ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК
Том 18 Выпуск 3

УДК 519.6, 519.681 DOI 10.22405/2226-8383-2017-18-3-88-108

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПРОЧНОСТНОГО АНАЛИЗА НА БАЗЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ФИДЕСИС

И. М. Безмозгий[1], О. И. Казакова[2], Р. М. Магжанов[3], А. А. Смердов[4], А. Г. Чернявский[5], А. Г. Чернягин[6]

Аннотация

Рассматривается возможность построения системы специализированных решений для прочностного анализа на базе программного комплекса Фидесис. Приведены результаты тестирования программного комплекса Фидесис. В программно комплексе реализован метод конечных элементов и метод спектральных элементов для задач механики деформируемого твердого тела. Высказывается мнение, что на данном этапе развития программного комплекса Фидесис он может быть использован как альтернативный пакет проведения контрольных расчетов, особенно при решении не типовых задач, при решении которых возникает потребность модификации и настройки основных вычислительных алгоритмов, заложенных в программном комплексе.

В составе программного комплекса Фидесис имеются все необходимые элементы, обеспечивающие эффективность его применения - препроцессор, обеспечивающий построение конечно-элементных моделей, модульный процессор для решения линейных и нелинейных статических и динамических задач, расчета устойчивости конструкций, определения эквивалентных характеристик композитных конструкций, контактных задач, постпроцессор для визуализации и обработки результатов.

[1]Безмозгий Иосиф Менделевич, начальник отдела ПАО РКК Энергия, iosif.bezmozgy@rsce.ru

[2]Казакова Ольга Игоревна, инженер-конструктор 1 категории ПАО РКК Энергия, olga.kazakova@rsce.ru

[3]Магжанов Раис Мухтясибович, заместитель генерального конструктора ПАО РКК Энергия, rais.magzhanov@rsce.ru

[4]Смердов Алексей Андреевич, инженер конструктор 2 категории ПАО РКК Энергия, aleksey.smerdov2@rsce.ru

[5]Чернявский Александр Григорьевич, советник генерального директора ПАО РКК Энергия, alexander.cherniavsky@rsce.ru

[6]Чернягин Александр Григорьевич, ведущий научный сотрудник ПАО РКК Энергия, alexander.chernyagin@rsce.ru

Приводятся результаты тестирования программного комплекса Фидесис в сравнении с результатами, полученными на основе программного комплекса ANSYS.

Основной задачей тестирования являлась оценка возможности программного комплекса Фидесис в части: импорта геометрии из 3D пакетов; эффективности построения сеток конечных элементов; определения напряженно-деформируемого состояния сборок с переменной зоной контакта; решения динамических задач, включая модальный и гармонический анализ.

Тестирование программного комплекса Фидесис проведено на задачах, имитирующих наиболее часто встречающиеся в практической деятельности задачах.

Отмечается, что отличительной особенностью программного комплекса Фидесис является наличие спектральных элементов высокого порядка, позволяющих, в ряде случаев, повысить точность расчета без перестроения сетки конечных элементов.

Отмечается, что сравнительный анализ расчетов на моделях с близкими сетками конечных элементов, проведенных в программном комплексе Фидесис и программном комплексе ANSYS, показывает хорошее совпадение результатов.

Делается вывод что программный комплекс Фидесис может быть использован для решения ряда задач в области анализа прочности конструкций при наличии другого пакета у предприятия, а также с учетом практических потребностей активных пользователей, он может быть при совместной доработке с учетом требования пользователя как основа для отраслевого решения в части прочности.

Ключевые слова: программный комплекс, прочностной инженерный анализ, результаты тестирования, модификация и настройка вычислительных алгоритмов.

Библиография: 15 названий.

RESULTS OF TESTING AND ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF BUILDING A SYSTEM OF SPECIALIZED SOLUTIONS FOR STRENGTH ANALYSISBASED ON CAE FIDESYS

I. M. Bezmozgiy, O. I. Kazakova, R. M. Magzhanov, A. A. Smerdov, A. G. Chernyavsky, A. G. Chernyagin

Abstract

The possibility of constructing a system of specialized solutions for strength analysis based on CAE Fidesys is considered. The results of testing CAE Fidesys are presented. The finite element method and the spectral element method implemented in CAE Fidesys are discussed for

the problems of mechanics of a deformable solid. The opinion is expressed that at this stage of the development of CAE Fidesys it can be used as an alternative CAE for carrying out control calculations, especially when solving non-typical tasks, in the solution of which there is a need to modify and adjust the main computational algorithms incorporated in the software.

As a part of CAE Fidesys all the necessary elements are provided to ensure the effectiveness of its application - a preprocessor that provides the generation of finite element models, a modular processor for solving linear and nonlinear static and dynamic problems, buckling problems, estimation effective properties of composite materials, contact problems, postprocessor for visualization and processing of results.

The results of testing CAE Fidesys are presented in comparison with the results obtained in ANSYS.

The main purpose of the testing was to evaluate the possibilities of CAE Fidesys in terms of: importing geometry from CAD systems; the effectiveness of finite element mesh generator; determination of the stress-strain state of assemblies with a variable contact zone; solving dynamic problems, including modal and harmonic analysis.

Testing of CAE Fidesys was performed on test cases representing the problems which are frequently faced in practical work.

It is noted that the distinctive feature of CAE Fidesys is the high-order spectral elements allowing one, in some cases, increase the accuracy of calculation without rebuilding the finite element mesh.

It is noted that a comparative analysis of the calculations done on the models with similar finite element meshes conducted in CAE Fidesys and ANSYS shows good coincidence of the results.

The conclusion is that CAE Fidesys can be used for solving different problems of structural analysis in addition to another CAE software available on the enterprise, and also taking into account the practical needs of active users, it can be considered, when combined with the user's requirements, as the basis of an industrial solution for a structural analysis.

Keywords: software complex, strength engineering analysis, test results, modification and tuning of computational algorithms.

Bibliography: 15 titles.

1. Введение

В настоящее время повсеместное распространение получили универсальные пакеты, реализующие МКЭ [5, 11] (ANSYS, Nastran, Abaqus [12,13,15]), имеющие широкое возможности в области задач механики. В то же время, их активное применение периодически выявляет потребности в доработках и модификации. Следует отметить, что, хотя большинство распространенных программных комплексов (ПК), реализующих МКЭ, имеют мощный командный язык, обеспечивающий весьма широкие возможности в процессе пре- и постпроцессорной обработки, однако, возможности вмешательства в основные вычислительные алгоритмы, заложенных в ПК, весьма ограничены.

Кроме того, использование такого командного языка при работе с большими массивами данных значительно, на порядки, уступает по времени эффективности, достижимой при реализации требуемых изменений непосредственно в исходном коде. Запросы на доработки упомянутых ПК в интересах отечественных пользователей, учитывая незначительный объем Российского рынка программного обеспечения (ПО), как правило, остаются без внимания. В этой связи разработка отечественного ПК, реализующего МКЭ, авторы которого находятся в непосредственном контакте с активными пользователями, разработка и модификация которого ведется с учетом их потребностей, является весьма актуальной.

Целью настоящей работы являлось тестирование программного комплекса Фидесис. ПК Фидесис [6,14] позиционируется как пакет, реализующий метод конечных элементов для задач механики. На данном этапе ПК Фидесис может быть использован как альтернативный пакет для проведения контрольных расчетов, особенно при решении нетиповых задач[1,2,3,4,7,8], при решении которых возникает потребность модификации и настройки основных вычислительных алгоритмов, заложенных в ПК.

В составе комплекса имеются все необходимые элементы, обеспечивающие эффективность его применения - препроцессор, обеспечивающий построение конечно-элементных моделей, модульный процессор для решения линейных и нелинейных статических и динамических задач, расчета устойчивости конструкций, определения эквивалентных характеристик композитных конструкций и др., постпроцессор для визуализации и обработки результатов.

Основная часть

Ниже приводятся результаты тестирования ПК Фидесис в сравнении с результатами, полученными на основе ПК ANSYS.

Основной задачей тестирования являлась оценка возможности ПК Фидесис в части:

- импорта геометрии из 3D пакетов;

- эффективности построения сеток конечных элементов;

- определения НДС сборок с переменной зоной контакта;

- решения динамических задач, включая модальный и гармонический анализ.

Тестирование ПК Фидесис проведено на задачах, имитирующих наиболее часто встречающиеся в практической деятельности. Все тестовые задачи параллельно решались с помощью программного комплекса ANSYS.

2. Определение НДС в упругом элементе и усилия срабатывания цангового замка

2.1. Постановка задачи, описание модели

Одной из наиболее востребованных задач, решаемых в процессе разработки конструкций, является определение НДС сборок или их фрагментов с учетом контактов, изменяющихся в процессе деформирования. В качестве такой тестовой задачи рассмотрено взаимодействие элементов типового цангового замка в процессе его раскрытия. Схема замка представлена на рисунке1а. При открытии замка шток смещается внутри цанги, после чего цанга вытягивается из втулки. Определению подлежат усилие, необходимое для раскрытия замка и НДС в гибких элементах цанги. Элементы конструкции, участвующие в расчете показаны на рисунке 1б. Задача решается в геометрически нелинейной постановке. Для получения расчетной модели использовалась 3D модель, разработанная в ПК Pro/ENGINEER.

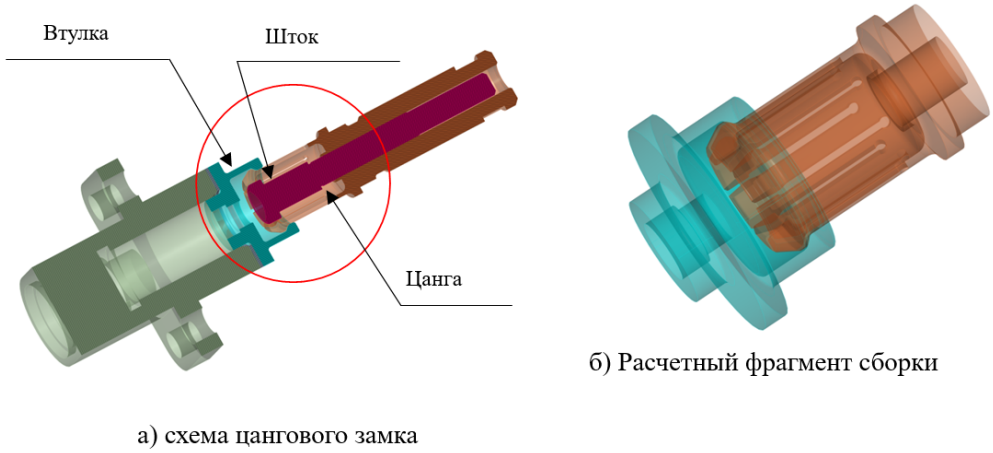


Рис. 1: Геометрическая модель сборки цангового замка

2.2. Результаты расчета

Расчет проведен в ПК Фидесис и в ПК ANSYS. С учетом циклической симметрии конструкции расчету подвергался фрагмент сборки. КЭ модель фрагмента и схема распределения эквивалентных напряжений в момент возникновения максимальных напряжений, полученные в обоих пакетах показаны на рисунке 2. В модели использованы объемные конечные элементы.

2.3. Выводы

На основе решения данной задачи в ПК Фидесис и сравнения полученных результатов с результатами расчетов в ПК ANSYS можно сделать следующие

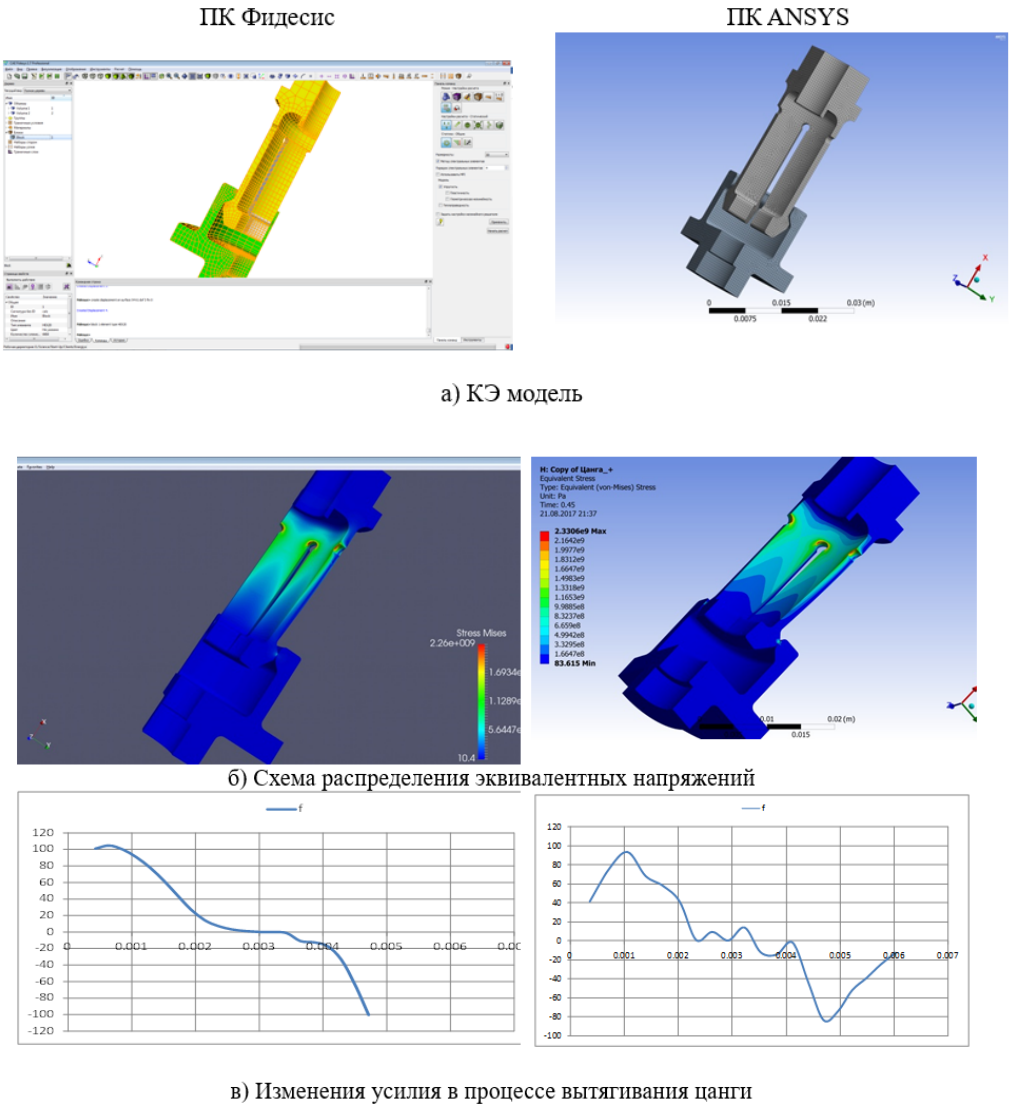


Рис. 2: Результаты расчета

выводы:

-ПК Фидесис обеспечивает возможность создания расчетной модели с использованием объемных конечных элементов на базе 3D моделей;

-ПК Фидесис обеспечивает возможность расчета НДС сборок с учетом нелинейностей и автоматического определения контакта в процессе деформирования;

-различие результатов, полученных в ПК Фидесис и ПК ANSYS составляет менее 5% по напряжениям и не превышает 10% по усилию, что в данном случае объясняется некоторым различием сетки конечных элементов. При этом следует отметить, что полученная в Фидесис кривая изменения усилия в зависимости от перемещения более гладкая, в зоне

прохождения цилиндрического участка втулки имеет практически нулевое значение, что является более корректным.

3. Динамические задачи на примере панели с приборами

3.1. Гармонический анализ.

Постановка задачи, описание модели При создании и эксплуатации современных изделий большое значение имеет возможность расчета отклика конструкции на различные динамические воздействия, для чего необходимо наличие достоверной динамической модели изделия, параметры которой настроены по результатам динамических испытаний. Одним из таких испытаний, на основе результатов которых проводится настройка параметров модели, являются вибропрочностные испытания, при проведении которых конструкция нагружается синусоидальным воздействием изменяемой в заданном диапазоне частоты. В программных комплексах, реализующих МКЭ, моделирование подобных испытаний базируется на решении задачи гармонического анализа. Настройка модели проводится на основе сравнения результатов моделирования испытаний (гармонического анализа) с результатами вибропрочностных испытаний путем варьирования жесткостных и диссипативных параметров.

К числу важнейших характеристик динамической модели, определяющих её достоверность, относятся демпфирующие свойства конструкции, закладываемые в модель. При этом в различных программных комплексах, реализующих технологию МКЭ, существует достаточно большое разнообразие типов параметров демпфирования, которые могут быть использованы при построении моделей. Это и общее конструкционное демпфирование, демпфирование по жесткости и по массе, демпфирование по частоте, демпфирующие свойства отдельных элементов и материалов. К сожалению, в упомянутых выше ПК, реализующих МКЭ, существует ряд ограничений, не позволяющих использовать полный набор параметров демпфирования для различных видов динамического анализа. На практике это приводит к значительным сложностям при валидации динамических моделей по результатам различных видов динамических испытаний. Так, динамическая модель, настройка которой по результатам модальных или гармонических испытаний проведена путем задания параметров общего конструкционного демпфирования, не может без перенастройки использоваться для расчета отклика на динамическое воздействие с использованием методов прямого интегрирования (FULL).

В текущей версии Fidesys матрица демпфирования в наиболее общей форме имеет вид:

$$[C] = \alpha\,[M] + \left(\beta + \tfrac{2}{\Omega}\xi\right)[K] + \sum_{j=1}^{N_m}\left[\alpha_j^m\,[M_j]\right] + \sum_{j=1}^{N_m}\left[\left(\beta_j^m + \tfrac{2}{\Omega}\xi_j^m\right)[K_j]\right] + \sum_{k=1}^{N_e}[C_k],$$

где

$[C]$ - матрица демпфирования;

α- демпфирование, связанное с матрицей масс;
$[M]$- матрица масс;
β- демпфирование, связанное с матрицей жесткости;
ξ- конструкционное демпфирование;
$[K]$-матрица жесткости;
α_j^m- коэффициент демпфирования матрицы масс -го материала;
β_j^m- коэффициент демпфирования матрицы жесткости j-го материала;
ξ_j^m- конструкционное демпфирование j-го материала;
$[C_k]$- матрица демпфирования элемента;
N_m- количество материалов с заданным демпфированием;
N_e- количество элементов с заданным демпфированием.

Принятый вид матрицы демпфирования аналогичен используемому в ПК ANSYS версии 14. При этом следует отметить, на протяжении ряда лет в ПК ANSYS от версии к версии менялся набор параметров демпфирования, что подтверждает важность и в тоже время сложность обозначенной проблемы.

Однако, основная проблема (различный набор допустимых параметров демпфирования в зависимости от вида динамического анализа) не решена и, судя по тому, что иностранные разработчики ПО слабо прислушиваются к замечаниям из России, ещё долго останется нерешенной. Хотя на сегодня эта проблема не решена и в ПК Фидесис, близость разработчиков ПК Фидесис, а также возможность совместной работы с ними, позволяет рассчитывать на скорейшее решение этой проблемы.

Для анализа возможности использования ПК Фидесис при моделировании вибропрочностных испытаний решена задача гармонического анализа тестовой модели – пластины с установленными на ней имитаторами приборов. В отличие от предыдущего примера модель создавалась средствами ПК Фидесис и, для решения контрольной задачи, средствами ПК ANSYS. КЭ модели для расчетных систем обоих ПК представлены на рис. 3

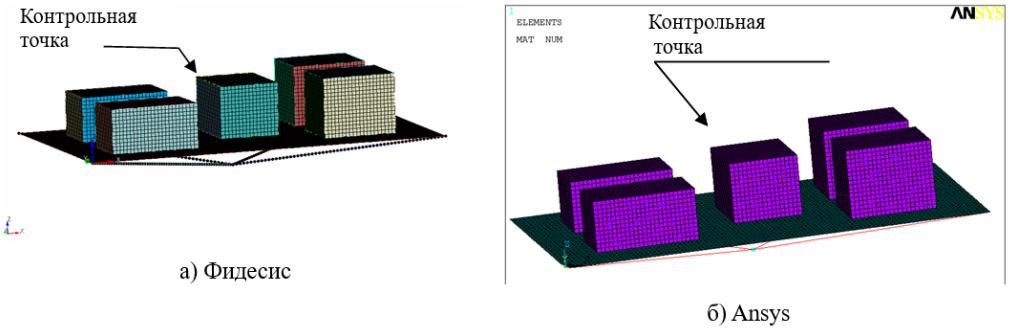


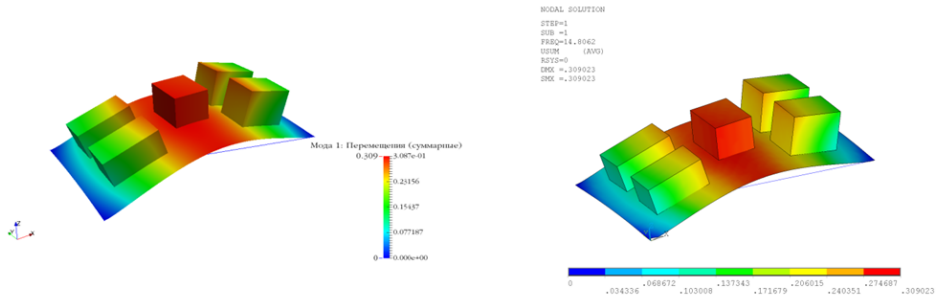
Рис. 3: Расчетная модель

Результаты решения Решение задачи гармонического анализа проводилось двумя методами - методом суперпозиции форм (Mode Superpos'n) и

полным (Full). При использовании метода суперпозиции форм задача решается в два этапа, первым из которых является модальный анализ.

1. (a) i. A. Результаты модального анализа

Полученные в результаты модального анализа первые формы колебаний представлены на рисунке 4 –Первые формы колебаний в ПК Фидесис а) и ПК ANSYS б). Собственные частоты, полученные в ПК Фидесис и ПК ANSYS приведены в таблице 4 –Первые формы колебаний в ПК Фидесис а) и ПК ANSYS б). Расхождение значений собственных частот не превышает 1%. Практически полное совпадение амплитуд перемещений показывает, что в ПК Фидесис используются близкие к принятым в ПК ANSYS подходы, включая нормирование перемещений при определении собственных форм колебаний.



а) б)

Рис. 4: Первые формы колебаний в ПК Фидесис а) и ПК ANSYS б)

Таблица1 – Сравнение собственных частот, полученных в Ansys и Fidesys.

Фидесис		**Ansys**
№	частота, Hz	частота, Hz
1	14.59	14.81
2	44.02	44.51
3	57.17	57.84
4	60.54	61.22
5	87.87	88.35
6	95.57	96.49
7	118.24	119.47
8	144.78	145.84
9	161.35	162.27
10	207.93	209.32

1. (a) i. A. Результаты гармонического анализа

Ниже приводятся результаты расчета отклика (ускорения) в контрольной точке при воздействии синусоидальной вибрации амплитудой 1 g без демпфирования (рисунок 4 –Первые формы колебаний в ПК Фидесис а) и ПК ANSYS б)а, 4 –Первые формы колебаний в ПК Фидесис а) и ПК ANSYS б)б) и при заданных в таблице 4 –Первые формы колебаний в ПК Фидесис а) и ПК ANSYS б) параметрах демпфирования (рисунок 4 –Первые формы колебаний в ПК Фидесис а) и ПК ANSYS б)в, 4 –Первые формы колебаний в ПК Фидесис а) и ПК ANSYS б)г).

Таблица2. Используемые значения демпфирования.

вид демпфирования	ξ	α	β	ξ_j^m	α_j^m	ξ_j^m
значение	0.01	2	0.0001	0.01	2	0.0001

3.2. Расчет на нестационарное воздействие

Постановка задачи, описание модели С использованием той же модели проведен расчет отклика конструкции на нестационарное кинематическое воздействие, заданное в виде ускорения по нормали в углах пластины. График воздействия представлен на рисунке 6.

Результаты решения Ниже приводятся результаты расчета отклика (ускорения) в контрольной точке при указанном нестационарном воздействии и при заданных в таблице 4 –Первые формы колебаний в ПК Фидесис а) и ПК ANSYS б) параметрах демпфирования.

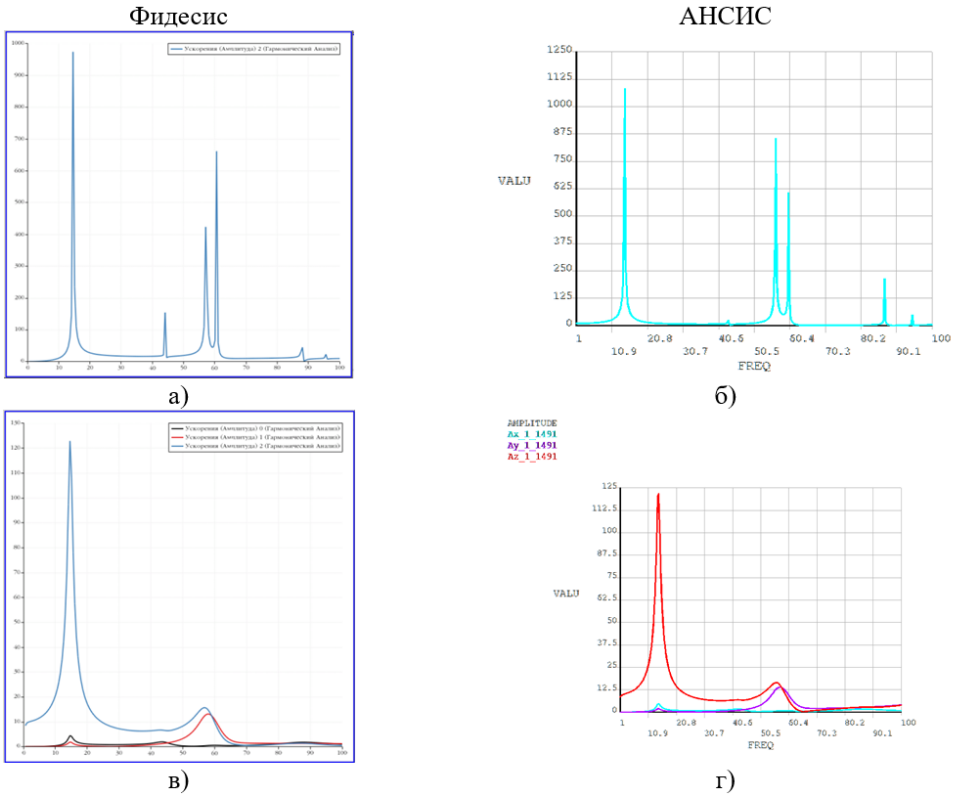


Рис. 5: Результаты гармонического анализа в ПК Фидесис а), в) и ПК ANSYS б), г)

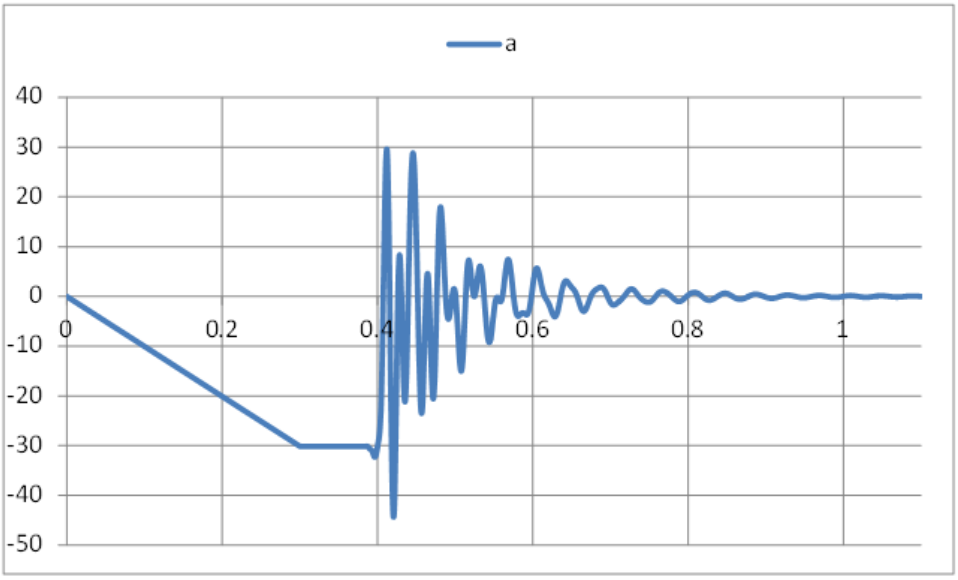


Рис. 6: Нестационарное воздействие (м/с^2) в углах пластины

3.3. Выводы

На основе решения данной задачи в ПК Фидесис и сравнения полученных результатов с результатами расчетов в ПК ANSYS можно сделать следующие

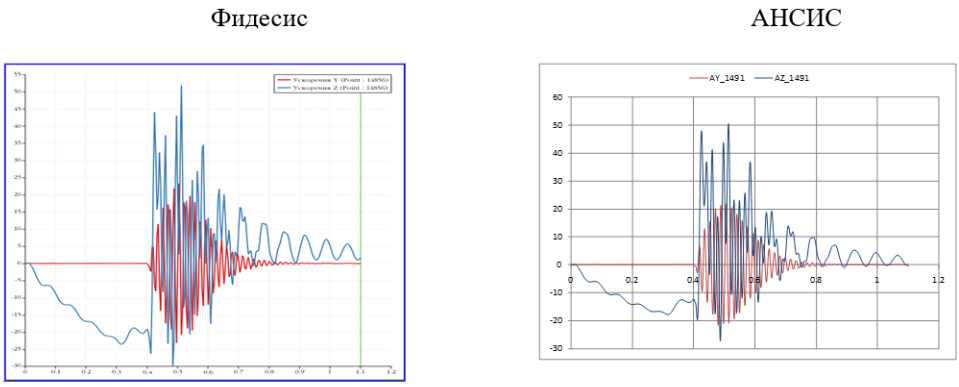


Рис. 7: Ускорения в контрольной точке (рис. 3) при нестационарном воздействии (рис. 6)

выводы:

-ПК Фидесис обеспечивает возможность решения задач модального и гармонического анализа, а также проведение расчета конструкций при нестационарном динамическом воздействии;

-обеспечивается возможность использования различных видов демпфирования как для отдельных материалов, так и для конструкции в целом. Близость разработчиков ПК ФИДЕС и возможность совместной работы, позволяет в дальнейшем рассчитывать на расширение типов параметров демпфирования, используемых при проведении различных видов динамического анализа;

-при решении указанных задач наблюдается хорошее совпадение результатов (различие не превышает 1%).

4. Модальный анализ конструкции с большим количеством контактных групп

4.1. Постановка задачи, описание модели

Практически все современные ПК, реализующие МКЭ, обеспечивают автоматическое определение контактных поверхностей, что существенно облегчает процесс построения сеток. Однако, наличие большого количества контактных поверхностей, даже при условии реализации контакта типа «склейка», приводит при расчете свободной (free-free) конструкции к появлению «паразитных» ненулевых частот, в то время, как теоретически, в такой постановке конструкция должна иметь шесть нулевых частот, соответствующих смещениям конструкции как жесткого тела. Величина этих паразитных

частот зависит от метода реализации контактов, однако, даже для варианта Multi Point Contact (MPC) – рекомендация разработчиков ПК ANSYS - остается весьма значительной.

В качестве такого примера рассмотрено задача определения собственных форм и частот типовой конструкции микроспутника CUB-Satформата 3U (рисунок 8а), внутренняя структура которого показана на рисунке 8б.

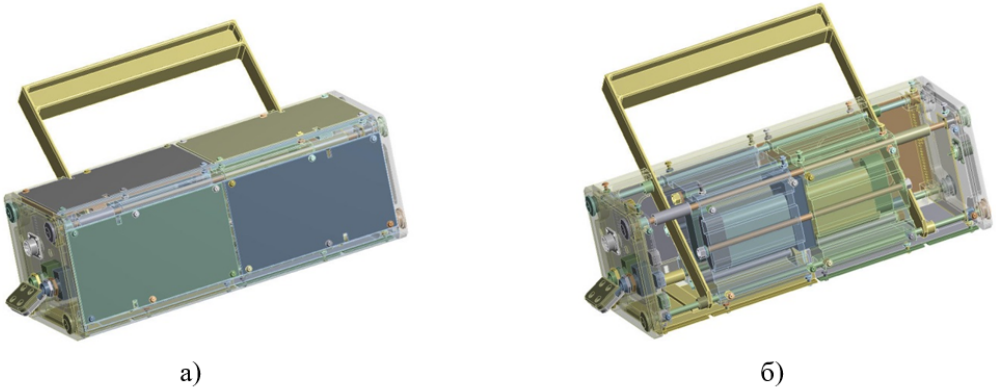


Рис. 8: Конструктивная схема микроспутника CUB-Sat

4.2. Результаты расчета

Задача решалась с в ПК ANSYSи ПК Фидесис. В обоих случаях для построения КЭ - модели использовался один и тот же внешний файл в формате «parasolid» (*.x_t), полученный из 3Д модели. Определению подлежали формы колебаний свободной конструкции. Формы колебаний, соответствующих первому упругому тону колебаний, полученных в ПК Фидесис и ПК ANSYS, представлены на рисунке 9.

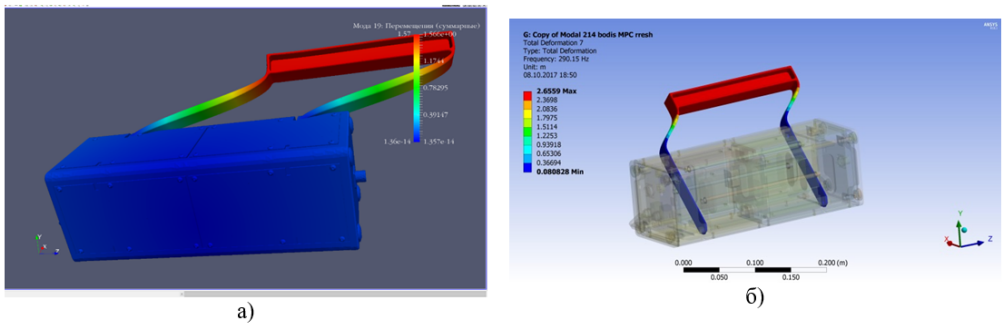


Рис. 9: Первый упругий тон колебаний в ПК Фидесис - а) и ПК ANSYS- б)

Полученные в качестве контрольного расчета в ПК Ансис результаты модального анализа, как при значениях «по умолчанию», так и в варианте

контактов типа «MPC» (см. таблицу 3) оказались существенно не нулевыми. При первичном модальном анализе, проведенном с помощью ПК Фидесис, частоты с 4 по 6, соответствующие смещениям как жесткого целого также существенно отличались от нуля.

После обсуждения полученных результатов с разработчиками ПК Фидесис был доработан в части реализации жестких контактов, что в конечном итоге позволило избавиться от «паразитных» ненулевых частот при решении задачи модельного анализа.

Таблица3 – Результаты модального анализа в ПКFidesys.

	Ansys		**Fidesys**
	Метод Лагранжа	MPC	Жесткий контакт
№	частота, Hz	частота, Hz	частота, Hz
1.	0	0,	0
2.	0	1,1731e-002	0
3.	8,4933e-003	2,1982e-002	0
4.	122,43	2,7237e-002	0
5.	126.34	4,8227	0
6.	132,67	6,3501	0
7.	389,02	374,93	370,15

4.3. Выводы

На основе представленных результатов можно сделать следующие выводы:

-при работе со сложными моделями ПК Фидесис обеспечивает возможность автоматического определения контактных поверхностей;

-при наличии большого количества контактных поверхностей реализованный в ПК Фидесис для учета зон контакта метод «прямого исключения» обеспечивает более корректное построение глобальных матриц жесткости и, как следствие, более корректное проведение различных видов динамического анализа.

5. Расчет скважины с давлением (использование спектральных элементов)

5.1. Постановка задачи, описание модели

Одной из интересных особенностей ПК Фидесис является возможность использования элементов высокого порядка - «спектральных» элементов. Применение спектральных элементов в задачах, имеющих плохую сходимость, позволяют существенно повысить точность решения при относительно грубой сетке конечных элементов. Ниже рассмотрен пример использования

спектральных элементов для расчета пластических деформаций в бесконечной цилиндрической скважине в сплошной породе при приложении давления. Для материала породы принята модель пластичности Друкера – Прагера.

Конечно-элементная схема задачи в ПК Фидесис содержит 900элементов (рисунок 10 –КЭ модели зоны скважины а) ПК Фидесис, б), в) г) – ПК ANSYS. а). При решении использовались элементы пятого и седьмого порядка. При этом количество узлов в модели составляло 900*5*5 и 900*7*7 соответственно. При проведении сравнительного расчета в ПК ANSYS было рассмотрено несколько вариантов сеток (рисунок 10 –КЭ модели зоны скважины а) ПК Фидесис, б), в) г) – ПК ANSYS. б, 10 –КЭ модели зоны скважины а) ПК Фидесис, б), в) г) – ПК ANSYS. в, 10 –КЭ модели зоны скважины а) ПК Фидесис, б), в) г) – ПК ANSYS. г) на основе наиболее точных (8-ми узловых) элементов второго порядка, включая и значительно боле густую сетку, содержащую более 49000 элементов и 148000 узлов.

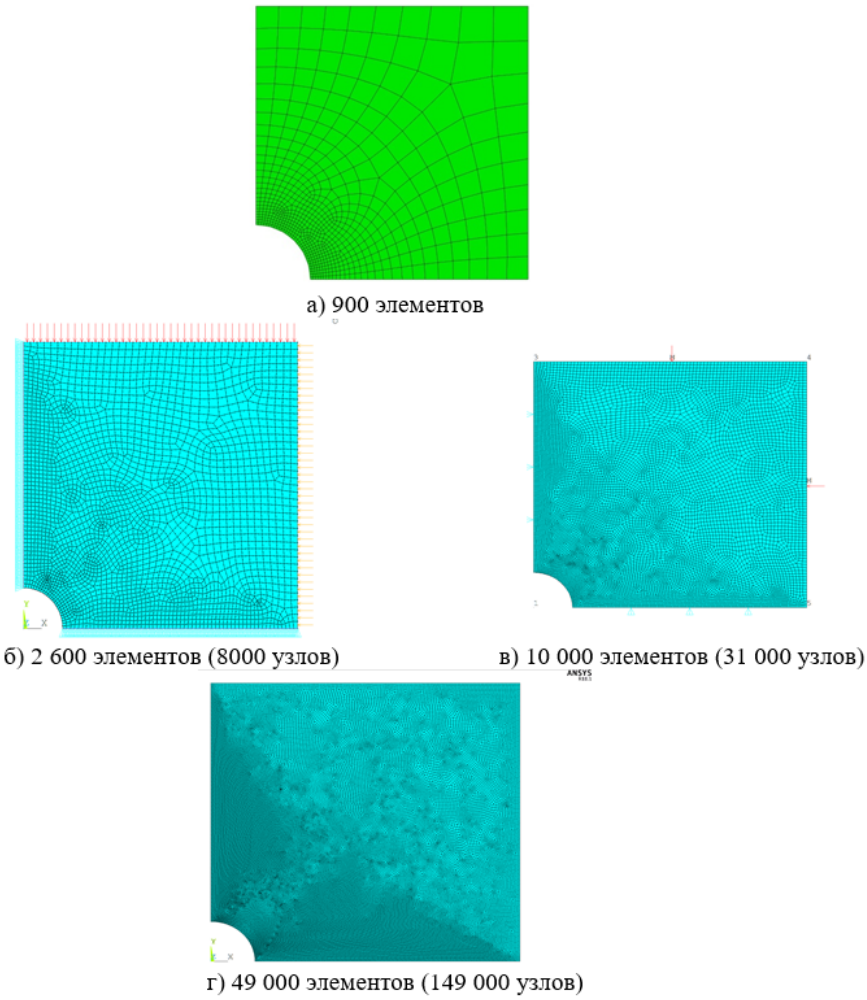
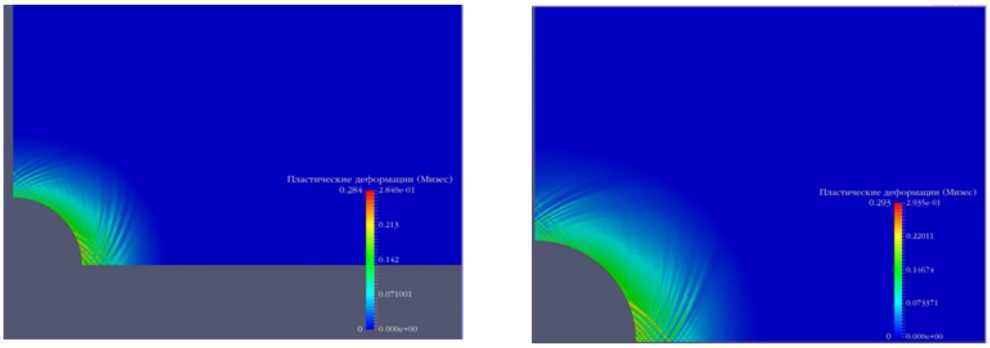


Рис. 10: КЭ модели зоны скважины а) ПК Фидесис, б), в) г) – ПК ANSYS.

5.2. Результаты расчета

Результаты расчета в ПК Фидесис представлены на рисунке 10 –КЭ модели зоны скважины а) ПК Фидесис, б), в) г) – ПК ANSYS.. Как видно из представленных результатов, четкая система полос скольжения хорошо видна уже при использовании элементов пятого порядка. Результаты расчета пластических деформаций в ПК ANSYS показаны на рисунке 10 –КЭ модели зоны скважины а) ПК Фидесис, б), в) г) – ПК ANSYS.. При решении задачи в ПК ANSYS некоторый намёк на систему полос скольжения начинает проявляться лишь во второй схеме, при существенно более мелкой, чем в ПК Фидесис сетке конечных элементов. Отчетливые очертания полосы скольжения приобретают лишь в третьей расчетной схеме. При этом, в результатах, полученных в ПК ANSYSотсутствует численная сходимость по величинам пластических деформаций.



КЭ 5-го порядка КЭ 7-го порядка

Рис. 11: Пластические деформации, полученные в ПК Фидесис

5.3. Выводы

Наличие в ПК Фидесис спектральных элементов[5, 9,10] обеспечивает

-более корректное решение задач с глубокой пластикой;

-возможность уточнения КЭ моделей без перегенерации расчетных сеток;

6. Заключение (Общие результаты тестирования ПК Фидесис)

В процессе тестирования решены задачи по определению НДС при переменном статическом воздействии, определению форм и частот собственных

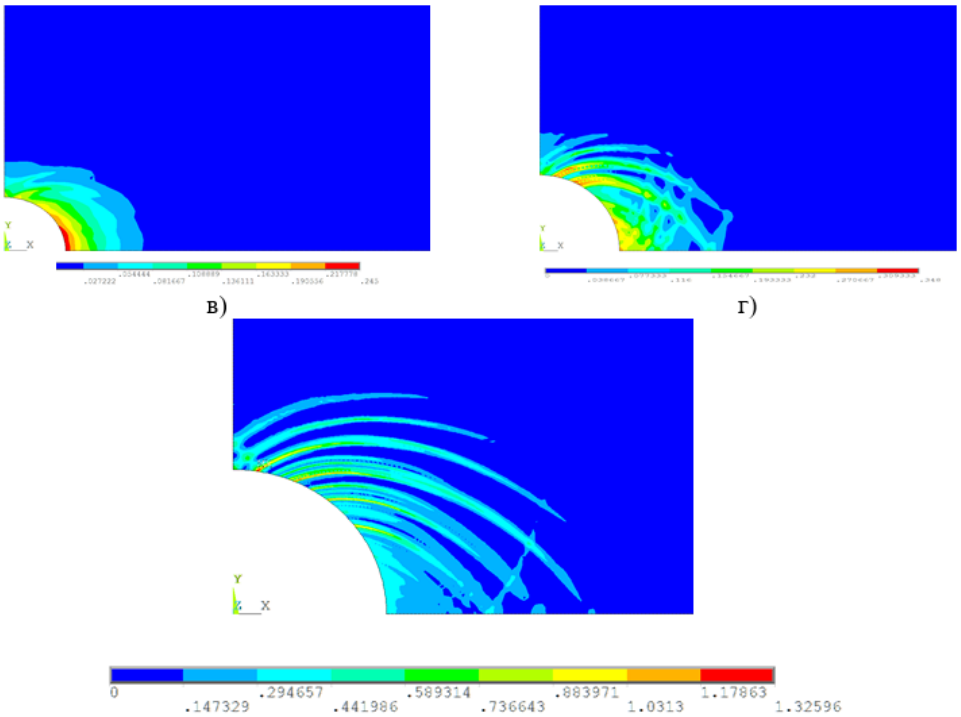


Рис. 12: Пластические деформации, полученные в ПК АНСИС

колебаний, определению реакции конструкции при гармоническом воздействии (моделированию виброиспытаний). При этом были опробованы возможности пакета в части импорта внешних геометрических моделей и собственные возможности ПК для построения геометрических и расчетных моделей. На основании проведенных работ можно сделать следующие выводы.

В целом ПК Фидесис показал свою работоспособность.

В настоящее время возможности ПК Фидесис в части подготовки сложных КЭ моделей типа изделия уступают импортным универсальным пакетам (ANSYS, Nastran). Тем не менее в составе ПК Фидесис имеются все необходимые элементы, обеспечивающие эффективность его применения:

-препроцессор, обеспечивающий построение геометрических моделей, конвертирование из 3D моделей, построение конечно-элементных моделей;

-модульный процессор для решения линейных и нелинейных статических и динамических задач, расчета устойчивости конструкций, определения эквивалентных характеристик композитных конструкций и др.;

-постпроцессор для визуализации и обработки результатов.

Набор конечных элементов на сегодня включает одно, двух и трехмерные элементы, позволяет создавать весьма сложные модели. Для более эффективного применения ПК требуется продолжить расширение набора конечных

элементов, приближая его к наиболее распространенным импортным пакетам.

Сравнительный анализ расчетов на моделях с близкими сетками конечных элементов, проведенных в ПК Фидесис и ПК ANSYS, показывает хорошее совпадение результатов.

В процессе тестирования была также опробована и подтверждена эффективность взаимодействия с разработчиками ПК, в результате чего был реализован и включен в состав ПК новый алгоритм учета контактных элементов, позволяющий повысить точность расчетов при динамическом анализе в моделях с большим количеством контактов.

Отличительной особенностью ПК Фидесис является наличие спектральных элементов высокого порядка, позволяющих, в ряде случаев, повысить точность расчета без перестроения сетки конечных элементов.

Сильной стороной пакета является нацеленность на реализацию практических потребностей пользователей и возможность отладки новых решений в виде специализированных блоков с последующим включением в пакет.

К недостаткам ПК Фидесис на сегодня следует отнести отсутствие полноценного конвертора моделей из ПК ANSYS. Создание подобного конвертора позволит ускорить внедрение ПК Фидесис в практику работы за счет возможности использования существующих моделей.

В целом, результаты тестирования показывают, что ПК Фидесис при решении ряда задач в области анализа прочности конструкций может быть использован как второй (контрольный) ПК. При дальнейшей совершенствовании с учетом практических потребностей активных пользователей ПК Фидесис может быть использован как основа для создания отраслевого решения в области динамического моделирования и прочности.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безмозгий И.М., Софинский А.Н., Чернягин А.Г. Напряженно-деформированное состояние и прочность сварной оболочки с тоннельной трубой // Космическая техника и технологии. 2016. № 3(14). С. 43–55.

2. Безмозгий И.М., Бобылев С.С., Софинский А.Н., Чернягин А.Г. Нагружение и прочность конструкций транспортного космического корабля при воздействии отсечки тяги двигателя третьей ступени ракеты-носителя "Космическая техника и технологии"№2,2017 с.62-79

3. Безмозгий И.М., Софинский А.Н., Чернягин А.Г. Отработка вибропрочности узлового модуля Российского сегмента Международной космической станции // Космическая техника и технологии. 2015. № 3(10). С. 15–25.

4. Безмозгий И.М., Казакова О.И., Софинский А.Н., Чернягин А.Г. Отработка вибропрочности автоматического космического аппарата дистан-

ционного зондирования Земли // Космическая техника и технологии. 2014. № 4(7). С. 31–41.

5. Левин В.А., Вершинин А.В. 2015, Нелинейная вычислительная механика прочности в 5 томах. “Том 2. Численные методы. Реализация на высокопроизводительных вычислительных системах”. М.: Физматлит – 543с.

6. Морозов Е.М., Левин В.А., Вершинин А.В. 2015, Прочностной анализ. Фидесис в руках инженера. М.: URRS – 400 с., https://cae-fidesys.com.

7. V.A. Levin, K.M. Zingerman, A.V. Vershinin, E.I. Freiman, A.V. Yangirova. Numerical analysis of the stress concentration near holes originating in previously loaded viscoelastic bodies at finite strains // International Journal of Solids and Structures. 2013. V. 50. No. 20-21. P.3119-3135. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2013.05.019.

8. Levin V.A., Morozov E.M. Nonlocal criteria for determining a prefracture zone in the process of defect growth for finite strains. Doklady Physics. 2007. V. 52. No. 7. P. 391-393. DOI: 10.1134/S1028335807070129.

9. Seriani G. A parallel spectral element method for acoustic wave modeling // J. Comput. Acoust. 2007. V. 5, № 1. P. 53–69. 982.

10. Seriani G. 3-D large-scale wave propagation modeling by spectral element method on Cray T3E multiprocessor // Comput. Meth. Appl. Mech. a. Eng. 2008. V. 164, № 1–2. P. 235–247.

11. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L. The finite element method. V. 2. Solid mechanics. — L.: Butterworth–Heinemann, 2000. — 479 p.

12. https://www.3ds.com/products-services/simulia/

13. http://www.ansys.com

14. http://www.cae-fidesys.ru

15. http://www.nastran.com

REFERENCES

1. Bezmozgii I.M., Soinskii A.N., Chernyagin A.G. 2016, Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie i prochnost’ svarnoi obolochki s tonnel’noi truboi [Mode of deformation and strength of welded shell with tunnel pipe]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, no. 3(14), pp. 43–55.

2. Bezmozgiy I.M., Bobylev S.S., Soinskiy A.N., Chernyagin A.G. 2017, The efect of thrust cut-of of the third stage of the launch vehicle on the loading and strength of the transport cargo vehicle structure *“SPACE ENGINEERING AND TECHNOLOGY»*, №2, p.62-79

3. Bezmozgii I.M., Soinskii A.N., Chernyagin A.G. 2015, Otrabotka vibroprochnosti uzlovogo modulya Rossiiskogo segmenta Mezhdunarodnoi kosmicheskoi stantsii [vibration strength design for the node module of the Russian Segment of the International Space Station]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, no. 3(10), pp. 15–25.

4. Bezmozgii I.M., Kazakova O.I., Soinskii A.N., Chernyagin A.G. 2014, Otrabotka vibroprochnosti avtomaticheskogo kosmicheskogo apparata distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Perfecting vibration strength properties of an unmanned Earth remote sensing spacecraft]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, no. 4(7), pp. 31–41.

5. Levin V.A., Vershinin A.V. 2015, *Nonlinear computational mechanics of strength in 5 volumes. "Vol. 2. Numerical methods. Implementation on high-speed computational systems"*. M.: Fizmatlit – 543p.

6. Morozov Ye.M., Levin V.A., Vershinin A.V. 2015, *Strength analysis. Fidesys in engineer's hands.* M.: URRS – 400p., https://cae-fidesys.com

7. V.A. Levin, K.M. Zingerman, A.V. Vershinin, E.I. Freiman, A.V. Yangirova. 2013, Numerical analysis of the stress concentration near holes originating in previously loaded viscoelastic bodies at finite strains // *International Journal of Solids and Structures.* V. 50. No. 20-21. P.3119-3135. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2013.05.019.

8. Levin V.A., Morozov E.M. 2007, Nonlocal criteria for determining a prefracture zone in the process of defect growth for finite strains. *Doklady Physics.* V. 52. No. 7. P. 391-393. DOI: 10.1134/S1028335807070129.

9. Seriani G. A 2007. parallel spectral element method for acoustic wave modeling // *J. Comput. Acoust.* V. 5, № 1. P. 53–69. 982.

10. Seriani G. 3-D large-scale wave propagation modeling by spectral element method on Cray T3E multiprocessor // *Comput. Meth. Appl. Mech. a. Eng.* 2008. V. 164, № 1–2. P. 235–247.

11. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L. 2000, The finite element method. *V. 2. Solid mechanics. — L.: Butterworth–Heinemann*, — 479 p.

12. DASSAULT SYSTÈMES, THE 3DEXPERIENCE COMPANY official website available at: https://www.3ds.com/products-services/simulia/

13. ANSYS official website available at: http://www.ansys.com

14. Fidesys official website available at: http://www.cae-fidesys.ru

15. NASTRAN official website available at: http://www.nastran.com

получено 22.05.2017
принято в печать 14.09.2017