

Анализ эффективности компьютерных технологий моделирования термонапряжённого состояния заднего стоечного узла ГТД

А.А.Рябов, С.А.Железов, В.Н.Речкин,
Ю. Н. Шмотин, А.В.Веселов,
Alan Mueller

Аннотация

Приводится сравнительный анализ эффективности двух различных компьютерных технологий на основе методов конечных элементов и конечных объёмов, реализованных в программных комплексах ABAQUS и STAR CCM+, при численном исследовании термонапряжённого состояния заднего стоечного узла газотурбинного двигателя (ГТД). Исследуются основные отличительные особенности, трудозатраты на построение расчётных сеток, точность и сходимости результатов численных расчётов. Демонстрируются преимущества новой компьютерной технологии на основе ПК STAR CCM+, позволяющей повысить эффективность расчётов и существенно сократить трудозатраты на этапе проектирования.

Ключевые слова

задний стоечный узел (ЗСУ); компьютерная технология; метод конечных элементов; метод конечных объёмов; численные расчёты; напряжённо-деформированное состояние.

Введение

Постоянное повышение требований к эффективности и надёжности газотурбинных установок стимулирует развитие численных методов и различных компьютерных технологий, позволяющих существенно повышать точность численного моделирования тепловых и напряженно-деформированных состояний их элементов и сокращать сроки

разработки [1,2]. Компьютерный анализ прочности изделий включает три основных этапа: 1 – подготовку дискретных моделей, 2- решение задачи, 3 – анализ результатов и выпуск отчетной документации. Опыт показывает, что наиболее трудоемким по затратам времени работы специалистов является первый этап. Временные затраты второго этапа, по существу, требуют гораздо меньшего участия специалистов, зависят от эффективности используемой численной технологии – методов дискретизации и решения систем уравнений и могут существенно влиять на общее время решения проблемы.

В настоящее время в решении задач механики деформируемого твёрдого тела наибольшее распространение получили комплексы программ, основанные на методе конечных элементов (МКЭ), позволяющем описывать тепловое и деформированное состояние практически любых элементов конструкций, в том числе имеющих весьма сложную форму. Универсальность МКЭ по отношению к сложной геометрии изделий является его существенным преимуществом. Необходимо, однако, отметить, что успешная практическая реализация этого преимущества возможна только на основе комплексной технологии: быстрой генерации конечно-элементных моделей большой размерности и эффективных численных методов решения систем алгебраических уравнений высокого порядка. В последние годы для решения задач прочности начал применяться метод конечных объемов (МКО) [3,4]. При этом отмечается, что основной выигрыш при использовании МКО для расчёта сложных конструктивных элементов состоит в существенном сокращении трудозатрат на построение расчётных сеток. В связи с этим представляется актуальным сравнительный анализ эффективности решения задач на основе МКЭ и МКО.

В данной работе на основе численных экспериментов по моделированию термонапряжённого состояния заднего стоечного узла (ЗСУ) газотурбинного двигателя (ГТД) исследуется эффективность применения МКО, реализованного в программном комплексе STAR CCM+, по сравнению с конечно-элементным подходом. Исследуются точность и сходимость результатов, а также эффективность распараллеливания численных расчётов. Демонстрируются преимущества новой компьютерной технологии на основе МКО в STAR CCM+.

Постановка задачи

Задний стоечный узел является одним из ответственных и наиболее нагруженных элементов двигателя. В процессе эксплуатации этот узел подвергается комплексному

термосилового воздействию высокотемпературного потока продуктов горения топлива и механических нагрузок. Взаимодействие с высокотемпературным потоком приводит к неравномерному нагреву конструкции, что вызывает температурные напряжения, действующие в совокупности с напряжениями от механических нагрузок. В таких условиях конструкция ЗСУ должна деформироваться упруго и удовлетворять заданным требованиям по долговечности. В связи с этим неотъемлемой частью процесса проектирования и сертификации конструкции узла является проведение комплекса численных исследований его теплового состояния и прочности. На этапе проектирования стоечного узла большое внимание уделяется также снижению его металлоёмкости (весовой оптимизации). При этом в процессе расчётной оптимизации рассматривается ряд конструктивных вариантов, что требует больших трудозатрат на построение соответствующих расчётных сеток и проведение комплекса расчетов.

Сравнительный анализ эффективности компьютерных технологий выполняется на задаче численного моделирования термонапряженного состояния конструкции ЗСУ в одном из временных сечений заданного полетного цикла.

Компьютерная модель рассматриваемого варианта конструкции ЗСУ с дополнительными конструктивными элементами показана на рисунке 1.

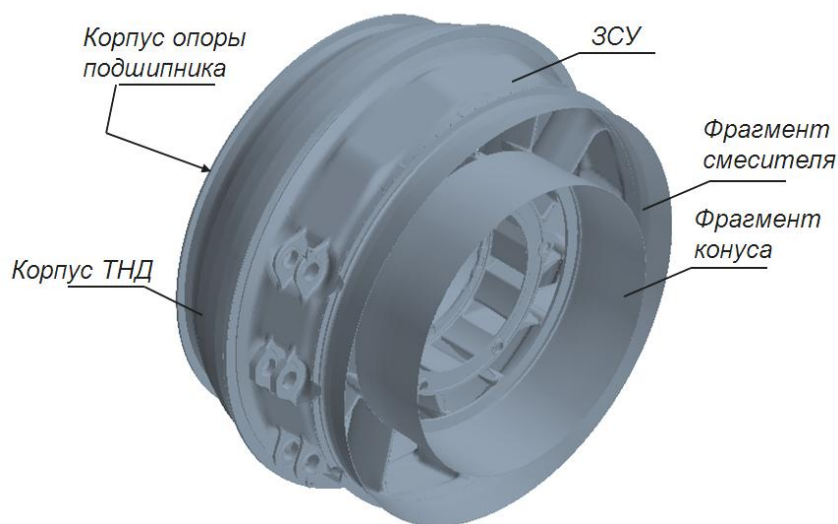


Рис. 1 - Компьютерная модель заднего стоечного узла с примыкающими элементами

В компьютерную модель включается собственно ЗСУ, а также примыкающие дополнительные элементы: корпуса турбины низкого давления и опоры подшипника, фрагменты корпусов смесителя и конуса, что позволяет более точно моделировать напряженно-деформированное состояние. В качестве граничных условий при решении

краевой задачи задается жёсткая заделка по торцу корпуса турбины низкого давления. В компьютерной модели крепёжные фланцы ЗСУ и дополнительных конструктивных элементов жестко связаны между собой.

На рисунке 2 представлены графики зависимости от температуры физико-механических свойств материалов ЗСУ и дополнительных конструктивных элементов, используемые при проведении расчётов. Условные обозначения соответствующих параметров свойств материалов приведены в таблице 1.

Обозначения материалов и физико-механических параметров

Таблица 1

Деталь	Материал	Коэффициент линейного расширения	Модуль Юнга	Коэффициент Пуассона	Коэффициент теплопроводности
ЗСУ	Mat_1	A1*	E1*	0.3	L1*
Корпус ТНД	Mat_2	A2*	E2*	0.3	L2*
Смеситель	Mat_3	A3*	E3*	0.3	L3*
Конус	Mat_3	A3*	E3*	0.3	L3*
Корпус опоры подшипника	Mat_4	A4*	E4*	N4*	L4*

*Учитывается зависимость параметра от температуры (см. рис.2.)

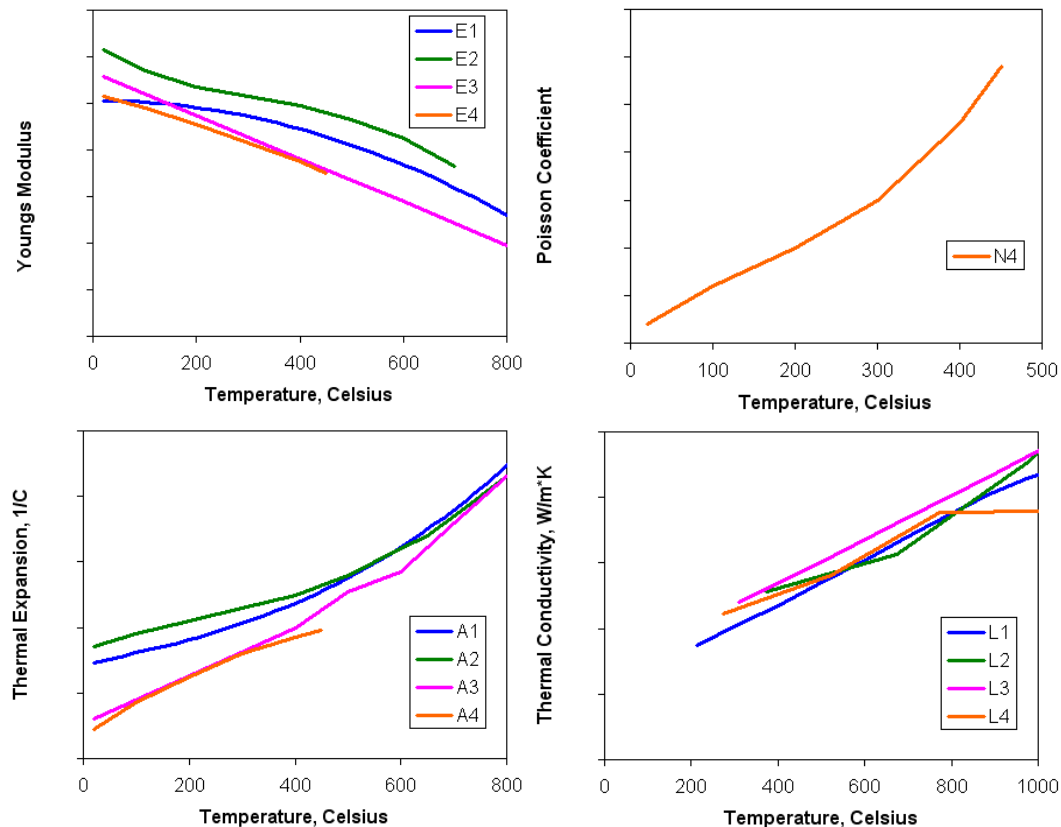


Рисунок 2 - Зависимости механических характеристик материалов от температуры

Рассматривается тепловое нагружение ЗСУ заданным неоднородным, стационарным полем температур. Расчёты напряженно-деформированного состояния конструкции в рамках работы по исследованию эффективности компьютерных технологий проводятся в линейной постановке.

Генерация дискретных моделей

Генерация конечно-элементной модели (КЭМ) оптимизированной конструкции ЗСУ с дополнительными конструктивными элементами для проведения расчётов в ABAQUS выполняется с использованием препроцессора pro-FE [5], а также специальных панелей и макросов, написанных на внутреннем параметрическом языке препроцессора. Для редактирования САД геометрии и построения поверхностной сетки применяется программный модуль pro-surf [6]. Технология генерации КЭМ ЗСУ с использованием указанных программных продуктов описана в [7]. Оптимальный вариант размерности КЭМ выявлен на основе исследований сходимости численных решений путём последовательного автоматизированного сгущения сеток с изменением характерных размеров конечных элементов в среднем в диапазоне от 4.5 до 0.6 мм. Численные эксперименты показали, что размерность оптимальной КЭМ составляет ~1,3 млн. восьмиузловых изопараметрических элементов. На рисунке 3 показан фрагмент подготовленной КЭМ ЗСУ в области одной из проушин.

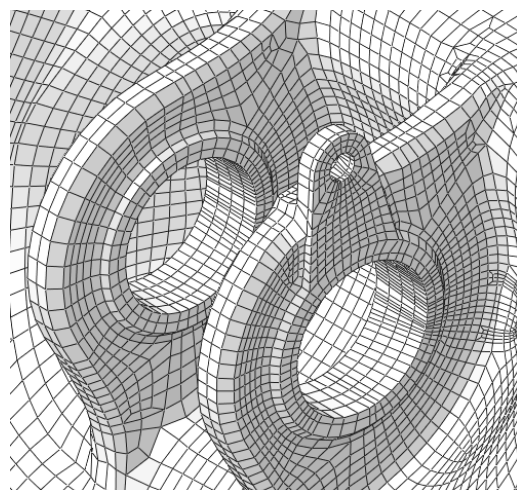


Рисунок 3 - Фрагмент КЭМ ЗСУ

Практика показала, что суммарная трудоёмкость разработки высококачественной КЭМ ЗСУ, выполненной квалифицированными опытными специалистами, составляет ~ 5,3 чел-мес.

Для решения задачи в ABAQUS используется вариант КЭМ с различными типами элементов первого порядка - C3D8R для дополнительных конструктивных элементов и C3D8I для ЗСУ. В [8] отмечается, что элемент C3D8R использует схему сокращённого интегрирования и несколько завышает результаты, а элемент C3D8I позволяет получить

более точное решение за счёт введения поправок к функциям формы, исключая образование «паразитных» сдвиговых деформаций. При использовании элементов C3D8I значительно увеличивается время счёта.

Для решения задачи на основе STAR CCM+ разработана серия полигональных сеточных моделей различной размерности от 2 до 22 млн. ячеек, в которых средний размер многогранной ячейки варьируется в диапазоне от 1 до 8 мм. В соответствии с рекомендациями [9] конечно-объёмная сетка вблизи поверхности модели генерируется плотнее, чем конечно-элементная сетка. На рисунке 4 показаны для сравнения фрагменты конечно-объёмных моделей (КОМ) ЗСУ со средним размером ячейки 8 мм (слева) и 1 мм (справа).



Рисунок 4 - Фрагменты конечно-объёмных сеток ЗСУ

Для некоторых расчётных моделей выполнялось только локальное сгущение сетки в зоне с максимальным значением интенсивности напряжений для повышения точности результатов. При этом поле температур в этой локальной области для новых узлов расчётной сетки автоматически формировалось интерполированием значений температур с узлов предыдущей (более грубой) сетки.

Суммарная трудоёмкость на построение первого варианта КОМ ЗСУ размерностью ~ 2 млн. ячеек составила ~ 1 час. Построение расчётных моделей выполнялось на рабочей станции с процессором Intel Core Duo 3.0 GHz в ОС LINUX CUE (RAM 8 Gb).

3. Результаты численных расчетов и их анализ

Поле температур для одного из временных сечений полётного цикла, полученное в [7], импортируется в программные комплексы ABAQUS и STAR CCM+ из внешнего файла в специальных форматах и интерполируется на все узлы (или ячейки) соответствующей расчётной сетки (рисунок 5). Анализ показывает, что пространственное распределение температур в КЭМ и КОМ качественно и количественно совпадает.

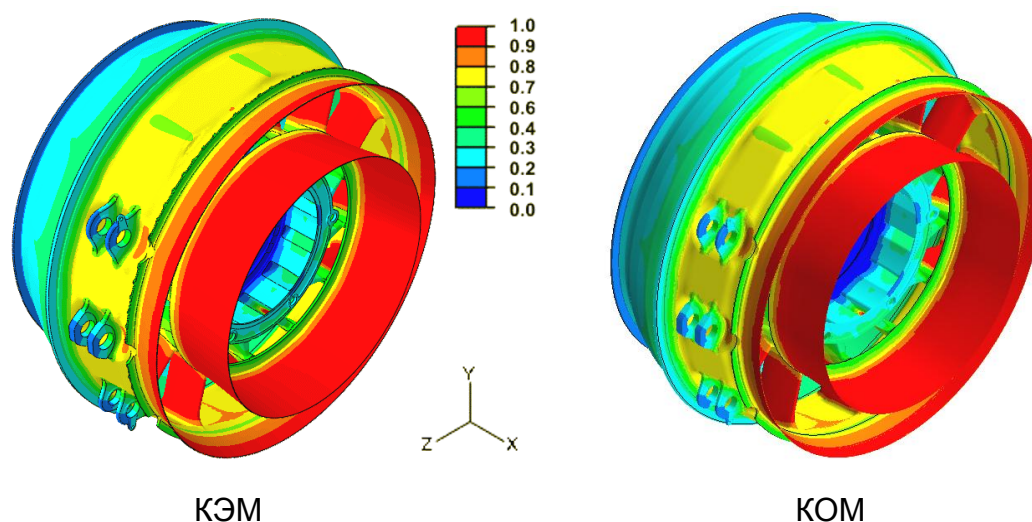


Рис. 5 - Поле температур

Расчёты, для которых сопоставляются временные затраты, проводятся на рабочей станции с процессором Intel Xeon 2.6 GHz; ОС LINUX SUSE (RAM: 16 Gb). Все остальные расчеты с целью исследования масштабируемости решений выполняются в параллельном режиме на кластере фирмы HP: 8×Xeon 2.8 GHz, 128 Gb RAM, LINUX SLES 11; 32 nodes 4×Xeon 3.0 GHz, 16 Gb RAM, LINUX SLES 10. Решение системы алгебраических уравнений в ABAQUS проводится прямым методом Sparse direct solver. В STAR CCM+ для решения системы уравнений используется итерационный метод AMG (Algebraic Multigrid solver), а также его модификация - *Successive Over Relaxation* (SOR) [9]. Вычисления выполняются до невязки $\sim 3e-7$ по нормированной силе. Численные расчеты показывают, что подключение опции SOR позволяет сократить время счёта приблизительно **в 5 раз** при той же точности результатов. Влияние опции SOR показано на типовых графиках изменения нормализованных невязок по силам и максимального суммарного перемещения в зависимости от числа итераций (рис. 6, 7). Обращает на себя внимание относительно высокая скорость сходимости итерационного процесса до точности $1,0e-5$, достигаемой примерно за 500 итераций с SOR и за 1700 итераций без этой опции. В дальнейшем скорость сходимости

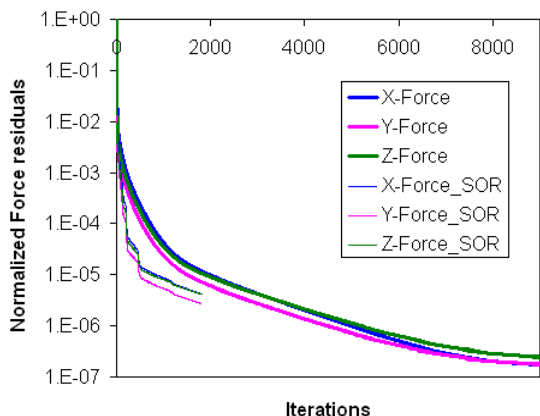


Рис. 6 – Изменение нормализованных невязок сил

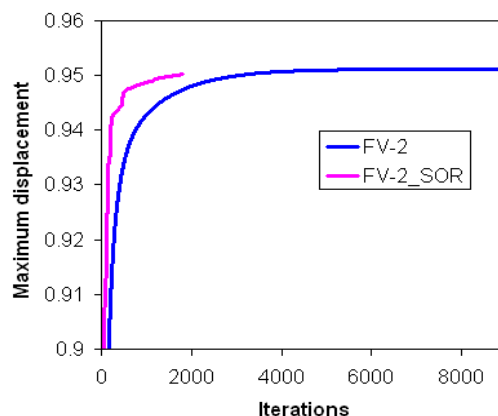


Рис. 7 – Изменение максимального перемещения

итерационного решения снижается и остается почти постоянной вплоть до достижения заданной высокой точности. При этом максимальное перемещение изменяется незначительно (рис. 7).

Сравнительный анализ результатов расчётов проводится по суммарным перемещениям и интенсивности напряжений. При этом решение МКЭ, полученное на оптимальном варианте расчётной сетки, принято в качестве «эталоны». Сходимость этого решения доказана численными экспериментами на основе последовательного сгущения сеток [7].

Сходимость численного решения на основе МКЭ исследуется путем последовательного сгущения сетки от 2 до 22 млн. ячеек. На рисунке 8 показан характер изменения максимальных значений перемещений (а) и интенсивности напряжений (б) с ростом размерности конечно-объемных моделей. Из рисунка видно, что с ростом размерности задачи наблюдается некоторая сходимость решения. Равномерное сгущение сетки и соответствующее увеличение размерности моделей на порядок позволяет существенно уточнить напряжения, но не приводит к значительному изменению перемещений.

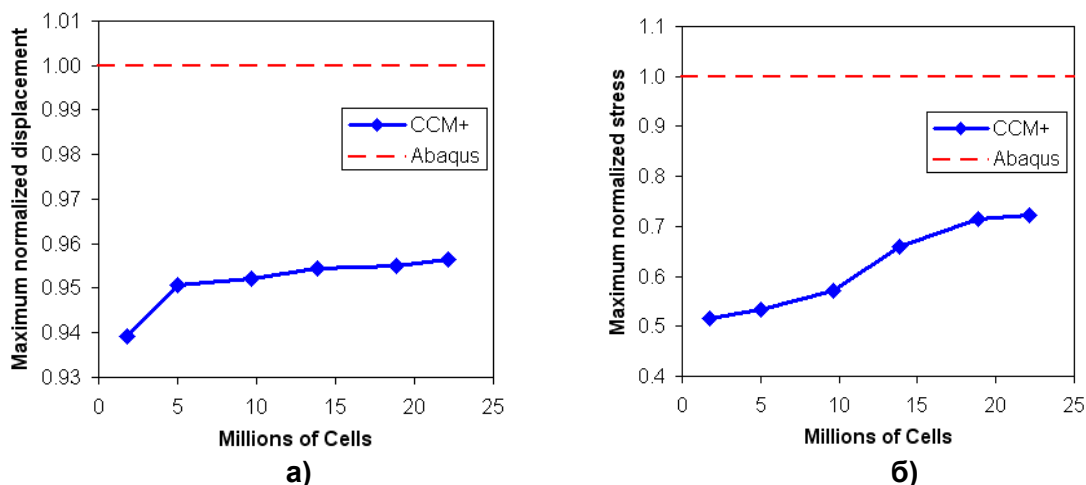


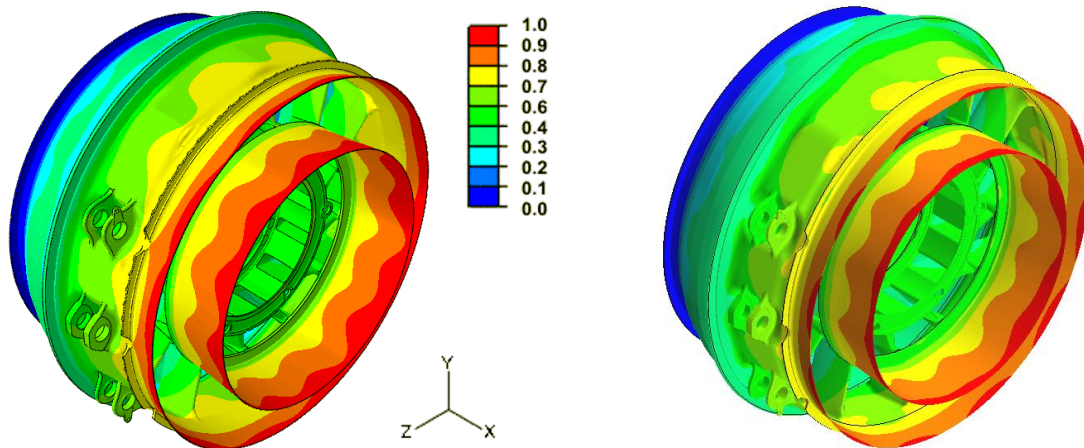
Рис. 8 - Сходимость результатов численных расчётов

Сравнение результатов расчетов по МКЭ на «эталонной» модели размерностью 5,9 млн. узлов и по МКО на нескольких моделях размерностью от 2 до 19 млн. ячеек приведено в таблице 2. Поля суммарных перемещений и интенсивности напряжений в конструкции, полученные двумя различными компьютерными технологиями, представлены для сравнения на рисунках 9 - 11. Значения перемещений и интенсивности напряжений в таблице 2 и на рисунках нормированы по «эталонному» решению МКЭ. Приведенные результаты получены в скалярном режиме, на одном процессоре.

Сравнение результатов решений МКЭ и МКО

Таблица 2

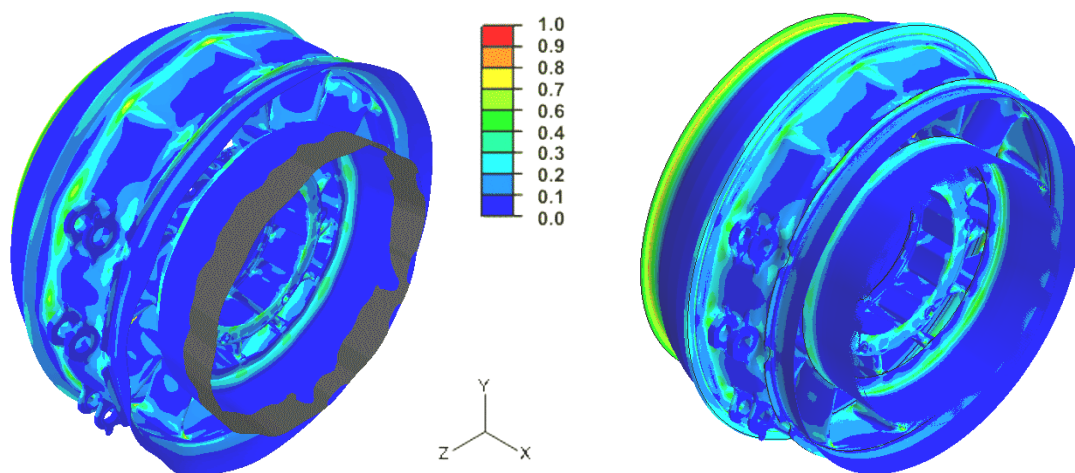
Модель	Размерность модели (млн. узлов-МКЭ/ячеек-МКО)	U_{\max}	$\Delta, \%$	σ_{\max}	$\Delta, \%$
КЭМ -1	5.9	1.000	-	1.000	-
КОМ -1	2.0	0.939	-6.1	0.515	-48.5
КОМ -2	7.0	0.951	-4.9	0.903	-9.7
КОМ -3	19.0	0.955	-4.5	0.715	-28.5



КЭМ-1

КОМ-2

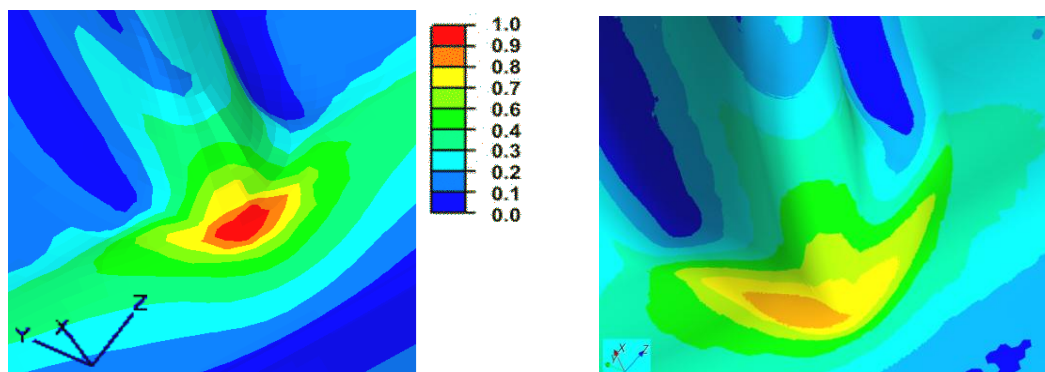
Рис. 9 - Поля суммарных перемещений



КЭМ-1

КОМ-2

Рис. 10 - Поля интенсивности напряжений по Мизесу



КЭМ-1

КОМ-2

Рис. 11 – Локальное распределение интенсивности напряжений

Численные исследования показывают, что при изменении размерности дискретных конечно-объемных моделей почти на порядок с 2 до 19 млн. ячеек (с ~ 6млн. до ~ 60млн. уравнений) время решения системы уравнений также возрастает на порядок. Отличие от решения МКЭ по перемещениям лежит в диапазоне 4-6%. Приемлемую точность по перемещениям МКО обеспечивает на модели почти в три раза меньшей размерности, чем модель МКЭ. Однако, отличие по максимальным напряжениям для моделей КОМ-1 и КЭМ-1 достигает ~ 49%, что не приемлемо. Увеличение размерности КОМ на порядок путем равномерного сгущения сетки позволяет понизить отличие по максимальным напряжениям до уровня ~29%. Добиться снижения отличия по максимальным напряжениям до 10% удастся локальным сгущением сетки в зонах максимальных деформаций на модели КОМ-2 размерностью 7.0 млн. ячеек, что близко к размерности модели КЭМ-1.

Таким образом, для эффективного применения технологии на основе МКО представляется рациональным двухэтапный метод проведения расчетов сложных конструкций. На первом этапе на «грубой» сетке относительно невысокой размерности проводится

расчет напряженно-деформированного состояния с целью определения локальных зон повышенных напряжений. На втором этапе проводится последовательное локальное сгущение сеток в зонах максимальных напряжений до сходимости решений. Учитывая высокую эффективность генерации сеточных моделей в STAR CCM+, предлагаемый подход позволяет существенно сократить в целом время на поиск высокоточного решения задачи.

Для анализа эффективности распараллеливания в STAR CCM+ решений рассматриваемой задачи на сетках различной размерности выполнен также анализ их масштабируемости при увеличении количества используемых ядер кластера фирмы HP. На рисунке 12 приведён график зависимости коэффициента масштабируемости решения от количества используемых ядер для конечно-объёмной модели размерностью 22 млн. ячеек. Исследования показали, что при увеличении числа ядер до 32 скорость решения увеличивается почти линейно. При этом коэффициент масштабируемости близок к 0,7, что указывает на высокую эффективность распараллеливания в STAR CCM+.

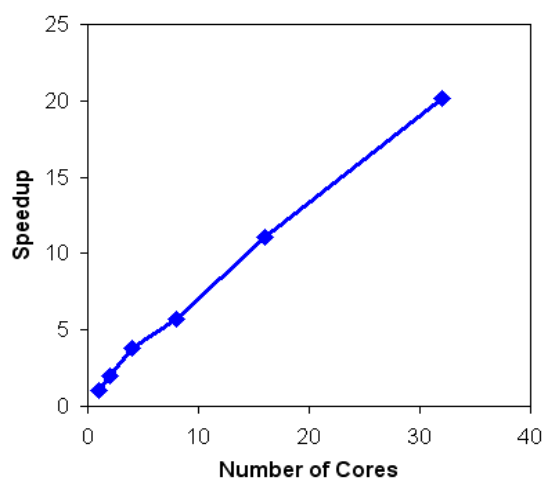


Рисунок 12 - График масштабируемости распараллеленного решения

Заключение

Затраты времени на создание конечно-объёмной модели ЗСУ размерностью ~7 млн. многогранных ячеек на основе программных средств STAR CCM+ примерно на два порядка ниже, чем на разработку конечно-элементной модели близкой размерности ~ 6 млн. узлов с использованием препроцессора pro-FE. Приемлемых по точности результатов МКО и МКЭ по перемещениям (~5%) и по напряжениям (~10%) на моделях близкой размерности удается добиться, если конечно-объёмная модель имеет локальные сгущения в зонах повышенных напряжений. Технология МКО, реализованная в STAR-CCM+, позволяет решать проблему в целом (генерация модели – решение системы уравнений) на одном процессоре на порядок быстрее, чем технология МКЭ, за счет существенного сокращения времени генерации дискретной модели. Распараллеливание решения на 32 ядра позволяет дополнительно сократить время решения задачи примерно в 20 раз.

Библиографический список

1. Скибин В., Солонин В., Дульнев А. Перспективы развития газотурбинных двигателей // Газотурбинные технологии. – 2000. - №2. – С.4-8.
2. Муравченко Ф.М. Актуальные проблемы динамики прочности и надёжности авиадвигателей // Вібрації в техніці та технологіях. – 2004. -№6. – С.2-4.
3. Ferguson S. Flow, Thermal, Stress. Simulation in STAR-CD v4 // Dynamics. – 2007. – #27. – P.4-5.
4. Robb D. Eliminating heat stress failures in industrial turbines // Dynamics. – 2009. – issue 3.01. – P.45-48.
5. Pro-FE, Software Package, Ver. 3.20, CD-adapco, NY, 2004.
6. Pro-surf, Ver. 3.26.003, CD-adapco, NY, 2006.
7. Рябов А.А., Романов В.И., Речкин В.Н., Шмотин Ю.Н., Веселов А.В. Применение современной компьютерной технологии для исследования прочности, устойчивости и долговечности заднего стоечного узла газотурбинного двигателя // Тезисы докладов 8-й международной конференции «Авиация и космонавтика -2009», Москва, 26-29 октября 2009г.- М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009.
8. ABAQUS v.6.9 Documentation.
9. STAR CCM+ v. 4.04.011 Documentation.

Сведения об авторах

Рябов Александр Алексеевич, директор ООО СИНЦ, с.н.с, к.т.н.

607328, Нижегородская область, Дивеевский р-н, п.Сатис, Технопарк, ул. Парковая, 3;
E-mail: alex.ryabov@saec.ru; тел: 83130) 22050, 37306

Железов Сергей Авангардович, начальник группы ООО СИНЦ.

07328, Нижегородская область, Дивеевский р-н, п.Сатис, Технопарк, ул. Парковая, 3;
E-mail: zhelezov@saec.ru; тел: (83130) 23101

Речкин Вадим Николаевич, начальник сектора ООО СИНЦ.

607328, Нижегородская область, Дивеевский р-н, п.Сатис, Технопарк, ул. Парковая, 3; E-mail: rechv@saec.ru; тел: (83130) 23127

Шмотин Юрий Николаевич, первый заместитель технического директора генерального конструктора, главный конструктор НПО Сатурн к.т.н.,

152903, Ярославская обл., г. Рыбинск, пр.Ленина, 163,
E-mail: yuri.shmotin@npo-saturn.ru; тел: (4855) 296409

Веселов Алексей Валентинович, главный специалист НПО Сатурн

152903, Ярославская обл., г. Рыбинск, пр.Ленина, 163,
E-mail: alexey.veselov@npo-saturn.ru;

Alan Mueller
CD-adapco Seattle
Chief Technology Officer, Ph.D.
13810 SE Eastgate Way, Suite 400
Bellevue WA 98005
office: (+1) 425 957-7827 ext 116
E-mail: alan.mueller@us.cd-adapco.com