

УДК 622:51

К.З. Хайрнатов

**МНОГОСТЕПЕННЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СТЕНДЫ
ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ:
СТАТИЧЕСКИЙ И ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ**

В статье рассматриваются проблемы проектирования и исследования конструкций многостепенных динамических стендов полунатурного моделирования из композиционных материалов. Приведены соотношения и зависимости для проведения исследований стендов на статические и динамические нагрузки. Даны рекомендации учета конструктивных элементов: редукторов и подшипников, неоднозначно реализуемых в методе конечных элементов. Для решения поставленных задач применяются: моделирование на САПР CATIA, метод конечных элементов и аналитические методы.

Многостепенные динамические стенды полунатурного моделирования представляют собой сложную пространственную конструкцию, имеющую несколько степеней свободы (каналов) каждый из которых приводится в движение двигателем, через связанный со стендом редуктор и управляется электро- и гидросистемами посредством компьютерных программ. При этом движение каждого канала является независимым и осуществляется по заданным программой законам, тем самым обеспечивается многостепенное перемещение исследуемого изделия. Рассматриваемый трехступенчатый динамический стенд полунатурного моделирования состоит из неподвижного основания, на котором на опорном подшипнике во-

круг вертикальной оси вращается курсовая вилка (курсовой канал). Внутри курсовой вилки на подшипниковых опорах вращается тангажный канал. Внутри тангажного канала расположено креновое кольцо или креновая рамка, которая в свою очередь вращается вокруг своей оси внутри тангажного канала. Таким образом обеспечивается трехступенчатое перемещение исследуемого изделия, помещаемое в креновое кольцо или рамку. Основное назначение стендов имитировать полетные характеристики в наземных условиях.

При написании данной статьи, авторы руководствовались работами [1, ..., 6], в которых рассмотрены вопросы динамического поведения оболочечных конструкций и рассмотрены вопросы исследования многостепенных динамических стендов.

Одними из основных параметров характеризующих эффективность работы многостепенного динамического стенда являются его инерционные характеристики, чем ниже инерционность стенда, тем адекватнее стенд реагирует на подаваемые сигналы, поэтому в основном стенды изготавливаются из материалов имеющих высокую удельную прочность. Удельная прочность композиционных материалов в несколько раз превосходит удельную прочность однородных материалов. В тоже время, композиционный материал является анизотропным,

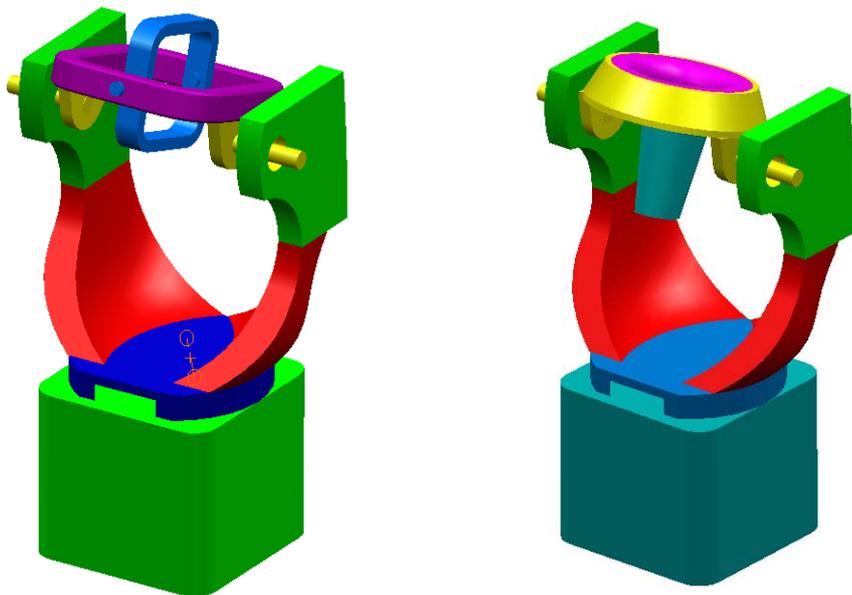


Рис. 1. Модели стендов турельной и рамной конструкции

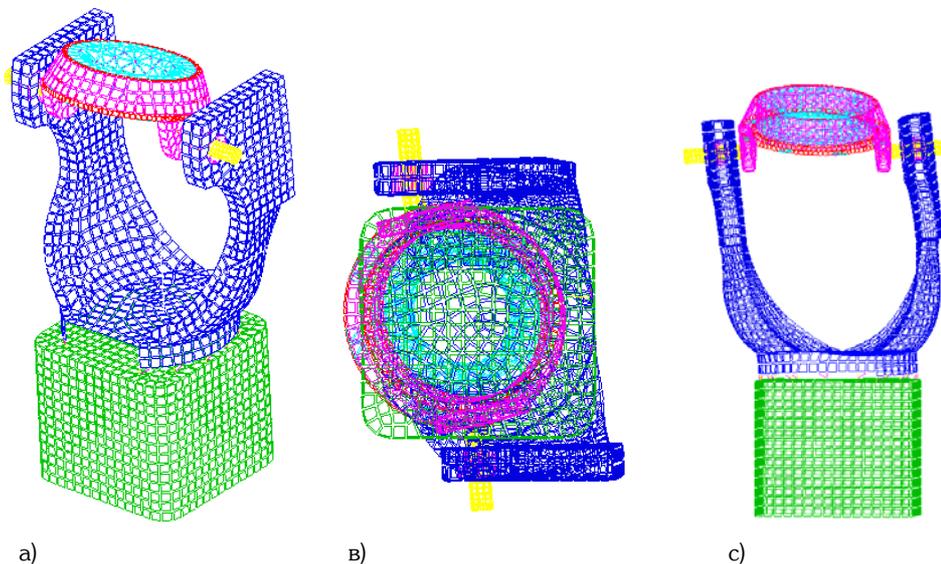


Рис. 2. а) - конечноэлементная аппроксимация стенда; в) - первая (фронтальный вид); с) - вторая (вид сверху) формы собственных колебаний

имеющие различные характеристики в разных направлениях, в связи с этим, необходимо, по возможности, волокна композиционного материала расположить таким образом, чтобы максимальная прочность материала соответствовала максимальному напряжению возникающему в нем. Кроме того, некоторые детали стенда, такие как зубчатый венец или редуктора затруднительно выполнить из композиционного материала, поэтому необходимо рассмотреть вопросы сопряжения деталей из однородных и композиционных материалов.

До настоящего времени композиционные материалы, все более широко применяемые в авиации и дающие значительные преимущества по сравнению с традиционными материалами, не использовались при проектировании и производстве многостепенных динамических стендов, тем более, не проводился статический расчет и анализ стендов из композиционных материалов при действии нагрузок и различном расположении слоев композита. Как показывает опыт, композиционные материалы благодаря высоким физико-механическим свойствам позволяют улучшить технические характеристики разрабатываемых изделий.

Применительно к многостепенным динамическим стендам композиционный материал позволит снизить инерционные характеристики стенда, являющихся одним из основных параметров, влияющих на эффективность его работы. В связи с этим, изучение, проектирование и расчет многостепенных динамических стендов из композиционных материалов является важной и актуальной темой.

Объектом разработки (исследования) является отработка методов проектирования и анализа многостепенных динамических стендов полуна-

турного моделирования из композиционных материалов на базе разрабатываемой методологии моделирования, проектирования, статического расчета и анализа стендов. Разрабатываемые методология и алгоритмы, состоящие в приведенной последовательности моделирования на САПР высокого уровня, статического расчета и анализа, а также учете влияния расположения материала на прочностные характеристики многостепенных динамических стендов полунатурного моделирования позволят решать следующие задачи:

- моделировать стенд из композиционных материалов на САПР высокого уровня;
 - исследовать напряженно-деформированное состояние стендов из композиционных материалов;
 - определять частотные характеристики стенда;
 - учитывать влияние расположения слоев композиционного материала на прочностные и жесткостные характеристики стенда;
 - исследовать кинематическое поведение стенда.

Моделирование, проектирование и анализ поведения стенда проводились с использованием САПР CATIA и его кинематического модуля.

Рассмотрим проблемы проектирования и методы их решения. Сложности проектирования конструкции многостепенного динамического стенда заключаются в присутствии в конструкции оболочек двоякой кривизны с кромками, описанными различными кривыми, а также в сопряжении таких оболочечных элементов с примыкающими или соседними оболочечными элементами имеющими также сложные формы. Кроме того, применение композиционных материалов еще более усложняет проектирование многостепенного динамического стенда.

Это связано с необходимостью рассмотрения вопросов сопряжения однородного и композиционного материалов, оптимального расположения слоев композита с точки зрения прочностных и жесткостных характеристик, технологией изготовления изделий из композиционных материалов. В связи с менее жесткими модульными характеристиками композиционного материала необходимо также предусмотреть заполнение свободного пространства оболочечных элементов ячеистой (сотовой) или пенопластовой структурой с целью получения трехслойной оболочки имеющей более высокие жесткостные характеристики по сравнению с пустотелой оболочкой.

Благодаря широким возможностям САПР САТИА имеющей одну из наиболее развитых программ проектирования сложных поверхностей удастся достаточно точно состыковать сложные оболочки с помощью процедуры сглаживания полиномов описывающих сложные пространственные кривые и поверхности.

Вторая проблема, возникающая при проектировании динамического стенда, заключается в предварительной оценке работоспособности и анализе поведения стенда. Кинематический модуль САПР САТИА позволяет оценить на стадии проектирования пространственное движение всех каналов стенда, редукторов и устранить возможное взаимопересечение деталей каналов во время движения. Кинематический модуль моделирует пространственное движение стенда, причем закон движения каждого канала задается независимо друг от друга по самым разнообразным кривым или с применением аналитических уравнений. При этом законы движения должны быть согласованы. Согласование законов движения проверяется экспериментальным путем.

Третий этап проектирования заключается в аппроксимации конструкции стенда конечными элементами и проведении исследования на статические нагрузки и определение частотных характеристик стенда. Эти исследования в настоящей работе проводится с применением расчетного модуля САТИА, методом конечных элементов. Расчетный модуль САТИА имеет обширную библиотеку конечных элементов, в том числе и слоистые конечные элементы позволяющие задавать произвольное число слоев с различными физико-механическими характеристиками и разным углом расположения основы композиционного материала. В тоже время, трехслойные оболочки, т.е. оболочки, имеющие жесткие несущие верхний и нижний слой и материал с характеристиками пенопласта или иного легкого заполнителя между ними в основном служащий препятствием к сближению внешних слоев и восприятию сдвиговых напряжений, исследуются по иным законам, чем многослойные конструкции. При исследовании трехслойной оболочечной конструкции необходимо учитывать обжатие наполнителя, характер распределения сдвиговых характеристик по толщине. Поэтому возникает проблема задания характеристик композиционного материала, соответствующих действительному поведению трехслойного материала под действием нагрузок.

Проектирование трехслойных оболочек и пластин, из которых и состоит конструкция композиционного динамического стенда, включает следующие процедуры [7, ..., 10]:

- определение приведенных жесткостных, прочностных и массовых характеристик наполнителя;
- определение напряженно-деформированного состояния пластины или оболочки и проверку ее на прочность;

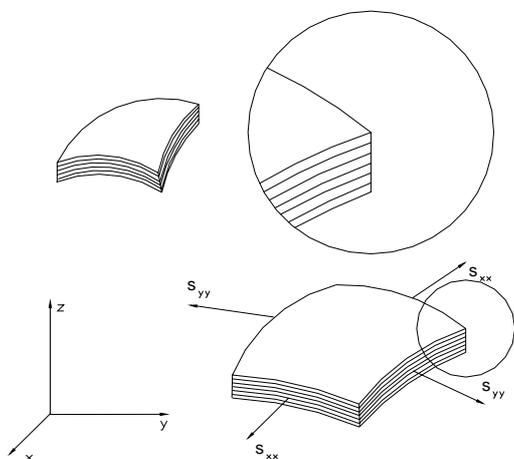


Рис. 3. Многослойный трех-четырёх угольный оболочечный конечный элемент

- расчет местной устойчивости элементов конструкции (пластин и оболочек) и проверку выполнения условий сохранения несущей способности при потере устойчивости;

- удовлетворение критерию прочности связи заполнителя с несущими слоями;

- определение толщины несущих слоев.

Проектирование трехслойных конструкций включает множество варьируемых параметров, поэтому приведем проверенные правила [7], позволяющие уменьшить число варьируемых параметров:

- армированный заполнитель и основу несущих слоев следует по возможности располагать пропорционально действующим напряжениям;

- размеры и форму ячейки дискретного наполнителя следует располагать таким образом, чтобы местная потеря устойчивости ячейки соответствовала пластической области несущего слоя. Это позволяет сохранять форму поверхности конструкции.

Это условие соблюдается при отношении размера ячейки к толщине несущего слоя не более 25;

- Относительные жесткости наполнителя и несущего слоя должны быть равны.

Наиболее приспособленным для моделирования конструкции стенда является многослойный оболочечный трех-четырёх угольный конечный элемент (рис. 3), имеющий шесть степеней свободы в

каждом узле.

Рассматриваемый конечный элемент учитывает как изгибные, так и мембранные деформации, материал анизотропный с характеристиками, задаваемыми в плоскости элемента по слоям и воспринимающий сосредоточенные, распределенные, массовые и температурные нагрузки.

В результате вычислений определяются компоненты напряженно-деформированного состояния стенда в срединной поверхности по слоям и на граничных поверхностях оболочки при действии статических эксплуатационных нагрузок.

Наиболее слабым звеном при дискретизации стенда является моделирование шарикоподшипников. Учет их взаимодействия с конструкцией является сложной задачей. Геометрически идентичное моделирование шарикоподшипников ведет к неоправданному увеличению числа уравнений, погрешность решения которых сводит на «нет» усилия по точному моделированию, поэтому для учета

шарикоподшипников принимались допущения, позволяющие с достаточной достоверностью учесть механизм взаимодействия шарикоподшипника с конструкцией.

Допущения сводятся к следующему:

- шарик заменялся стержневым элементом, имеющим шарнирное опирание по концам, что в большой степени соответствует поведению шарика в подшипнике

- жесткость стержневой системы, имитирующей шарикоподшипник, принималась равной жесткости шарикоподшипника

Для простоты расчетов, редукторы, входящие в стенд, рассчитывались отдельно, с помощью разработанной программы, и в дальнейшем упругая податливость редукторов учитывалась при расчете конструкции.

Опорно-поворотный механизм стенда моделировался совокупностью описанных выше конечных элементов. Общее число элементов составило 3170 КЭ, включая стержневые элементы, учитывающие подшипниковые опоры

Точность получаемых результатов проверялась путем сходимости результатов в зависимости от числа элементов разбиения. Результаты напряженно-деформированного состояния при разбиении на 5006 КЭ и принятая схема отличались на приемлемую погрешность для принятого вида расчетов ~ 3 %.

Точность программы проверялась решением тестовых задач и сравнением полученных результатов с известными аналитическими решениями. Расхождение результатов наблюдалось в третьем знаке после запятой.

Решение задач определения динамических характеристик стенда можно получить из уравнения Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\{q\}}} + \frac{\partial U}{\partial \{q\}} = \{Q\}, \quad (1)$$

где $\dot{\{q\}}$ – обобщенная скорость,

$\{q\}$ – обобщенное перемещение,

$T = \iiint [m] \times \dot{\{q\}} \times dA$ – кинетическая

энергия, $U = \iiint \langle \sigma \rangle \times \{ \varepsilon \} \times dA$ – потенциальная энергия,

$Q = \iiint \langle p \rangle \times \{ u \} \times dA$ – вектор внешних

сил, $[m]$ – матрица массовых харак-

теристик материала, $\langle \sigma \rangle$ – вектор на-

пряжений, $\{ \varepsilon \}$ – вектор деформаций,

$\langle p \rangle$ – внешние силы, $\{ u \}$ – вектор пе-

ремещений, dA – элементарный объ-

ем, через $\langle \rangle$ и $\{ \}$ обозначены, со-

ответственно, вектор строка и вектор

столбец, точка над буквой означает

дифференцирование по времени t .

Принимая во внимание зависимо-

$$\begin{aligned} \langle \sigma \rangle &= [E] \times \{ \varepsilon \}, \quad \{ \varepsilon \} = [S] \times \{ u \}, \\ \{ u \} &= [L] \times \{ q \}, \quad \dot{\{ u \}} = [L] \times \dot{\{ q \}}, \end{aligned}$$

где $[E]$ – матрица механических ха-

рактеристик материала, $[S]$ – матри-

ца связи деформаций и перемещений,

$[L]$ – матрица перехода от перемеще-

ний $\{ u \}$ к обобщенным перемещени-

ям $\{ q \}$. Для композиционного мате-

риала соотношения напряжения-

деформации можно выписать в сле-

дующей форме

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ \kappa \end{Bmatrix} \quad \text{или}$$

$$\{\sigma\} = [E_1] \times \{\varepsilon\}$$

Здесь обозначено: $\left\{ \begin{matrix} N \\ M \end{matrix} \right\}$ мембран-

ные усилия и изгибающие моменты, $[A], [B], [D]$ -подматрицы характеристик композиционного материала имеющие одинаковую структуру. В частности подматрица $[A]$ связи мембранных усилий и деформаций имеет вид

$$[A] = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 & A_4 & A_5 & A_6 \\ A_2 & A_7 & A_8 & A_9 & A_{10} & A_{11} \\ A_3 & A_8 & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} \\ A_4 & A_9 & A_{13} & A_{16} & A_{17} & A_{18} \\ A_5 & A_{10} & A_{14} & A_{17} & A_{19} & A_{20} \\ A_6 & A_{11} & A_{15} & A_{18} & A_{20} & A_{21} \end{bmatrix}$$

Интегрируя составляющие уравнения (1) по обобщенным скоростям и перемещениям приводим уравнение (1) к виду (2).

$$[M] \times \left\{ \ddot{q} \right\} + [K] \times \{q\} = \{Q\} \quad (2)$$

Здесь обозначено $[M]$ - матрица масс, $[K]$ - матрица жесткости, $\{Q\}$ - вектор внешних сил.

Задавая решение уравнения (2) в виде и приравнявая вектор внешних сил нулю, получим уравнение для определения собственных колебаний конструкции

$$([M] \times \{\omega\} + [K]) \times \{q\} = \{0\} \quad (3)$$

Определение собственных частот и форм колебаний конструкции сводится к определению собственных значений и собственных векторов матрицы $[K]^{-1}[M]$.

Уравнение для определения напряженно-деформированного состояния конструкции получим из

уравнения (2) приравнявая нулю первый член уравнения.

$$[K] \times \{q\} = \{Q\} \quad (4)$$

Четвертый этап проектирования заключается в проведении вычислений, исследовании и анализе полученных результатов. Напряженно-деформированное состояние стенда определялось при аварийных нагрузках приложенных в местах расположения стопорных устройств. В результате проведенного исследования получена полная картина напряженно-деформированного состояния стенда. Примененная процедура позволяет рассчитывать стенки различной комплектации, разбивая на конечные элементы лишь изменяемые элементы.

Определялись и анализировались частотные характеристики стенда выполненного из однородного материала, а именно магниевое сплава, наиболее часто применяемого при производстве стенов, вследствие высокой удельной прочности. Получены первые три низшие собственные частоты, ограничивающие диапазон рабочих частот стенда, т.к. чем выше низшие частоты стенда, тем больший диапазон рабочих частот не подвергается помехам резонансных частот. Также были получены формы колебаний стенда. Исследования были выполнены с целью получения частот, необходимых для сравнения с проводимыми в дальнейшем исследованиями стенов из композиционного материала.

На рис. 4 показаны распределение перемещений и напряжений в оболочках стенда при приложении динамической нагрузки к стопорному устройству, расположенному в середине правой ветви курсовой вилки. Динамическая нагрузка возникает при ударе тангажного кольца о стопорное

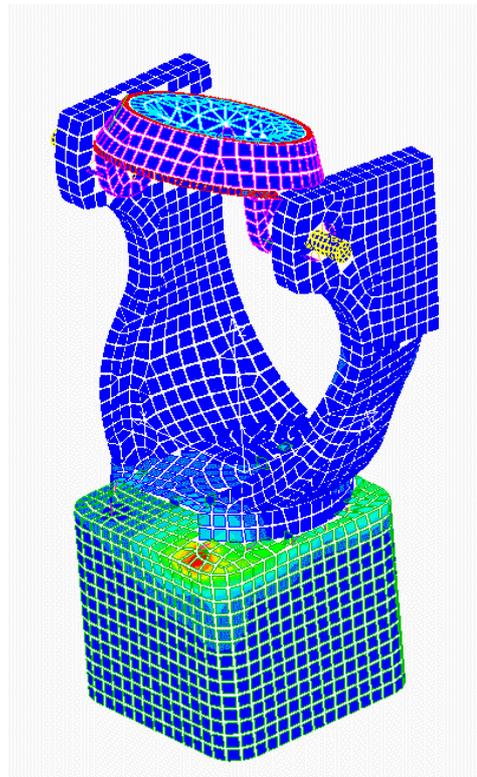
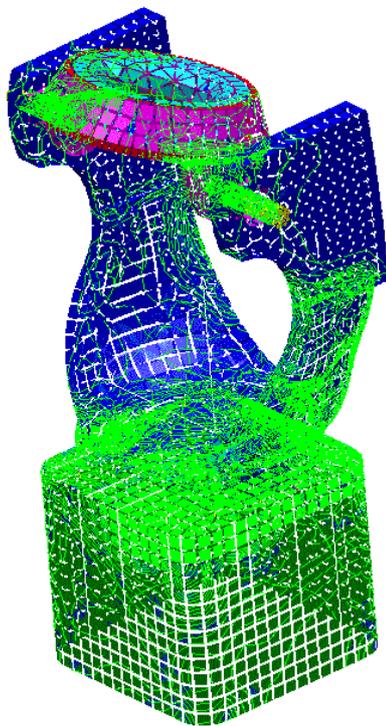


Рис. 4. Распределение перемещений и напряжений в стенде при приложении нагрузки к стопорному устройству

устройство, служащее ограничителем движения тангажного канала стенда. В расчетах динамическая нагрузка в соответствии с принципом Даламбера пересчитывалась на статическую нагрузку. Сеткой показана конечно-элементная аппроксимация стенда

Полученные результаты собственных колебаний стенда хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными, как по качественным, так и по количественным показателям (в пределах 15-20 %).

Помимо этого, проведено моделирование, расчет и кинематический анализ редуктора. Расчет жесткости и определение собственной частоты редуктора проводились на основе

разработанной в поле электронных таблиц EXCEL программы. Расчеты хорошо согласуются (в пределах 15 %) с имеющимися экспериментальными данными. Работоспособность редуктора проверялась посредством кинематического модуля САПР САТИА.

Для проведения исследований многостепенного динамического стенда из композиционного материала была проведена замена однослойных трех-четырёх угольных оболочечных конечных элементов на многослойные конечные элементы (рис. 3).

Процедура замены одного конечного элемента на подобный по геометрическим параметрам в расчетном модуле САПР САТИА автоматизиро-

вана, и не составляет особых проблем.

Проведенные исследования многостепенных динамических стенов полунатурного моделирования показали, что разработанные методология и алгоритмы проектирования, модели-

рования, расчета и анализа позволяют проектировать стенд, исследовать его напряженно-деформированное состояние и определять частотные характеристики. Причем погрешность вычислений сопоставима с экспериментальными результатами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Образцов И.Ф., Вольмир А.С., Хайрнатов К.З.* Тороидальные оболочки: запаздывающие катастрофы при динамическом нагружении. //Докл. АН СССР. 1982. т.266. №6. - с. 1082-1084.
2. *Бакулин В.Н., Образцов И.Ф., Потопяхин В.А.* Динамические задачи нелинейной теории многослойных оболочек. Действие интенсивных термосиловых нагрузок, концентрированных потоков энергии. //М.: Наука, Физматлит, - 1998. - 464 с.
3. *Бакулин В.Н., Хайрнатов К.З.* Колебания слоистых преднапряженных цилиндрических оболочек, //Труды Всесоюзного научно-технического семинара «Применение полимерных композиционных материалов в машиностроении». - Ворошиловград, 19, 20 мая 1987. - С. 36-40.
4. *Хайрнатов К.З., Якушева А.Б.* Методология статического и динамического анализа и оптимизация компоновочных схем многостепенных динамических стенов полунатурного моделирования. //Труды Международной научной конференции «Архитектура оболочек и прочностной расчет тонкостенных строительных и машиностроительных конструкций сложной формы», Москва, 2001. с. 403-408.
5. *Хайрнатов К.З.* Методология оптимизации компоновочных схем многостепенных динамических стенов полунатурного моделирования //Расчет оболочек строительных конструкций. Изд-во РУДН. - М.: 2001. - С. 56-60.
6. *Хайрнатов К.З.* Разработка методологии проектирования, расчета и анализа многостепенных динамических стенов полунатурного моделирования из композиционных материалов. //Материалы Международной конференции CAD/CAM/PDM – 2002. Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта. //Изд-во ИГТУ им. В.А.Трапезникова, Москва 8-12 апреля 2002 г. том 1. С. 383-390.
7. *Александров А.Я., Куршин Л.М.* Трехслойные пластины и оболочки - //В кн: Прочность, устойчивость, колебания. - М.: Машиностроение, 1968, т.2. - с. 243-326.
8. *Композиционные материалы:* Справочник //В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; Под общ. ред. В.В. Васильева и Ю.М. Тарнопольского. - М.: Машиностроение. 1990.-512 с.
9. *Образцов И.Ф., Васильев В.В., Бунаков В.А.* Оптимальное армирование оболочек из композиционных материалов. - М.: Машиностроение. 1977. - 144с.
10. *Болотин В.В., Новичков Ю.П.* Механика многослойных конструкций, М.: Машиностроение. 1980, 376 с. **ГЛАВ**

Коротко об авторе

Хайрнатов К.З. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика», Московский государственный горный университет.

Рецензент доктор физико-математических наук, доктор технических наук *К.В. Халкечев*, профессор кафедры «Высшая математика», Московский государственный горный университет.

Аннотация

В статье приводятся методология и алгоритмы анализа многостепенных динамических стенов полунатурного моделирования. Рассмотренные методология и алгоритмы позволяют определять частотные характеристики стенов, оптимизировать характеристики композитных материалов стенов, имеющих большое научно-техническое и прикладное значение. Для решения поставленных задач применяются: моделирование на САПР CATIA, метод конечных элементов и аналитические методы.

K.Z. Khairmassov

There are designed methodologies and algorithms analysis of dynamic modeling and testing stands. The worked out methodology and algorithms allows to define frequency characteristics of a stands; optimize characteristics of composite materials of stands, that have great technical, scientific and application importance. As a method of designing there were used: CAD CATIA modeling, finite-element methods and also analytical methods.