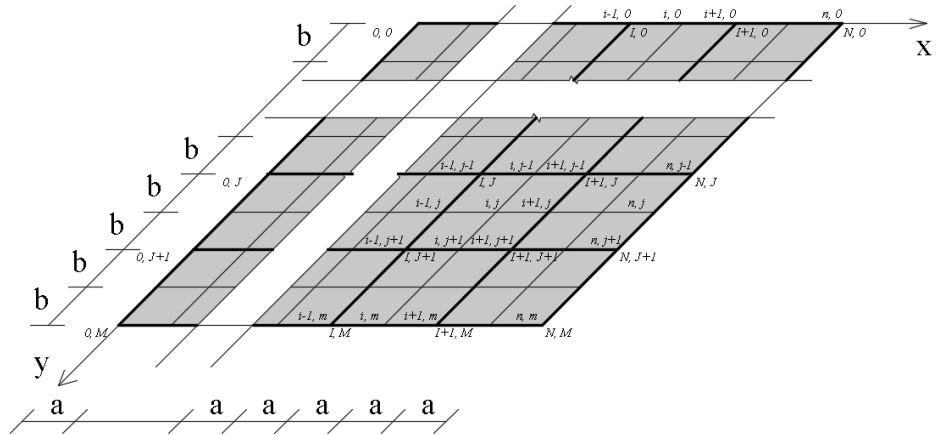


Рис. 2. Расчетная модель двумерной конструкции, представленная совокупностью пластинчатых конечных элементов с разбиением на крупную и мелкую конечно-элементную сетку

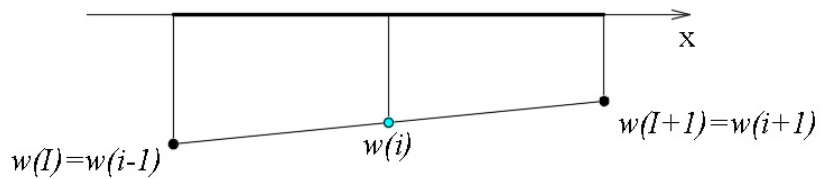


Рис. 3. Линейная интерполяция между перемещениями узлов i, j и I, J для одномерной конструкции

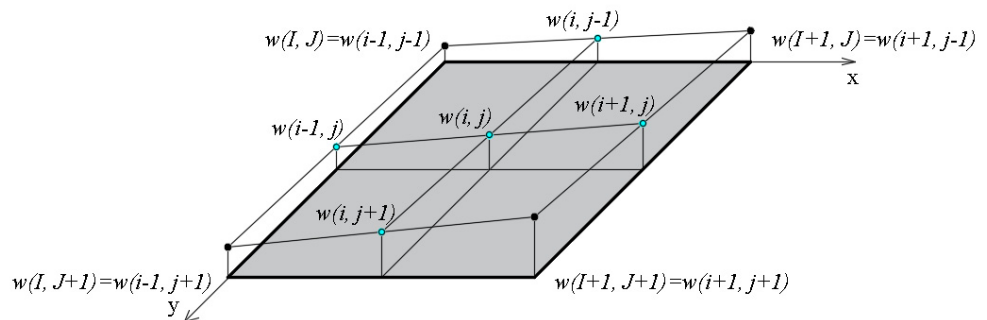


Рис. 4. Линейная интерполяция между перемещениями узлов i, j и I, J для двумерной конструкции

3. Значения основных неизвестных смешанного метода в узлах мелкой сетки, выраженные через значения тех же узловых неизвестных крупной сетки, подставляются в систему конечно-элементных уравнений, полученных на основе МКЭ в форме КСМ, для каждой из рассматриваемых областей конструкции. Получившаяся система уравнений относительно неизвестных крупной сетки (редуцированная система уравнений) решается любым из наиболее эффективных способов;

4. В обратном порядке находим параметры, описывающие НДС в узлах мелкой конечно-элементной сетки.

5. Следующий этап расчета — уменьшение размеров ячейки конечно-элементных сеток.

В различных отраслях строительства широкое применение находят аналитические поверхности. В инженерной практике изначально применяли простые поверхности: призматические, цилиндрические, конические. Развитие строительной отрасли и науки привели к возможности усложнения используемых геометрических форм, что отражается в уникальном облике современных зданий и сооружений. У архитекторов стали появляться потребности в использовании новых, более сложных очертаний, представляемых поверхностями второго порядка: параболоид, гипар, гиперболоид, сфера. Моделирование таких конструкций в программных комплексах, реализующих МКЭ, происходит с помощью различных видов конечных элементов.

Изложенный выше алгоритм построения редуцированных СЛАУ, описывающих НДС одномерных и двумерных конструкций может быть формализован и обобщен на конечно-элементные области конструкции с расчетной схемой из конечных элементов любой формы. Также аналогичный алгоритм может быть применен для редукции частотных уравнений.

Результаты и обсуждение

Для демонстрации применимости предложенного алгоритма построения редуцированной системы конечно-элементных уравнений выполнен расчет жестко защемленной по контуру пластинки на действие постоянной нагрузки (рис. 5).

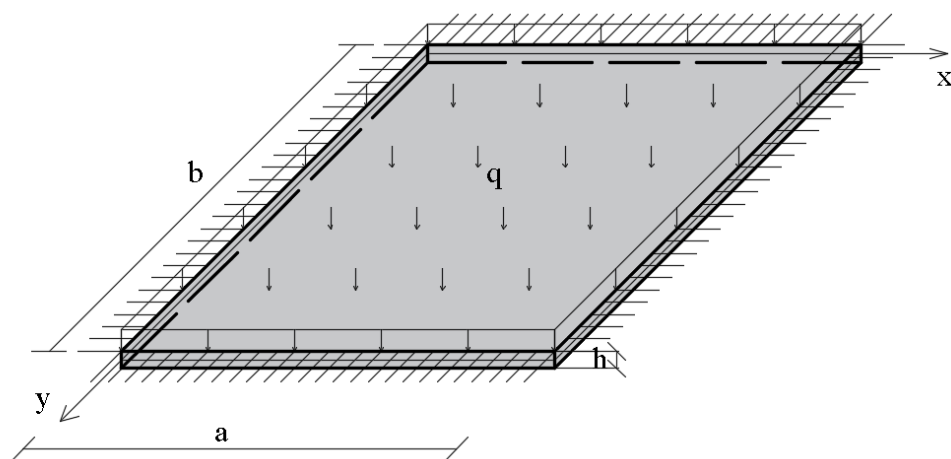


Рис. 5. Жестко защемленная по контуру тонкая изгибаемая пластинка

Исходные данные:

$$a = b = 1 \text{ м}; h = 0,01 \text{ м}; \mu_x = \mu_y = 0,3; E = 1,092 \cdot 10^7 \text{ Т/м}^2; q = 1 \text{ Т/м}^2.$$

Задача 1. На пластину наносятся две конечно-элементные сетки: сетка с крупными ячейками 4×4 и сетка с мелкими ячейками 8×8 (рис. 6).

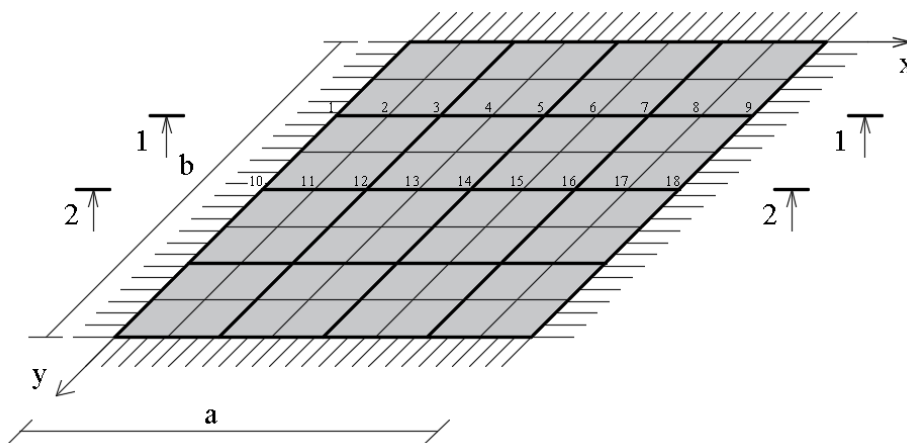


Рис. 6. Пластина, представленная совокупностью конечных элементов с крупной конечно-элементной сеткой 4×4 и мелкой конечно-элементной сеткой 8×8

В таблице 1 представлены результаты расчета прогибов узлов $w \cdot 10^3$, м, этой пластинки по предложенному алгоритму с аналитическим решением и решением, полученным на основе МКЭ в форме КСМ без учета редукции для конечно-элементных сеток 4×4 и 8×8 .

Таблица 1

Сравнение результатов расчета прогибов узлов $w \cdot 10^3$, м, квадратной жестко защемленной пластинки, представленной крупной конечно-элементной сеткой 4×4 и мелкой конечно-элементной сеткой 8×8 , выполненных по предложенному алгоритму с аналитическим решением и решением, полученным на основе МКЭ в форме КСМ без учета редукции

	№ узла									
	1	2	3	4	5	10	11	12	13	14
Аналитическое решение	0	0,172	0,462	0,682	0,761	0	0,279	0,761	1,134	1,260
МКЭ в форме КСМ с учетом редукции (сетка 4×4)	0	0,263	0,527	0,706	0,885	0	0,442	0,885	1,189	1,493
МКЭ в форме КСМ без редукции (4×4)	0	—	0,529	—	0,892	0	—	0,892	—	1,516
МКЭ в форме КСМ без редукции (8×8)	0	0,179	0,484	0,716	0,800	0	0,293	0,800	1,193	1,336

В таблице 2 представлены результаты расчета изгибающих моментов $M_x \cdot 10^2, \text{т} \cdot \text{м}$, в узлах этой пластины по предложенному алгоритму с аналитическим решением и решением, полученным на основе МКЭ в форме КСМ без учета редукции для конечно-элементных сеток 4×4 и 8×8 .

Таблица 2

Сравнение результатов расчета изгибающих моментов $M_x \cdot 10^2, \text{т} \cdot \text{м}$, квадратной жестко защемленной пластинки, представленной крупной конечно-элементной сеткой 4×4 и мелкой конечно-элементной сеткой 8×8 , выполненных по предложенному алгоритму с аналитическим решением и решением, полученным на основе МКЭ в форме КСМ без учета редукции

	Номер узла									
	1	2	3	4	5	10	11	12	13	14
Аналитическое решение	-5,130	-0,564	0,659	1,145	1,267	-5,130	-1,001	1,101	2,039	2,310
МКЭ в форме КСМ с учетом редукции (сетка 4×4)	-2,885	-0,923	1,038	1,365	1,693	-4,816	-1,556	1,704	2,289	2,874
МКЭ в форме КСМ без редукции (4×4)	-2,880	—	1,040	—	1,665	-4,668	—	1,685	—	2,809
МКЭ в форме КСМ без редукции (8×8)	-3,117	-0,478	0,750	1,242	1,364	-5,036	-0,866	1,238	2,168	2,426

Задача 2. На пластину наносятся две конечно-элементные сетки: сетка с крупными ячейками 8×8 и сетка с мелкими ячейками 16×16 (рис. 7).

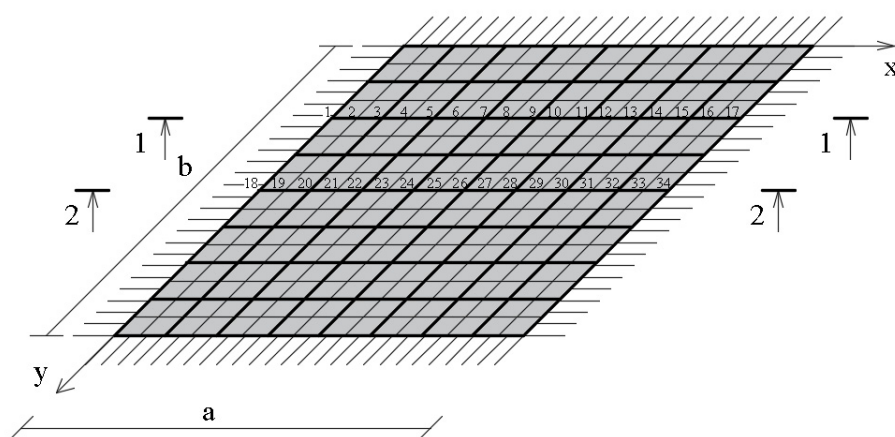


Рис. 7. Пластина, представленная совокупностью конечных элементов с крупной конечно-элементной сеткой 8×8 и мелкой конечно-элементной сеткой 16×16

В таблице 3 представлены результаты расчета прогибов узлов $w \cdot 10^3$, м, этой пластинки по предложенному алгоритму с аналитическим решением и решением, полученным на основе МКЭ в форме КСМ без учета редукции для конечно-элементных сеток 8×8 и 16×16 .

Таблица 3

Сравнение результатов расчета прогибов узлов $w \cdot 10^3$ м квадратной жестко защемленной пластинки, представленной крупной конечно-элементной сеткой 8×8 и мелкой конечно-элементной сеткой 16×16 , выполненных по предложенному алгоритму с аналитическим решением и решением, полученным на основе МКЭ в форме КСМ без учета редукции

	Номер узла								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Аналитическое решение	0	0,052	0,172	0,318	0,462	0,587	0,682	0,741	0,761
МКЭ в форме КСМ с учетом редукции (сетка 8×8)	0	0,089	0,179	0,330	0,482	0,597	0,712	0,754	0,795
МКЭ в форме КСМ без редукции (8×8)	0	—	0,179	—	0,484	—	0,716	—	0,800
МКЭ в форме КСМ без редукции (16×16)	0	0,053	0,174	0,321	0,467	0,593	0,689	0,749	0,769
	Номер узла								
	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Аналитическое решение	0	0,084	0,279	0,520	0,761	0,972	1,134	1,236	1,260
МКЭ в форме КСМ с учетом редукции (сетка 8×8)	0	0,146	0,291	0,543	0,795	0,991	1,186	1,257	1,328
МКЭ в форме КСМ без редукции (8×8)	0	—	0,293	—	0,800	—	1,193	—	1,336
МКЭ в форме КСМ без редукции (16×16)	0	0,085	0,282	0,526	0,769	0,983	1,147	1,249	1,284

В таблице 4 сопоставлены результаты расчета изгибающих моментов $M_x \cdot 10^2$, т·м, в узлах этой пластины по предложенному алгоритму с аналитическим решением и решением, полученным на основе МКЭ в форме КСМ без учета редукции для конечно-элементных сеток 8×8 и 16×16 .

Т а б л и ц а 4

Сравнение результатов расчета изгибающих моментов $M_x \cdot 10^2$, т·м, квадратной жестко защемленной пластины, представленной крупной конечно-элементной сеткой 8×8 и мелкой конечно-элементной сеткой 16×16 , выполненных по предложенному алгоритму с аналитическим решением и решением, полученным на основе МКЭ в форме КСМ без учета редукции

	Номер узла								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Аналитическое решение	-3,230	-1,654	-0,564	0,174	0,659	0,964	1,145	1,238	1,267
МКЭ в форме КСМ с учетом редукции (сетка 8×8)	-3,137	-1,807	-0,478	0,138	0,753	0,999	1,244	1,305	1,365
МКЭ в форме КСМ без редукции (8×8)	-3,117	—	-0,478	—	0,750	—	1,242	—	1,364
МКЭ в форме КСМ без редукции (16×16)	-3,207	-1,634	-0,547	0,192	0,678	0,984	1,164	1,258	1,287
	Номер узла								
	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Аналитическое решение	-5,130	-2,742	-1,001	0,241	1,101	1,677	2,039	2,236	2,310
МКЭ в форме КСМ с учетом редукции (сетка 8×8)	-5,069	-2,973	-0,878	0,182	1,241	1,710	2,179	2,308	2,438
МКЭ в форме КСМ без редукции (8×8)	-5,036	—	-0,866	—	1,238	—	2,168	—	2,426
МКЭ в форме КСМ без редукции (16×16)	-5,110	-2,719	-0,974	0,268	1,129	1,704	2,065	2,262	2,325

Выводы

Полученные результаты позволяют нам сделать следующие выводы:

- преимуществом предлагаемого алгоритма редукции СЛАУ высоких порядков на основе линейной интерполяции основных неизвестных смешанного метода в узлах мелкой сетки через значения тех же неизвестных в узлах крупной сетки является отсутствие операций обращения матрицы коэффициентов при неизвестных СЛАУ для узлов разреженной сетки, которая также может иметь высокий порядок, что является очень затратной операцией с точки зрения машинного времени;

- сравнение результатов расчетов, полученных с использованием алгоритма построения редуцированной конечно-элементной системы уравнений, с аналитическим решением показало высокую степень точности вычисленных перемещений и изгибающих моментов, не уступающую результатам, полученным с использованием МКЭ в форме КСМ без редукции конечно-элементной системы уравнений;
- изложенный выше алгоритм построения редуцированных СЛАУ, описывающих НДС одномерных и двумерных конструкций, может быть формализован и обобщен на конечно-элементные области конструкции с расчетной схемой из конечных элементов любой формы;
- алгоритм может быть расширен для работы с трехмерными моделями, хотя это потребует дальнейшей разработки и тестирования;
- предлагаемый алгоритм имеет важное практическое значение в области строительной механики. Уменьшение порядка системы уравнений может быть особенно полезно при анализе сложных конструкций с большим числом степеней свободы и уравнениями высокого порядка, что является актуальной задачей современной инженерной практики.

Кроме того, применение предложенного алгоритма может быть распространено на область динамики конструкций, где необходимо решать частотные уравнения для нахождения собственных частот и форм колебаний конструкции. Уменьшая размер системы уравнений, предлагаемый алгоритм может обеспечить более эффективное и точное моделирование в задачах динамики конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Müller B., Starke G. Stress-Based Finite Element Methods in Linear and Nonlinear Solid Mechanics. (2016) DOI: 10.1007/978-3-319-31925-4_4.
2. Approximation of incompressible large deformation elastic problems: some unresolved issues / F. Auricchio, L. Veiga, C. Lovadina, A. Reali, R. Taylor, P. Wriggers // Computational Mechanics. 2013. DOI: 10.1007/s00466-013-0869-0.
3. Boffi D., Brezzi F., Fortin M. Mixed Finite Element Methods and Applications. 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-36519-5.
4. Storn J. Topics in Least-Squares and Discontinuous Petrov — Galerkin Finite Element Analysis. 2019. DOI: 10.18452/20141.
5. Schneider P., Kienzler R., Böhm M. Modeling of consistent second-order plate theories for anisotropic materials // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 2014. DOI: 10.1002/zamm.201100033.
6. Meyer-Coors M., Kienzler R., Schneider P. Modularity of the displacement coefficients and complete plate theories in the framework of the consistent-approximation approach // Continuum Mechanics and Thermodynamics. 2021. DOI: 10.1007/s00161-021-01009-z.
7. Игнатьев В. А., Игнатьев А. В. Метод конечных элементов в форме классического смешанного метода строительной механики (теория, математические модели и алгоритмы). М. : АСВ, 2022. 306 с.
8. Ignatyev V., Ignatyev A., Zavyalov I. The Efficiency of Application of Triangular Bending Finite Elements for Plate Calculation Using the Classical Mixed-Type Approach to the Finite-Element Method // Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. 2022. Vol. 1. Pp. 963—971. DOI: 10.1007/978-3-031-11058-0_98.
9. Benzi M., Tuma M. A robust incomplete factorization preconditioner for positive definite matrices // Numerical Linear Algebra with Applications. 2003. Vol. 10. Iss. 5-6. Pp. 385—400. DOI: 10.1002/nla.320.
10. Scott J., Tuma M. Algorithms for Sparse Linear Systems. 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-25820-6.

11. *Scott J., Tũma M.* Sparse LU Factorizations // Algorithms for Sparse Linear Systems. 2023. Pp. 89—111. DOI: 10.1007/978-3-031-25820-6_6.
12. *Chen Q., Jiao X.* HIFIR: Hybrid Incomplete Factorization with Iterative Refinement for Preconditioning Ill-conditioned and Singular Systems. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2106.09877.
13. *Marín J., Mas J.* Balanced incomplete factorization preconditioner with pivoting // Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Serie A. Matemáticas. 2022. DOI: 10.1007/s13398-022-01334-1.
14. *Pearson J., Pestana J.* Preconditioners for Krylov subspace methods: An overview // GAMM-Mitteilungen. 2020. Vol. 43. Iss. 4. DOI: 10.1002/gamm.202000015.
15. *Стрелецкий Н. С.* К расчету сложных статически неопределимых систем / Инженер Н. С. Стрелецкий, проф. Высшего Московского технического училища и Ин-та инженеров путей сообщения; Высш. техн. ком. Нар. ком. пут. сообщ. М.: 5-я типо-лит. М.С.Н.Х. (б. Рус. т-во), 1921. 67 с.
16. *Фиалко С. Ю.* Сопоставление прямых и итерационных методов решения больших конечно-элементных задач строительной механики // Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Киев : Сталь, 2002. С. 552—569.
17. *Игнатъев В. А.* Методы супердискретизации в расчетах сложных стержневых систем. Саратов : Изд-во Саратовского ун-та, 1981. 107 с.
18. *Tsybenko A., Konyukhov A., Tsybenko H.* Numerical Method for Determining Stiffness Characteristics of an Arbitrary Form Superelement // Applied Computer Systems. 2015. DOI: 10.1515/acss-2015-0019.
19. *Manolis P., Bitoulas N., Hatjikonstantinou K.* An efficient superelement-by-superelement method for large finite element computations // Computing Systems in Engineering. 1991. DOI: 10.1016/0956-0521(91)90055-A.
20. *Galanin M. P., Savenkov E.* Substantiation of the finite superelement method // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2003. Vol. 43. Pp. 680—695.
21. *Mokryakov V.* Numerical simulation of functionally graded plane elastic medium by finite superelement method // AIP Conference Proceedings. 2018. DOI: 10.1063/1.5019038.
22. *Wang H., Wang F.* A Sparse Reconstruction Algorithm Based on Constrained Inhomogeneous Grid Optimization // Circuits, Systems, and Signal Processing. 2023. Vol. 42. Iss. 8. Pp. 1—27. DOI: 10.1007/s00034-023-02333-2.
23. *Kumari R.* Topical Advancements in Various Spline Techniques for Boundary Value Problems // International journal for research in applied science and engineering technology. 2017. Vol. 5. Iss. 6. Pp. 105—125.
24. *Burova I.* Local Interpolation Splines and Solution of Integro-Differential Equations of Mechanic's Problems // Wseas transactions on applied and theoretical mechanics. 2022. Vol. 17. Pp. 103—112.
25. *Burova I., Alcybeev G.* Solution of Integral Equations Using Local Splines of the Second Order // Wseas transactions on applied and theoretical mechanics. 2022. Vol. 17. Pp. 254—258.
26. *Han J.-G., Ren W.-X., Huang Y.* A spline wavelet finite-element method in structural mechanics // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2006. Vol. 66. Iss. 1. Pp. 166—190.
27. *Игнатъев В. А.* Редукционные методы расчета в статике и динамике пластинчатых систем. Саратов : Изд-во Саратовского ун-та, 1992. 144 с.

© Игнатъев В. А., Игнатъев А. В., Завьялов И. С., 2024

Поступила в редакцию
в январе 2024 г.

Ссылка для цитирования:

Игнатъев В. А., Игнатъев А. В., Завьялов И. С. Техника формирования редуцированных конечно-элементных СЛАУ высоких порядков, описывающих напряженно-деформированное состояние одномерных и двумерных конструкций // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. Вып. 1(94). С. 115—126. DOI: 10.35211/18154360_2024_1_115.

Об авторах:

Игнатьев Владимир Александрович — д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки и техники РСФСР, почетный работник высшего профессионального образования РФ, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Россия, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1

Игнатьев Александр Владимирович — д-р техн. наук, доц., проф. каф. цифровых технологий в урбанистике, архитектуре и строительстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Россия, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; alignat70@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-0733-8808

Завьялов Иван Сергеевич — инженер-программист каф. строительной механики, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Россия, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; ORCID: 0000-0002-9316-6514

Vladimir A. Ignatyev, Alexander V. Ignatyev, Ivan S. Zavyalov

Volgograd State Technical University

TECHNIQUE FOR THE FORMATION OF REDUCED FINITE ELEMENT SYSTEMS OF HIGH-ORDER LINEAR ALGEBRAIC EQUATIONS DESCRIBING THE STRESS-STRAIN STATE OF ONE-DIMENSIONAL AND TWO-DIMENSIONAL STRUCTURES

The problems arising from the application of the finite element method to the calculation of complex structures and structures represented by computational schemes with a large number of finite elements are considered. The developed algorithm for reducing high-order finite element systems of equations describing the stress-strain state of one-dimensional and two-dimensional structures is described. The calculation and analysis of the results of the calculation of the plate based on the algorithm of reduction of a finite element system of equations with an analytical result and the results obtained on the basis of the finite element method in the form of a classical mixed method are performed.

Key words: the finite element method in the form of a classical mixed method, a bent thin plate, systems of linear algebraic equations of high orders, a reduction method, an algorithm for constructing a reduced system of equations.

For citation:

Ignatyev V. A., Ignatyev A. V., Zavyalov I. S. [Technique for the formation of reduced finite element systems of high-order linear algebraic equations describing the stress-strain state of one-dimensional and two-dimensional structures]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2024, iss. 1, pp. 115—126. DOI: 10.35211/18154360_2024_1_115.

About authors:

Vladimir A. Ignatyev — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation

Alexander V. Ignatyev — Doctor of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russia; alignat70@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-0733-8808

Ivan S. Zavyalov — software engineer, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russia; ORCID: 0000-0002-9316-6514