

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. И. РАЗЗАКОВА

Диссертационный совет Д.01.15.505

На правах рукописи

УДК 539.3, 620.10

АСКАРБЕКОВ РУСЛАН НУРКОЖОЕВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВИБРО- И
СЕЙСМОИЗОЛИРУЮЩИХ РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ЭЛЕМЕНТОВ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Бишкек - 2016

Работа выполнена в Кыргызском государственном техническом университете им. И. Раззакова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор **Дуйшеналиев Т.Б.**

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор **Сеитов Б.М.**

кандидат физико-математических
наук, доцент **Тампагаров К.Б.**

Ведущая организация: Кыргызско-Российский Славянский
Университет им. Б.Н. Ельцина

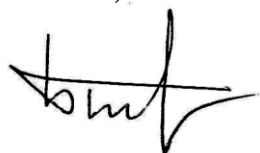
Защита состоится 3 февраля 2017 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д.01.15.505 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора (кандидата) наук при Кыргызском государственном техническом университете имени И. Раззакова и Кыргызском государственном университете строительства, транспорта и архитектуры имени Н.Исанова по адресу: 720044, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Ч.Айтматова, 66, ауд. 1/314.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Кыргызского государственного технического университета им. И.Раззакова (720044, г. Бишкек, пр. Ч.Айтматова, 66) и Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н.Исанова (720020, г. Бишкек, ул. Малдыбаева, 34б)

Автореферат разослан 31-го декабря 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.01.15.505,

к.ф.-м.н., доцент



Б.Т. Мекенбаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Только за последние 120 лет на территории Кыргызской Республики произошли три землетрясения с магнитудой $M \geq 8.0$, девять – с магнитудой $M \geq 7$. Ежегодно фиксируются около 5 тысяч землетрясений, из которых несколько десятков являются опасными.

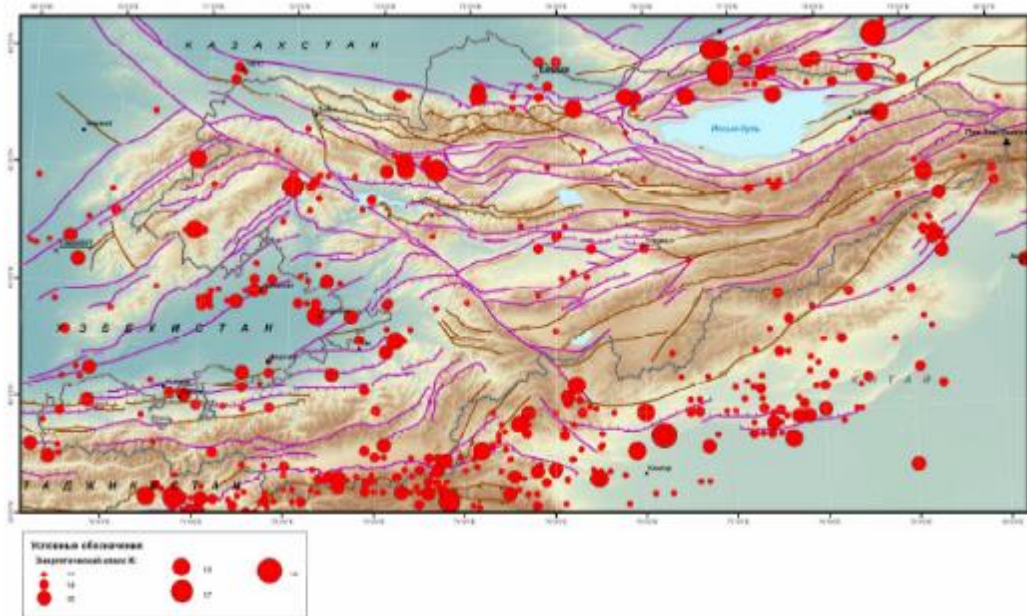


Рис 1. Карта эпицентров сильных землетрясений в Кыргызстане с $M \geq 5.0$ за 2008 г. (Атлас землетрясений Кыргызстана, ЦАИИЗ, 2009)

В таких условиях создание системы сейсмической защиты зданий и инженерных сооружений с использованием новых материалов является весьма актуальной задачей. Одной из таких систем являются резиновые и резинометаллические опоры (РМО). В случае их установки, вертикальная конструкция (над опорой) начинает колебаться относительно нижней части сооружения без разрушения и необратимых деформаций, гася энергию землетрясения, в том числе за счет упругих сил, возникающих в резиновых слоях.

Конструктивно РМО являются набором резиновых слоев, соединенных металлическими пластинами (рис. 2). Такая конструкция позволяет обеспечить необходимую жесткость на сжатие при достаточно малой сдвиговой жесткости. Поскольку для резин модуль сдвига G много меньше модуля всестороннего сжатия, приведенная конструкция РМО обеспечивает относительно малые сдвиговые деформации при больших допустимых горизонтальных смещениях.

Существуют различные методы расчета деформаций и напряжений резины на основе классических подходов: вариационный принцип Кастилиано; решенный методом Ритца вариационный принцип Лагранжа; вариационный принцип Ху-Васидзу; смешанный вариационный принцип Рейсснера и Ху-Васидзу; смешанный вариационный принцип Сливкера.

Зависимости модулей упругости от фактора формы резинового образца исследовались в работах В. Кейса, В. Рокарда, Р.Хаттори, К. Такеи,

Д.Линдли, В.Л. Бидермана, Э.Э. Лавендела, В.А. Хричиковой, С.И. Хричиковой, М.А. Лейканда, К.Ф. Черных и др. Важное место в расчете резиновых изделий занимает представление упругого потенциала резины как функции от инвариантов тензора деформаций, которые послужили основой для построения таких моделей материала, как материала Муни-Ривлина, Нео-Гуковского, материала Огдена, Дунаева.

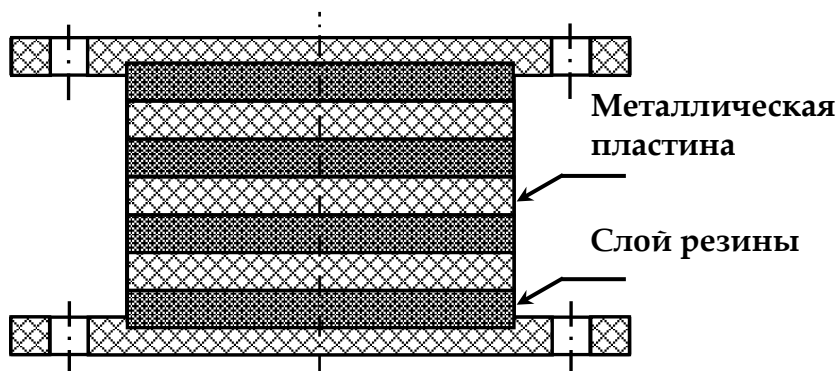


Рис. 2. Конструкция резинометаллической опоры

В разработку теоретических основ метода конечных элементов (МКЭ) и его приложений большой вклад внесли многие исследователи. Особенно большой вклад на начальном этапе развития МКЭ был внесен М.Дж. Тернером, Дж.Х. Аргиром, Р.В. Клафом, О.К. Зенкевичем, Л.А. Розиним, Дж. Оденом, В.А. Постновым, Г. Стренгом, Д. Фиксом и др. В настоящее время библиография по МКЭ включает десятки тысяч наименований.

Однако использование МКЭ в явном виде не всегда дает возможность просто и достаточно точно рассчитать сложные многоэлементные конструкции, особенно если эти конструкции содержат элементы разной мерности. Если рассматривать данный метод применительно к расчету физико-механических параметров резиновых изделий, то к недостаткам такого метода можно причислить отсутствие равноточной аппроксимации напряжений, деформаций и перемещений, развивающихся внутри резинометаллического тела.

Более современные разработки с применением вычислительных программных комплексов основаны на аналитических, вариационных, численных и численно-аналитических методах.

Несмотря на то, что компьютерные технологии и их развивающиеся возможности в виде вычислительных программных комплексов обеспечивают широкое распространение численных методов в инженерных расчетах, роль и значение аналитических методов растет. Они могут выступать в качестве эталонных решений при тестировании надежности вычислительных комплексов и пакетов прикладных программ. Их преимущество также заключается в возможности получения решения в общей форме, что позволяет определять изменение физико-механических характеристик резинового слоя в любой ее точке и в различные моменты времени.

В разработанном авторами методе используется тензор линейных деформаций Коши, условия совместности Сен-Венана, обеспечивающие существование решения формулы Коши при заданных деформациях и функции напряжений Максвелла и Моперы. По этой теме опубликованы многочисленные труды (Х.Хан, С.Truesdell, К.Marguerre, Р.О.Кузьмин, Н.L.Langhaar, М.Е.Gurtin, М.Pastori, М.Stippes, D.E.Carlson, R.Rostamian, М.Г.Слободянский, В.Д.Клюшников, Б.Е.Победря, Б.Ф.Власов, А.Н.Коновалов, Н.М.Бородачев, Д.Д.Ивлев, В.С.Калинин, Л.А.Розин, В.И.Малый, I.S.Tuba, J.Grycz и др.), в которых обсуждаются число независимых условий совместности и их модификации, общность и полнота функций напряжений (В.И.Блох, С.В.Кузнецов, А.П.Прусаков, Е.Kroner, Н.Н.Leipholz), постановки задачи теории упругости в напряжениях (Б.Ф.Власов, Б.Е.Победря, В.С.Калинин, Л.А.Розин, А.Н.Коновалов, В.В.Васильев, Н.М.Бородачев, И.В.Андрианов, Т.Б.Дуйшеналиев, R.Keinzler и др.).

Исследования закономерностей деформирования резинометаллических элементов с позиций новых результатов о возможностях тензора деформаций Коши имеют принципиальное значение как с точки зрения фундаментальных основ теории упругости, так и в плане практических приложений, связанных с деформационными расчётами, подверженных воздействию сдвиговых и сжимающих нагрузок. Эти задачи изучены ещё недостаточно полно. До сих пор аналитические решения для такого рода задач возможны только для отдельных и достаточно простых расчетных схем.

Связь темы диссертации с научными программами и проектами. Работа выполнялась в Кыргызском государственном техническом университете им. И. Раззакова в рамках проекта «Инновационные технологии решения физико-технических проблем в промышленности Кыргызской Республики» под разделом «Исследование многослойных конструкций из резинометаллических элементов для систем сейсмо- и виброизоляции», УДК 539.3, номер государственной регистрации 0006594 (грант Министерства образования и науки КР).

Цель и задачи исследований. Целью диссертационного исследования является развитие подхода Т.Б.Дуйшеналиева к решению статических краевых задач и разработка математической модели упругого деформирования резинового слоя в резинометаллической опоре.

Для достижения этой цели решались следующие **задачи**:

- разработать математическую модель конечных и больших упругих деформаций резинового слоя РМО;
- реализовать предложенную математическую модель определения конечных деформаций резины в виде расчетных алгоритмов и компьютерных программ в системе Matlab;
- провести численные эксперименты по расчету напряженно-деформированного состояния РМО при сжатии;
- провести сравнительные расчеты напряженно-деформированного состояния РМО методом конечных элементов в системе Ansys;

- провести экспериментальные исследования на определение физико-механических параметров элементов РМО при статических и динамических нагрузках;
- провести испытания макета инженерного сооружения с РМО на воздействия вибрационных нагрузок различной интенсивности.

Научная новизна полученных результатов:

- развита теория расчета конечных и больших деформаций упругих тел (предложение Т.Б.Дуйшеналиева) применительно к резине;
- создана математическая модель напряженно-деформированного состояния резинового слоя в составе однослойного и многослойного РМО при сжимающих внешних нагрузках;
- предложенная математическая модель реализована в качестве алгоритмов и компьютерных программ в системе Matlab;
- проведены обширные численные эксперименты на основе предложенной математической модели деформирования резины в РМО;
- получены экспериментальные результаты деформирования двух видов резины (СНК 3826, IB13 6190) многослойных РМО при статическом и динамическом нагружениях;
- проведены сравнительные расчеты напряженно-деформированного состояния РМО по предлагаемой математической модели и методом конечных элементов в программе Ansys.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- математическая модель упругого деформирования резинового слоя в составе однослойного и многослойного РМО при сжимающих внешних нагрузках;
- реализация предложенных моделей упругого деформирования резины в качестве алгоритмов и компьютерных программ в системе Matlab;
- результаты численных экспериментов поведения РМО под нагрузкой;
- результаты экспериментальных исследований деформирования двух видов резины (СНК 3826, IB13 6190) многослойных РМО при статическом и динамическом нагружениях;
- сравнительные расчеты напряженно-деформированного состояния РМО по предлагаемой математической модели и методом конечных элементов в программе Ansys.

Практическая значимость полученных результатов. Составленный программный код в системе вычислительного комплекса Matlab позволяет проводить расчеты с визуализацией результатов. Экспериментальные данные и полученные теоретические результаты представляют интерес при проектировании систем активной сейсмо- и вибрационной защиты инженерных сооружений.

Достоверность полученных результатов. Результаты получены на основе применения фундаментальных положений и законов механики

сплошных сред. Хорошо согласуются с результатами экспериментальных и численных исследований, в т.ч. в системе Ansys и Matlab, а также с результатами исследований других авторов.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном выполнении исследований по всем главам диссертации: вывод аналитических зависимостей деформирования однослойной РМО, построение в системе Matlab математической модели деформирования многослойной РМО, проведение многовариантных расчетов с использованием программных кодов Matlab и Ansys, изготовление опытных РМО, экспериментальные испытания РМО на вибрационные нагрузки, формулировка научных выводов, оформление диссертации.

Апробации результатов диссертации. Основные результаты по теме диссертации докладывались на научных семинарах и международных конференциях: 53-я научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов (Бишкек, 2011); Международная научная конференция «Рахматулинские чтения» (Бишкек, 2011); Международная научная конференция, посвященная 100-летию академика М.Я. Леонова (Бишкек, 2012); Международная научная конференция «Рахматулинские-Ормонбековские чтения» (Бишкек, 2013); научно-практическая конференция молодых ученых Кыргызстана «Старт в большую науку» (Бишкек, 2013); IV Международная научная конференция «Актуальные проблемы механики и машиностроения» (Казахстан, 2014); The 17-th International Conference of Young Scientists (Slovakia, 2015); 9-th European Solid Mechanics Conference ESMC 2015 (Spain, 2015); Международная конференция «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании» (Казахстан, 2015); Международная научная конференция «Актуальные проблемы развития техники и технологий», посвященная 80-летию профессора К.Джаманкулова (Бишкек, 2015); Международная научная конференция «Рахматулинские-Ормонбековские чтения», посвященная 70-летию чл.-корр. НАН КР, лауреата Госпремии КР в области науки и техники, проф. Т.О. Ормонбекова (Бишкек, 2015); The 15-th International Scientific Conference Engineering for Rural Development (Latvia, 2016); The 18-th International Conference of Young Scientists (Slovakia, 2016); International conference “BioPhys Spring 2016” (Czech Republic, 2016).

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. По теме диссертационной работы опубликовано 18 научных работ, в том числе 6 статей в научных журналах, 8 статей в сборниках, 2 патента Кыргызской Республики и 2 тезиса конференции. Количество баллов согласно требованиям ВАК КР по тематике исследований равно 261.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и 60 рисунков на 128 страницах машинописного текста. Список литературы включает 113 наименований.

Автор выражает глубокую признательность за постановку задачи и научное руководство доктору физико-математических наук, профессору Т.Б.Дуйшеналиеву.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении диссертации представлена оценка современного состояния рассматриваемой научной проблемы, обоснованы актуальность темы и выбор объекта исследования, сформулирована цель работы и поставлены задачи для её достижения, отражена научная новизна проведенных исследований, а также представлен обзор предшествующих исследований по тематике диссертации. Изучены работы С.И.Дымникова, Э.Э.Лавендел, В.Н.Потураева, Л.В. Бидермана, В.М.Малькова, Д.К.Сизова, М.Ю.Сергаевой, К.П.Мирошкина, Ле Тхи Тху Хуэн, Moaveni, Babak, Eva, Charles Almond, Т.О.Ормонбекова, У.Т.Бегалиева и др.

В первой главе рассматриваются вопросы применения резинометаллических сейсмо- и виброизоляторов в инженерных сооружениях и конструкциях. Приводится информация о поведении РМО под нагрузкой и развивающиеся в нём напряжения и деформация.

В существующих методах расчета напряженно-деформированного состояния РМО рассматривается нелинейность, которая связана с необходимостью анализа механического поведения резиновых элементов при простых нагружениях. Постановка задач нелинейной теории упругости в расчетах резиновых элементов конструкций приводит в общем случае к необходимости решения существенно нелинейных краевых задач.

В основе методов для расчёта резинометаллических виброизоляторов используются трёхмерные уравнения теории упругости, в которых используются вариационные методы, метод конечных элементов, метод конечных разностей. Существенным недостатком при применении вариационного метода в традиционной форме, является отсутствие ленточной структуры системы уравнений, достаточно плотное заполнение всех элементов матрицы системы алгебраических уравнений.

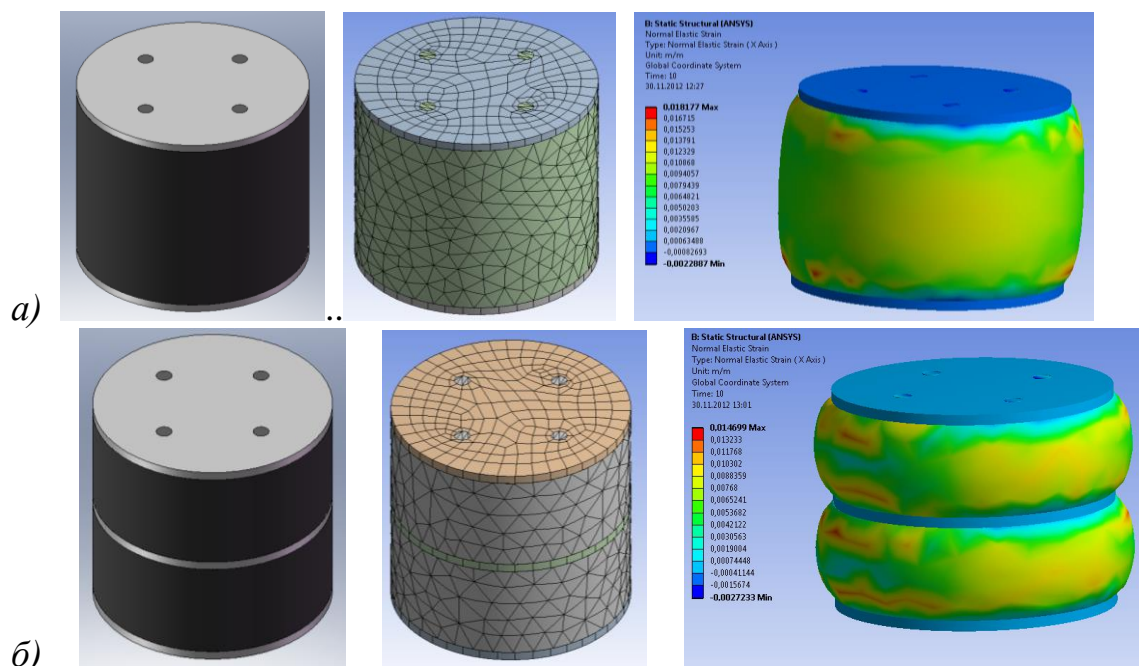
Показано, что строгих аналитических решений краевых задач для больших и конечных деформаций РМО, практически, нет. Задача создания математической модели, которая способна описывать конечные и большие деформации резиноподобных материалов, по-прежнему, сохраняет свою актуальность.

В этой главе также ставится цель и формулируются задачи диссертационного исследования.

Во второй главе рассмотрены методы расчета напряженно-деформированного состояния резинометаллических элементов. Упор сделан на метод конечных элементов (МКЭ), с реализацией модели резинометаллических опор в системе Ansys. Уделено внимание инженерному методу с учетом фактора формы, а также рассмотрены некоторые аналитические методы на основе классических подходов. Работы, посвященные описанию поведения резины с помощью аналитических зависимостей, часто используют смешанные вариационные принципы Рейсснера и Ху-Васидзу. Данные принципы являются наиболее общими, их применение позволяет избежать выбора функций, аппроксимирующих решение задачи из статически или кинемати-

чески допустимых полей. Однако, одной из наиболее важных проблем, связанных с применением этих вариационных принципов является отсутствие выпуклости функционала, то есть истинному напряженно-деформированному состоянию соответствует седловая точка, что накладывает некоторые ограничения на применяемые методы решения задач с использованием данных принципов. Использование вариационного принципа Ху-Васидзу в физически нелинейных задачах теории упругости не требует обращения уравнений состояния теории упругости, что ещё больше повышает значимость данного принципа при расчёте эластомерных конструкций, где являются тесно взаимосвязанными физическая и геометрическая нелинейность. Однако применение этого вариационного принципа совместно с вариационно-разностным методом также значительно повышает общую размерность решаемой задачи.

В этой же главе приводятся результаты моделирования сжатия однослойных и многослойных резинометаллических опор по МКЭ в системе Ansys. Сжимающие усилия распределены равномерно по всей площади верхнего торца металлической пластины в резинометаллической опоре. Скорость нагружения возрастала постепенно до 10 тонн. Геометрия данных типов опор имела следующее соотношение: диаметр - 0,1 м, высота образцов - 0,1 м. Коэффициент Пуассона для амортизационных резин равен 0,4995, а модуль упругости 12 МПа, плотность резины – 1350 кг/м³. Данные опоры изготовлены в четырех видах: РМО №2 – один слой резины и 2 металлические пластины с двух торцов; РМО №3 – 2 слоя резины и 3 металлических пластин; РМО №4 – 3 слоя резины и 4 металлические пластины; РМО №5 – 4 слоя резины и 5 металлических пластин. Металлические пластины расположены таким образом, что высота резиновых слоев в многослойных опорах имеют равные значения. Так как данный вычислительный программный комплекс обладает довольно информативной графической возможностью, в главе 2 приводятся сразу по несколько рисунков для каждого типа опор.



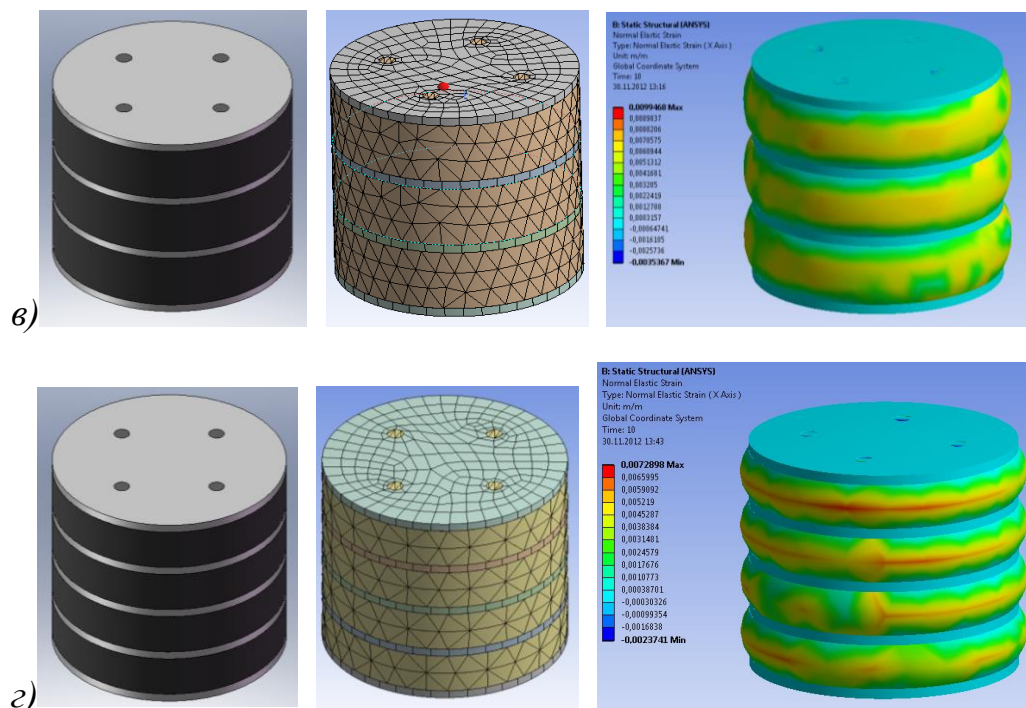


Рис. 3. Общий вид резинометаллических опор и их конечно-элементные сетки. Напряжения и деформации резиновых слоев в образцах при сжатии.

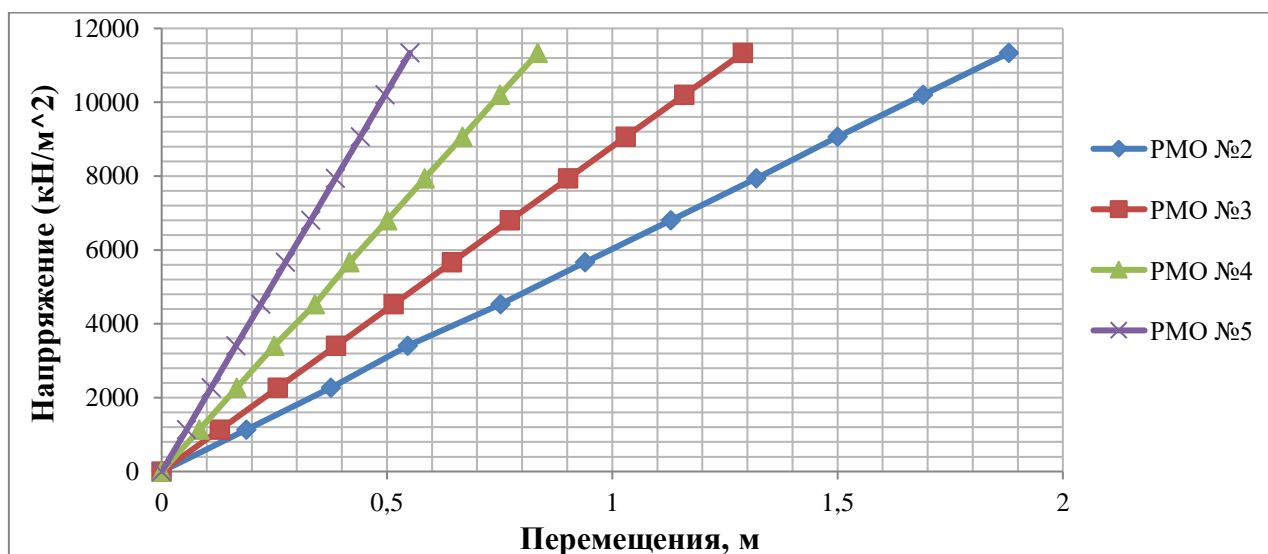


Рис. 4. Зависимость перемещения от напряжений (график получен с помощью Ansys).

В третьей главе диссертации предлагается разработанная автором математическая модель, которая позволяет описывать конечные и большие деформации резинового слоя РМО. Модель создана на основе нетрадиционного подхода к постановке и решению статической краевой задачи теории упругости (решение Т.Б. Дуйшеналиева). Суть этого подхода приводится ниже. Обратимся к следующей статической краевой задаче

$$\sigma_{ji,j} + f_i = 0, \quad \sigma_{ij} = \sigma_{ji}, \quad x_i \in V \quad (1)$$

$$\sigma_{ij,kk} + \frac{1}{1+v} \sigma_{kk,ij} + \frac{v}{1-v} \delta_{ij} f_{k,k} + f_{i,j} + f_{j,i} = 0, \quad x_i \in V \quad (2)$$

$$\sigma_{ji} n_j = P_i, \quad x_i \in S \quad (3)$$

Решением этой краевой задачи являются функции $\sigma_{ij}(x)$, удовлетворяющие уравнениям (1) - (3). В этом случае, компоненты линейного тензора деформаций находятся легко

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} (-v \cdot \delta_{ij} \cdot \sigma_{kk} + (1+v) \sigma_{ij}) \quad (4)$$

Установленное таким образом поле тензора Коши определяет далее перемещения в любой точке. Это непосредственно следует из формулы Чезаро:

$$u_i(x) = u_i(x^0) + \omega_{ij}(x^0)(x_j - x_j^0) + \int_l (\varepsilon_{ik}(y) + (x_j - y_j)(\varepsilon_{k,ij}(y) - \varepsilon_{k,ji}(y))) dy_k, \quad (5)$$

где $u_i(x^0)$, $\omega_{ij}(x^0)$ - постоянные интегрирования. Им можно придать произвольные, в том числе и равные нулю, значения.

Важно не упускать из виду то, что из области определения статических краевых задач никакие перемещения уже не произойдут. Решением (5) определяются перемещения, которые произошли до того, как установилось равновесие. Этими перемещениями создано то напряженное состояние $\sigma_{ij}(x)$, которое находится в равновесии с массовыми силами в объеме V и внешними усилиями на поверхности S .

Моделирование деформирования однослойной РМО. Зададимся областью определения уравнений статической краевой задачи в виде указанной на рис. 5 резинометаллического элемента с одним резиновым слоем. Начало прямоугольной декартовой системы координат поместим в центре РМО, что соответствует положению $(X,Y,Z)=(0,0,0)$.

Под обозначением V будем подразумевать следующую область в метрах:

$$-0,05 \leq x_1 \leq 0,05, \quad -0,05 \leq x_2 \leq 0,05, \quad 0 \leq x_3 \leq 0,1 \quad (6)$$

Рассмотрим вторую краевую задачу без массовых сил

$$\sigma_{ji,j} = 0, \quad \sigma_{ij} = \sigma_{ji}, \quad x_i \in V, \quad (7)$$

$$\sigma_{ij,kk} + \frac{1}{1+v} \sigma_{kk,ij} = 0, \quad x_i \in V, \quad (8)$$

$$\sigma_{ji} n_j = \delta_{i2} c x_3, \quad x_i \in S, \quad (9)$$

$$u_i(x) = \frac{1}{E} \int_l \left(-v \delta_{ik} \sigma_{tt} + (1+v) \left(\sigma_{ik} + (x_j - y_j) \left(-v (\delta_{ki} \sigma_{tt,j} - \delta_{kj} \sigma_{tt,i}) + (1+v) (\sigma_{ki,j} - \sigma_{kj,i}) \right) \right) \right) dy_k \quad (*)$$

где V определяется выражениями (6).

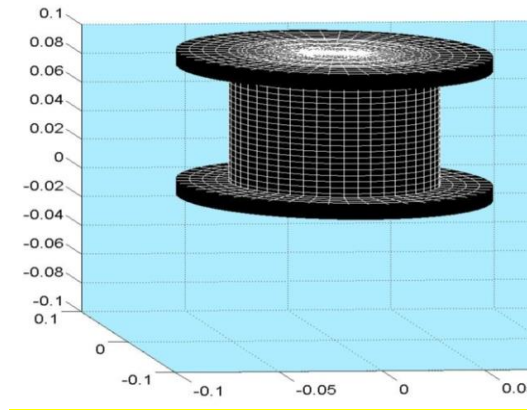


Рис. 5. Резинометаллическая опора в состоянии равновесия

Резинометаллическая опора с усилиями (9) на своей поверхности находится в равновесии. Из (9) следует, что равномерно распределенная нагрузка приложена на верхнюю металлическую пластину. Нижняя опора – неподвижна.

Задача (7) - (9) математически полностью определена. Она имеет простой механический смысл - резинометаллическая опора с усилиями (9) на верхней и нижней поверхности находится в равновесии. Требуется найти во внутренних точках резинового слоя этой опоры напряжения, деформации и происходящие перемещения.

Нетрадиционное решение задачи

$$\sigma_{ij} = \delta_{i2}\delta_{j2} c x_3 \quad x_i \in V \quad (10)$$

Функции перемещений определим из следующего уравнения

$$u_i = \frac{1}{E} \int_l c \left(-v\delta_{ik} x_3 + (1+v)\delta_{i2}\delta_{k2}x_3 + (x_j - y_j) \left(-v(\delta_{ki}\delta_{3j} - \delta_{kj}\delta_{3i}) + (1+v)\delta_{k2}(\delta_{i2}\delta_{3j} - \delta_{j2}\delta_{3i}) \right) \right) dy_k, \quad x_i \in V$$

Интегрируя это выражение, находим

$$u_i(x) = -c \left(\delta_{i1}v x_3(x_1 - x_1^0) - \delta_{i2}x_3(x_2 - x_2^0) + \delta_{i3} \left(x_2^2 + v(x_3^2 - x_1^2) - x_2^0(2x_2 - x_2^0) - v((x_3^0)^2 - x_1^0(2x_1 - x_1^0)) \right) / 2 \right) / E, \quad x_i \in V, \quad (11)$$

где x_i^0 - любая фиксированная точка области V .

Приведем развернутый вид функций (11):

$$u_1(x) = -\frac{c v x_3(x_1 - x_1^0)}{E}, \quad x_i \in V$$

$$u_2(x) = \frac{c x_3(x_2 - x_2^0)}{E}, \quad x_i \in V$$

$$u_3(x) = -c \left(\left(x_2^2 + v(x_3^2 - x_1^2) - x_2^0(2x_2 - x_2^0) - v((x_3^0)^2 - x_1^0(2x_1 - x_1^0)) \right) / 2E \right), x_i \in V$$

Функции (11) удовлетворяют уравнениям равновесия в форме Навье. Из поля перемещений (11) определим компоненты деформации и вращения

$$\varepsilon_{ij} = c x_3 \left(-v(\delta_{i1}\delta_{j1} + \delta_{i3}\delta_{j3}) + \delta_{i2}\delta_{j2} \right) / E. \quad x_i \in V \quad (12)$$

$$\omega_{ij} = -c \left(v(x_1 - x_1^0)(\delta_{1i}\delta_{3j} - \delta_{3i}\delta_{1j}) - (x_2 - x_2^0)(\delta_{2i}\delta_{3j} - \delta_{3i}\delta_{2j}) \right) / E. \quad x_i \in V \quad (13)$$

По полученным здесь выражениям в любой точке находящегося в равновесии в области V тела можно определить компоненты напряжения, деформации и вращения. Особо отметим то, что во всех выражениях (10) – (13) координаты только области V (6). Здесь нет координатного различия. В $u_i(x), \sigma_{ij}(x)$ одни и те же координаты.

Сравниваемое состояние резинометаллической опоры

Координаты сравниваемого состояния z_i связаны с координатами рассматриваемого состояния равновесия выражениями

$$z_i = x_i - c \left(\delta_{i1} v x_3 (x_1 - x_1^0) - \delta_{i2} x_3 (x_2 - x_2^0) + \delta_{i3} \left(x_2^2 + v(x_3^2 - x_1^2) - x_2^0(2x_2 - x_2^0) - v((x_3^0)^2 - x_1^0(2x_1 - x_1^0)) \right) / 2 \right) / E \quad x_i \in V \quad (14)$$

В качестве x^0 можно брать координаты любой точки области (6). В дальнейшем положим $x_1^0 = 0,05$, $x_2^0 = 0,05$, $x_3^0 = 0$.

Рассмотрены три этапа нагружения резинометаллической опоры: при $c = 0$, $c = 0.3$, $c = 0.6$.

1. Рассмотрим случай, когда $c = 0$. На рассматриваемое тело не действуют никакие силы, т.е. тело находится в равновесии и между частицами тела нет никаких перемещений. Выражения (14) принимают вид.

$$\begin{aligned} x_i - z_i &= 0, & \varepsilon_{ij}(x) - \varepsilon_{ij}(z) &= 0, \\ \omega_{ij}(x) - \omega_{ij}(z) &= 0, & \sigma_{ij}(x) &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Сравниваемое состояние совпадает с заданным. Заданное состояние может, иметь любые остаточные деформации или не иметь их. Подставляя первое из уравнений (15) в остальные, приходим к неопределенности

$$\varepsilon_{ij}(x) - \varepsilon_{ij}(x) = 0, \quad \omega_{ij}(x) - \omega_{ij}(x) = 0, \quad \sigma_{ij}(x) = 0.$$

Здесь $\varepsilon_{ij}(x)$, $\omega_{ij}(x)$ остаются неопределенными. Такая неопределенность не противоречит сути краевой задачи, а наоборот, более полно отражает то, что может быть в действительности.

2. Рассмотрим случай, когда $c = 0.3$. Резинометаллическая опора имеет тот же объем V и поверхность S . Подставим это значение c в (15) и определим сравниваемое состояние (рис. 6).

Рассмотрим перемещение точки M (внутри резинового слоя РМО) при сжатии резинометаллической опоры при $c=0.3$ (3.82 МПа). Модуль упругости для резины марки СНК 3826 $E=12$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu=4.995$, модуль сдвига $G=4$. Приведем также значения деформаций, напряжений и перемещений.

Для разработанной математической модели в программном комплексе Matlab был написан специальный программный код, где изложенные выше зависимости реализованы через язык программирования Matlab. В данной системе был произведен расчет поля перемещений.

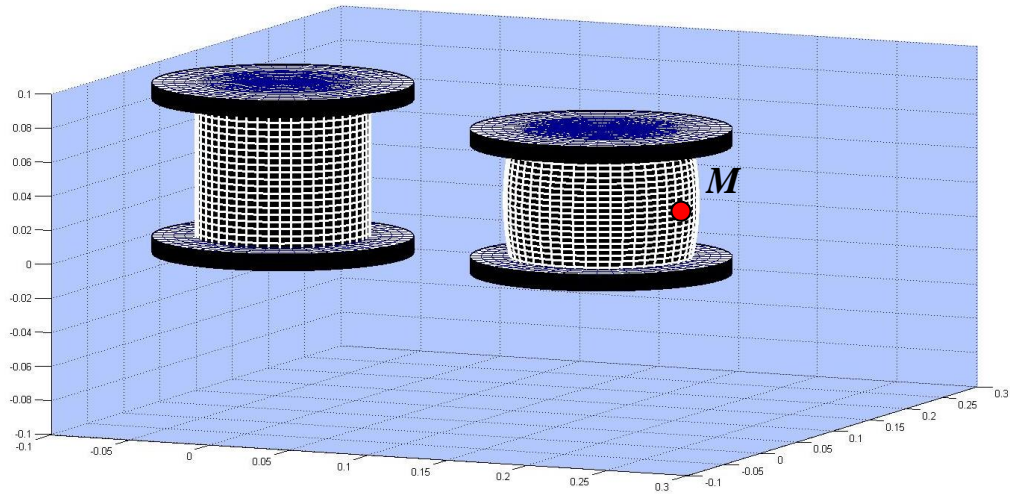


Рис. 6. Сравнимое состояние РМО при $c=0.3$.

Приведем значения тензора перемещений для точки M в метрах, полученные в ходе решения

$$u_{ij} = \begin{pmatrix} 10.575 & 0 & 0 \\ 0 & 10.575 & 0 \\ 0 & 0 & 8.4 \end{pmatrix}$$

Деформации рассчитываются по перемещениям, вычисленным в Matlab. По известной формуле $\varepsilon_{ij} = 0.5(\partial u_{i,j} + \partial u_{j,i})$ рассчитывается тензор деформации.

$$\varepsilon_{ij} := c \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} u_1(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_1} u_1(x_1, x_2, x_3) \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_2} u_1(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_1} u_2(x_1, x_2, x_3) \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_3} u_1(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_1} u_3(x_1, x_2, x_3) \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} u_2(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_2} u_1(x_1, x_2, x_3) \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} u_2(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_1} u_2(x_1, x_2, x_3) \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_3} u_2(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_2} u_3(x_1, x_2, x_3) \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} u_3(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_3} u_1(x_1, x_2, x_3) \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_2} u_3(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_3} u_2(x_1, x_2, x_3) \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_3} u_3(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_3} u_3(x_1, x_2, x_3) \right) \end{bmatrix}$$

В частности, определен тензор деформаций для точки M в метрах

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} 0.064 & 0 & 0 \\ 0 & 0.064 & 0 \\ 0 & 0 & 0.09 \end{pmatrix}$$

Тензор напряжений определяется по обобщенному закону Гука. Для резинометаллического цилиндра принимаем, $\varepsilon_x = \varepsilon_y$, $\sigma_x = \sigma_y$, $\nu = 0.4995$. В итоге получим тензор напряжений:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \frac{-\varepsilon_{xx}E + v\varepsilon_{zz}E}{1 - v - 2v^2} & G\varepsilon_{xy} & G\varepsilon_{xz} \\ G\varepsilon_{yx} & \frac{-\varepsilon_{xx}E + v\varepsilon_{zz}E}{1 - v - 2v^2} & G\varepsilon_{yz} \\ G\varepsilon_{zx} & G\varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz}E - 2v\sigma_{xx} \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 1.495 & 0 & 0 \\ 0 & 1.495 & 0 \\ 0 & 0 & 1.504 \end{pmatrix}$$

3. Рассмотрим случай, когда $c = 0.6$. В этом состоянии равновесия тело занимает то же положение, что и раньше. Подставим это значение c в (15) и определим сравниваемое состояние (рис. 7).

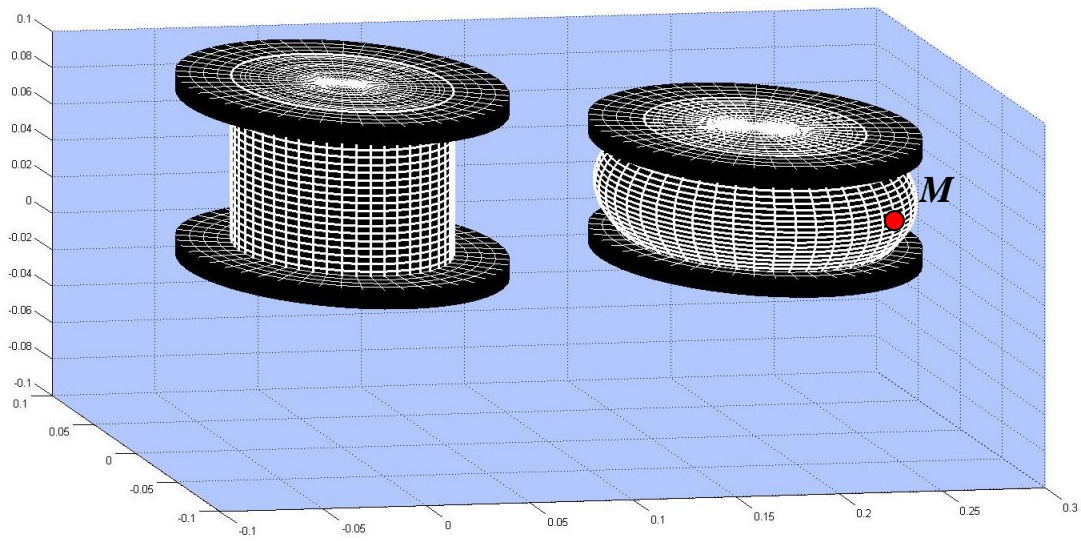


Рис. 7. Сравниваемое состояние РМО при $c=0.6$.

Во всех трех случаях тело имеет одну и ту же конфигурацию и занимает одно и то же положение в пространстве. Это положение тела недвижимо и геометрически неизменяемо при любых величинах внешней нагрузки.

Поле перемещений для точки M в метрах

$$u = \begin{pmatrix} 21.15 & 0 & 0 \\ 0 & 21.15 & 0 \\ 0 & 0 & 16.8 \end{pmatrix}$$

Деформации рассчитываются по перемещениям, вычисленным в Matlab. По известной всем нам формуле $\varepsilon_{ij} = 0.5(\partial u_{i,j} + \partial u_{j,i})$ рассчитывается тензор деформации.

Деформации в точке M в метрах

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} 0.255 & 0 & 0 \\ 0 & 0.255 & 0 \\ 0 & 0 & 0.36 \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_{ij} := c \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} u_1(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_1} u_1(x_1, x_2, x_3) \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_2} u_1(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_1} u_2(x_1, x_2, x_3) \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_3} u_1(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_1} u_3(x_1, x_2, x_3) \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} u_2(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_2} u_1(x_1, x_2, x_3) \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} u_2(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_1} u_2(x_1, x_2, x_3) \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_3} u_2(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_2} u_3(x_1, x_2, x_3) \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} u_3(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_3} u_1(x_1, x_2, x_3) \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_2} u_3(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_3} u_2(x_1, x_2, x_3) \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_3} u_3(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_3} u_3(x_1, x_2, x_3) \right) \end{bmatrix}$$

Для расчета тензора напряжений в точке \mathbf{M} воспользуемся обобщенным законом Гука. В цилиндрической системе координат принимаем, $\varepsilon_x = \varepsilon_y$, $\sigma_x = \sigma_y$, $\nu = 0.4995$. В итоге получим:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \frac{-\varepsilon_{xx}E + \nu\varepsilon_{zz}E}{1 - \nu - 2\nu^2} & G\varepsilon_{xy} & G\varepsilon_{xz} \\ G\varepsilon_{yx} & \frac{-\varepsilon_{xx}E + \nu\varepsilon_{zz}E}{1 - \nu - 2\nu^2} & G\varepsilon_{yz} \\ G\varepsilon_{zx} & G\varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz}E - 2\nu\sigma_{xx} \end{pmatrix}$$

Тензор напряжений для точки \mathbf{M} в МПа

$$\sigma = \begin{pmatrix} 5.981 & 0 & 0 \\ 0 & 5.981 & 0 \\ 0 & 0 & 6.018 \end{pmatrix}$$

Решения

$$\sigma_{ij}(x) = 0, \quad \sigma_{ij}(x) = \delta_{i2}\delta_{j2}0.3x_3, \quad \sigma_{ij}(x) = \delta_{i2}\delta_{j2}0.6x_3, \quad x_i \in V$$

соответствующие трем рассмотренным случаям, удовлетворяют уравнениям задачи (7)-(9) в одном и том же положении тела. Граничное условие (9) удовлетворяется на поверхности соответствующих этим решениям сравниваемых состояний (рис. 6 и 7).

Внешние силы являются атрибутами декларируемого уравнениями (7)–(9) равновесия и, в связи с этим, они уже никак не могут рассматриваться в роли нарушителей этого равновесия. Условие (9) не что иное, как условие равновесия точек поверхности тела. Усилия, действующие снаружи поверхности равны усилиям $\sigma_{ji}n_j$, действующим изнутри.

Данную задачу представим уравнениями Навье

$$\mu u_{i,jj} + (\lambda + \mu)u_{j,ji} = 0, \quad x_i \in V \quad (16)$$

Граничные условия для этих уравнений напомним в трех видах:

1. Заданы перемещения на поверхности S , которые определяются функцией

$$u_i(x) = -c \left(\delta_{i1}\nu x_3(x_1 - x_1^0) - \delta_{i2}x_3(x_2 - x_2^0) + \delta_{i3} \left(x_2^2 + \nu(x_3^2 - x_1^2) - x_2^0(2x_2 - x_2^0) - \nu((x_3^0)^2 - x_1^0(2x_1 - x_1^0)) \right) / 2 \right) / E, \quad x_i \in V$$

при поочередной подстановке в нее значений координат

$$x_1 = -0.05, x_1 = 0.05, x_2 = -0.05, x_2 = 0.05, x_3 = 0, x_3 = 0.1 \quad (17)$$

2. Заданы внешние силы на поверхности S

$$\sigma_{ji} n_j = \delta_{i2} c x_3, \quad x_i \in S \quad (18)$$

3. Перемещения определяются функцией

$$u_i(x) = -c \left(\delta_{i1} v x_3 (x_1 - x_1^0) - \delta_{i2} x_3 (x_2 - x_2^0) + \delta_{i3} \left(x_2^2 + v(x_3^2 - x_1^2) - x_2^0 (2x_2 - x_2^0) - v((x_3^0)^2 - x_1^0 (2x_1 - x_1^0)) \right) / 2 \right) / E,$$

в которую поочередно надо подставить следующие значения координат $x_1 = -0,05$, $x_1 = 0,05$, $x_2 = -0,05$, $x_2 = 0,05$

Статическая краевая задача имеет единственное решение. Решение задач (16), (17); (16), (18):

$$u_i(x) = -c \left(\delta_{i1} v x_3 (x_1 - x_1^0) - \delta_{i2} x_3 (x_2 - x_2^0) + \delta_{i3} \left(x_2^2 + v(x_3^2 - x_1^2) - x_2^0 (2x_2 - x_2^0) - v((x_3^0)^2 - x_1^0 (2x_1 - x_1^0)) \right) / 2 \right) / E, \quad x_i \in V \quad (19)$$

то же самое, что и задачи (7)-(9). Это легко показать. Из (19) находим

$$u_{k,k} = c(1 - 2v)x_3/E; \quad u_{i,j} + u_{j,i} = 2cx_3 \left(\delta_{i2}\delta_{j2} - v(\delta_{i1}\delta_{j1} + \delta_{i3}\delta_{j3}) \right) / E.$$

Подставим эти величины в выражение для $\sigma_{ij}(x)$

$$\sigma_{ij}(x) = \lambda \delta_{ij} u_{k,k} + \mu (u_{i,j} + u_{j,i}) = cx_3 \left(\delta_{i2}\delta_{j2} + v(\delta_{ij} - \delta_{i1}\delta_{j1} - \delta_{i3}\delta_{j3}) \right) / (1 + v).$$

Далее, учитывая равенство $\delta_{i2}\delta_{j2} = \delta_{ij} - \delta_{i1}\delta_{j1} - \delta_{i3}\delta_{j3}$, находим $\sigma_{ij}(x) = \delta_{i2}\delta_{j2}cx_3$.

Сжатие многослойных резинометаллических опор. Для расчета перемещений, деформации и напряжений в резиновых слоях уже в многослойных опорах воспользуемся практически теми же условиями. Тело имеет ту же геометрию, т.е. объем опоры V и поверхность S такая же, как и для однослойной опоры. По приведенным выше соотношениям построены в системе Matlab первоначальное состояние опоры без приложенных сверху сжимающих усилий и с приложением постепенно нарастающей нагрузки.

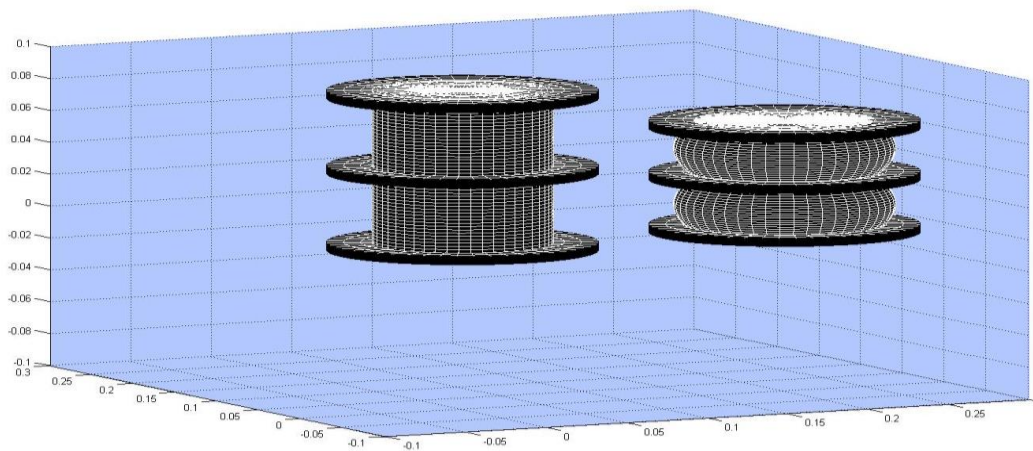


Рис. 8. Перемещение точек в резиновом слое РМО №3 при сжатии, $c=0.6$

Между собой эти резинометаллические опоры отличаются количеством металлических пластин, толщина, которой равна 4 мм. Наличие металличе-

ской пластины придает опоре большую жесткость, а значит большую устойчивость при статической нагрузке (от веса здания и т.п.). Стоит отметить, что такие же типы опоры были созданы в системе Ansys, которые приведены в главе 2.

На рисунке показаны два состояния. Левое - без приложения нагрузки в состоянии равновесия, правое – после приложения равномерно распределенной нагрузки. При действии нагрузки резиновые слои, как правило, выпучиваются, и происходит ее осадка (деформация). Так как высота резинового слоя для РМО №3 равна 44 мм и она в 11 раз выше высоты металлической пластины, то резина претерпевает из-за своей особенности молекулярного строения большие деформации и изменяет свою форму. В резиновом теле происходят большие смещения между частицами тела, такую деформацию одноосной назвать никак нельзя. Предложенная математическая модель позволяет вычислять перемещения между частицами резинового тела. Металлическая пластина лишь распределяет нагрузку равномерно по всей торцевой площади.

Рассмотрим деформацию РМО №4 при действии сжимающей нагрузки.

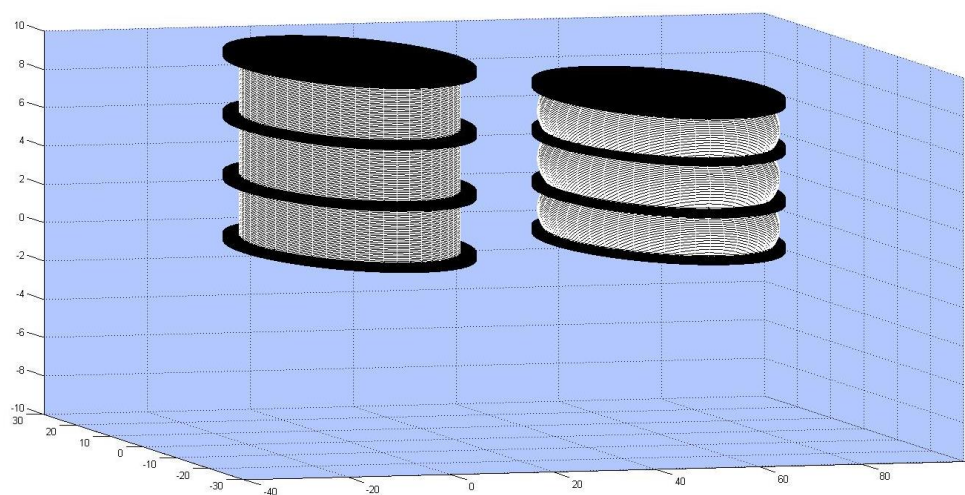


Рис. 9. Перемещение точек в резиновом слое при сжатии РМО №4

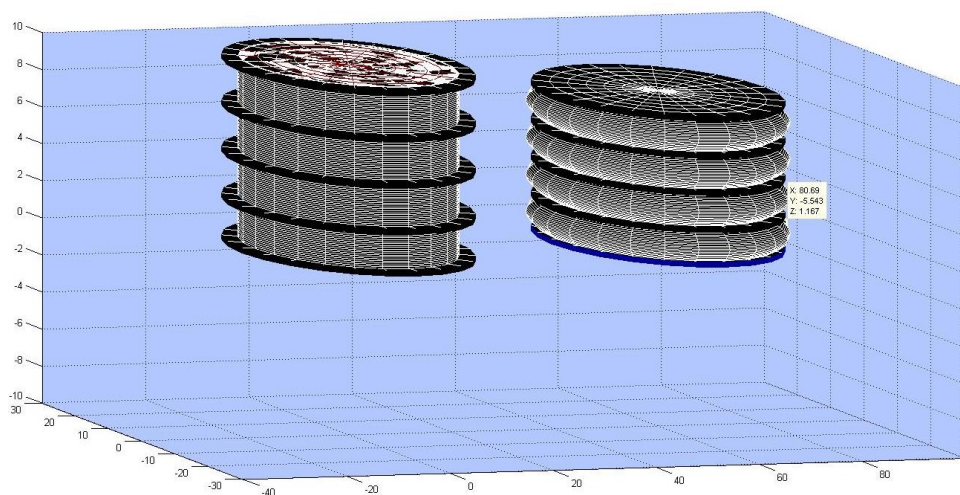


Рис. 10. Перемещение точек в резиновом слое при сжатии РМО №5

На рисунках 5-10 видим, что полученная в работе модель описывает процесс деформирования резинометаллических опор на всех стадиях его нагружения.

В четвертой главе приводятся данные экспериментальных исследований. Эксперименты проводились на сжатие, кручение и при воздействии вибрационной нагрузки в лабораториях кафедры «Механика и промышленная инженерия» КГТУ. Резинометаллические опоры высотой 0,1 м и диаметром 0,1 м из амортизационной резины марки СНК МБС – 3826 изготовлены по ТУ 38.105.1082-86 в Бишкекском авторемонтном заводе. Металлические пластины изготовлены из стали 45. Полученная резинометаллическая опора имеет твердость резинового тела, равную 75 ед. по Шору, коэффициент Пуассона 0,4995, а модуль упругости $E=12$ МПа. Плотность резины – 1350 кг/м^3 .

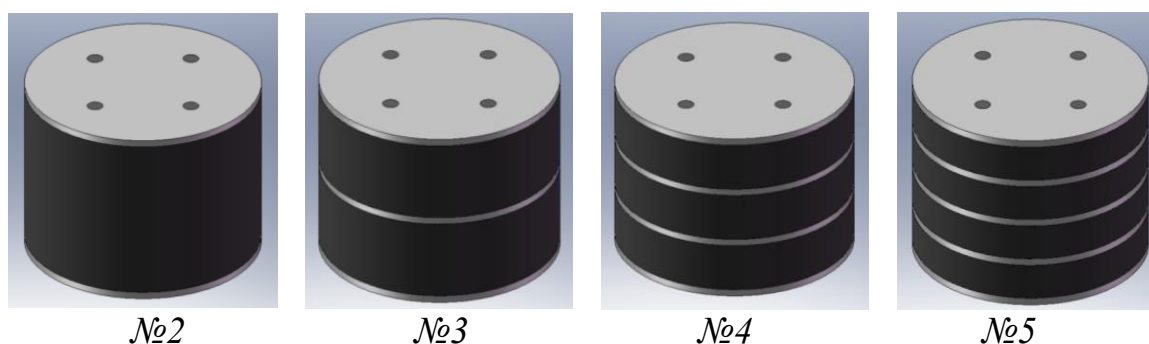
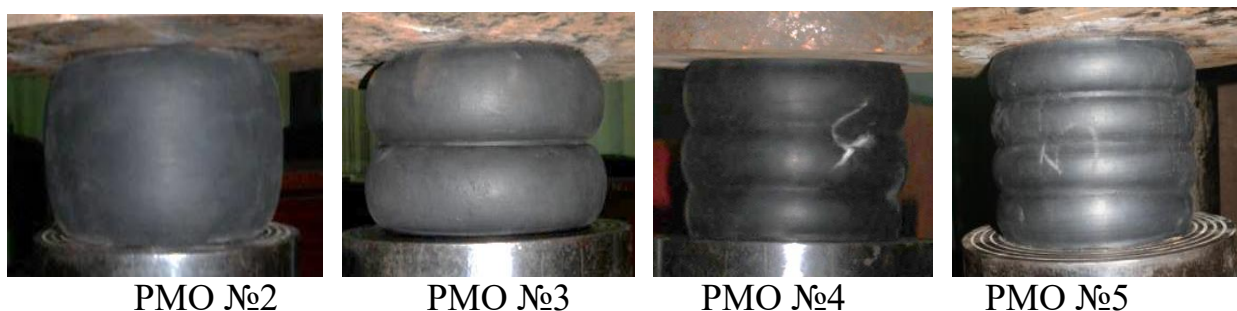


Рис. 11. Изготовленные резинометаллические опоры и их конструктивные особенности.

Испытания на сжатие до нагрузки, равной 6 тоннам, осуществлялось со скоростью 1 тонна/мин.

Металлические пластины практически не деформируются и выполняют функцию равномерного распределения нагрузки на резиновый слой. В процессе сжатия наблюдалось выпучивание резинового слоя. Перемещения по высоте были значительными. Далее, деформации по оси z замедляются, резиновое тело начинает накапливать упругую энергию. При разгрузке РМО резиновый слой полностью восстанавливается и приобретает свою первоначальную форму.



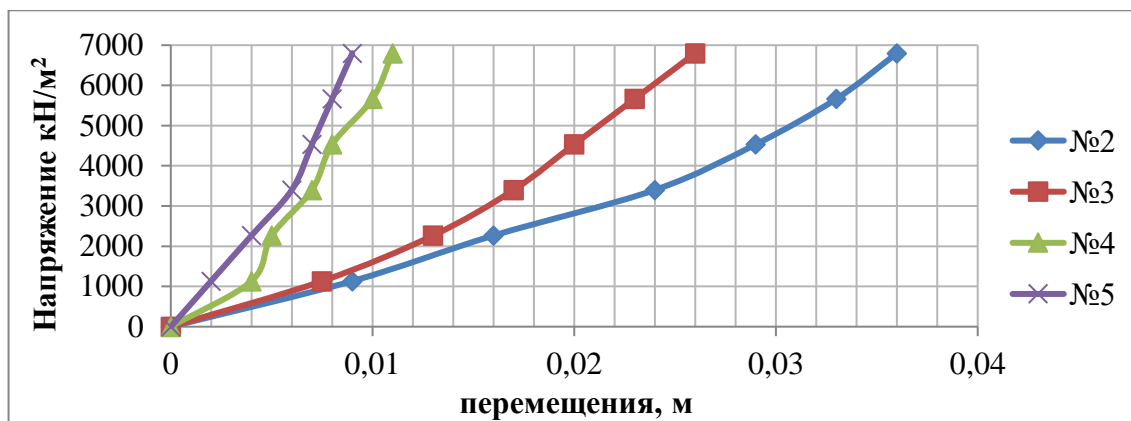


Рис. 12. График зависимостей РМО.

На рис. 12 видно, что жесткость РМО повышается с ростом количества слоев резины.

ВЫВОДЫ

- Разработана математическая модель работы резинового слоя, позволяющая описать процесс деформирования однослойных и многослойных РМО. Она определяет напряженное состояние РМО и может успешно применяться при расчете малых, конечных и больших деформаций резинометаллических опор.
- Разработан алгоритм вычислений конечных деформаций, перемещений и напряжений однослойных и многослойных резинометаллических опор в системе Matlab при воздействии сжимающих и сдвиговых усилий.
- Проведены эксперименты двух видов резины (СНК 3826 и IB13 6190) при сжатии и вибрационных нагрузках. Определено влияние количества металлических пластин в опоре на ее прочностные и деформационные характеристики.
- На основе испытаний макета каркасного здания получены частотные графики и оценено влияние РМО на сопротивляемость инженерных сооружений колебательным процессам разных уровней.
- Проведены расчеты напряженно-деформированного состояния резинометаллических опор численным методом (МКЭ) в программе Ansys. НДС РМО по МКЭ сопоставлялось с результатами предлагаемого метода, реализованного в программном коде системы Matlab, а также с экспериментальными данными автора.
- Предлагаемая математическая модель развивает, применительно к резиноподобным материалам, аналитический метод решения статических краевых задач, предложенный Т.Б.Дуйшеналиевым, и удобна для использования современных компьютерных программ.
- Результаты диссертационной работы и разработанная математическая модель, реализованная в системе Matlab, может найти применение при решении и других задач механики деформируемого твердого тела, механики горных пород, механики композиционных материалов, а также в инженерной практике.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. **Аскарбеков, Р.Н.** Приближенное исследование колебаний при импульсном воздействии [Текст] / Р.Х. Рафиков, Р.Н. Аскарбеков // Материалы 51-й научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. - Бишкек, 2009. – С.12-14
2. **Аскарбеков, Р.Н.** Сдвиговая жесткость сжатого резинового элемента длинного призматического резинометаллического амортизатора [Текст] / Т.О. Ормонбеков, Р.Н. Аскарбеков // Материалы 53-й научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – Бишкек, 2011. – С.268-270
3. **Аскарбеков, Р.Н.** Современные виброизоляторы [Текст] / Р.Н. Аскарбеков // Труды международной научной конференции «Рахматулинские чтения». – Бишкек, 2011. – С.200-205
4. **Аскарбеков, Р.Н.** Определение модуля упругости плоского цилиндрического ТРМЭ [Текст] / Р.Н. Аскарбеков // Труды международной научной конференции, посв. памяти академика М.Я. Леонова «Современные проблемы механики сплошной среды». – Бишкек, 2012. – С.101-104
5. **Аскарбеков, Р.Н.** Математическое описание конфигурации упругой пластины при изменении ее напряженно-деформированного состояния [Текст] / Т.Б. Дуйшеналиев, Р.Н. Аскарбеков, А.А. Орозбаев // Труды международной научной конференции, посв. памяти академика М.Я.Леонова «Современные проблемы механики сплошной среды». – Бишкек, 2012. – С.120-124
6. **Аскарбеков, Р.Н.** Деформирование резинометаллической опоры при сжатии [Текст] / Р.Н. Аскарбеков, Ж.Д. Рабидинова // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек, 2013. - №29 – С.143-147
7. **Askarbekov, R.N.** Deformations and stresses of the displacement field, which is defined by the antisymmetric tensor [Текст] / Т.В. Duishenaliev, R.N. Askarbekov // Books of Abstracts of 9th European Solid Mechanics Conference (ESMC 2015) – Leganés-Madrid, Spain, 2015
http://www.esmc2015.org/_contxt/programme/default_session.asp?node=&day=wednesday&sessionID=110
8. **Патент Кыргызской Республики МПК E04B 1/36, F16F 15/04.** Резино-металлическая опора [Текст] / Бегалиев У.Т., Аскарбеков Р.Н., Барпиев Б.Б., Токомбаев С.А.; заявитель и патентообладатель Международный университет инновационных технологий - №1718; заявл. 03.07.2014; опубл. 31.03.2015, Бюл. №3 – 4 с.: ил.
9. **Патент Кыргызской Республики МПК E04B 1/36, F16F 15/04.** Резино-металлическая опора с сердечником [Текст] / Бегалиев У.Т., Аскарбеков Р.Н., Барпиев Б.Б., Токомбаев С.А.; заявитель и патентообладатель Международный университет инновационных технологий - №1717; заявл. 03.07.2014; опубл. 31.03.2015, Бюл. №3 – 4 с.: ил.

10. **Аскарбеков, Р.Н.** Использование резинометаллических опор для защиты от вредного воздействия колебаний [Текст] / Р.Н. Аскарбеков // Известия КГТУ им. И.Раззакова. Бишкек, 2015. - №1 (34) – С.106-116
11. **Askarbekov, R.N.** Construction of mathematical model, compression of rubber-metal supports and behavior of rubber layer [Текст] / R.N. Askarbekov // Вычислительные технологии. Новосибирск-Алматы, 2015. - №3 (86) - Т.20– С.40-46
12. **Аскарбеков, Р.Н.** Моделирование сжатия резинометаллического амортизатора в ANSYS [Текст] / Р.Н. Аскарбеков // Научно-техн. журнал «Техника машиностроения». Москва, 2015. – Вып. 4 (96) – Т. 22 – С.40-42
13. **Аскарбеков, Р.Н.** Расчет резинометаллических опор в среде ANSYS [Текст] / Р.Н. Аскарбеков // Научно-техн. журнал «Техника машиностроения». Москва, 2015. – Вып. 4 (96) – Т. 22 – С.43-47
14. **Аскарбеков, Р.Н.** Нетрадиционный метод расчета напряженно-деформированного состояния резинометаллических опор [Текст] / Р.Н. Аскарбеков, Т.Б. Дуйшеналиев // Труды университета. Караганда, 2016. - Вып. 1 (62) - С.96-100
15. **Askarbekov, R.N.** The compression of rubber-metal supports by using Cauchy tensor [Текст] / R.N. Askarbekov, T.B. Duishenaliev // Books of Abstracts of International conference “BioPhys Spring 2016”. Prague, 2016. – P. 5-6
16. **Askarbekov, R.N.** Mechanical behavior of rubber samples under relaxation [Текст] / Ruslan Askarbekov, David Herak, Cestmir Mizera // Proceedings of 15th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. Jelgava, 2016. - P. 745-749
17. **Askarbekov, R.N.** Calculation of deformation of rubber layer in rubber metal elements [Текст] / R.N. Askarbekov, T.B. Duishenaliev // Proceedings of 15th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. Jelgava. - 2016. - P. 1402-1410
18. **Askarbekov, R.N.** Effect of rubber metal supports vibrations in buildings [Текст] / R.N. Askarbekov, Abraham Kabutey // Proceedings of 18th International conference of young scientists. Nitra, 2016. – P. 10-16

Аскарбеков Руслан Нуркожоевич

01.02.04 – Катуу заттардын майышуу механикасы адистиги боюнча физика-математика илимдеринин кандидаты илимий даражасын алуу үчүн

“Вибрация жана сейсмикалык күчтөрдүн таасиринен коргоо үчүн колдонулган резина жана металл элементтердин чыңалуу-майышуусун моделдөөсү” аттуу темадагы диссертациялык ишинин

РЕЗЮМЕСИ

Негизги сөздөр: резина жана металл элементери, активдүү сейсмо коргоо системасы, эксперименталдык эсептөөлөр, статикалык чектик маселелер.

Изилдөөнүн объектиси. Резина жана металл элементинин күч менен басылып аткан кезинде анын ичинде жүрүп жаткан чыңалуу жана майышуу абалын табуу. Matlab системасы менен жаңы ыкма менен чыңалуу жана майышуу абалын аныктоо.

Иштин максаты. Илимий иштин максаты жаңы аналитикалык ыкманы колдонуп резина жана металл элементинде резинанын майышуусун аныктоо.

Статикалык чектик маселени кароодо колдонула элек ыкма менен чыңалуу жана майышуу абалын эсептөө жана резина кабатында болгон жылуушуусун аныктоо.

Изилдөөнүн ыкмалары. Жаңы колдонула элек ыкма менен резина жана металл элементтердин чыңалуу жана майышуу абалы эсептелди.

Профессор Дуйшеналиев Т.Б. ойлоп чыккан катуу заттын майышуу теориясында жаңы көз караштын негизинде резина жана металл элементинин математикалык модели сунушталды.

Алынган жыйынтыктар жана алардын жаңычылдыгы:

- Имараттардын алдына коюлган резина жана металл элементтердин акыркы майышуусун аныктаганга жаңы колдоно элек ыкма менен эсептеп чыгаруу;
- Жаңы ыкманын колдонулушу Matlab аркылуу көрсөтүлгөн.
- Статикалык жана динамикалык күчтөрдүн таасирин аныкташ үчүн эксперименттер жүргүзүлгөн жана эксперименттерден алынган жыйынтыкты теориядан алынган эсептөөлөр менен салыштуруусу;

Сунуштамалар. Жүргүзүлгөн эксперименттердин жыйынтыгы жана изилдөөдөн алынган эсептер инженерлерге жана куруучуларга түздөн түз керектүү маалымат жана эсеп болору анык. Активдүү туруштук бере ала турган системаны курууда колдонууга нук берет.

РЕЗЮМЕ

диссертации Аскарбекова Руслана Нуркожоевича «**Моделирование напряженно-деформированного состояния вибро- и сейсмоизолирующих резинометаллических элементов**», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Ключевые слова: резинометаллические элементы, напряженно-деформированное состояние резинометаллических элементов, экспериментальные значения, статическая краевая задача

Объект исследования. Напряженно-деформированное состояние резинометаллических элементов при нагружении. Применение нового метода для определения напряженно-деформированного состояния резинометаллических опор в системе Matlab.

Цель работы. Цель диссертационной работы заключается в использовании нового аналитического метода для определения деформации резинового слоя в резинометаллическом элементе.

Используется нетрадиционное решение статической краевой задачи для расчета напряженно-деформированного состояния и перемещений точек в резиновом слое.

Методы исследования. Использован новый нетрадиционный метод для расчета напряженно-деформированного состояния резинометаллических элементов. Предложена математическая модель резинометаллического элемента при статическом нагружении на основе нового воззрения на теорию механики деформируемого твердого тела разработанный профессором Дуйшеналиевым Т.Б.

Полученные результаты и их новизна:

- Предложен новый метод расчета резинометаллических элементов опоры сооружений в области их конечных деформаций и перемещений.
- Решение с использованием нового метода приводится в системе Matlab для более наглядного представления.
- Проведены эксперименты при статическом и динамическом нагружениях для сопоставления данных с теоретическими результатами.

Рекомендации. Проведенные эксперименты и результаты, полученные в ходе исследований, являются весьма полезными для инженеров и проектировщиков при построении систем активной сейсмической, вибрационной защиты зданий и других инженерных сооружений.

SUMMARY

of the dissertation of **Askarbekov Ruslan Nurkojoevich** on the topic: “**Modelling of stress-strain state of vibration and seismic isolation rubber metal elements**”
for the degree of candidate of physical and mathematical sciences on a specialty
01.02.04 – Mechanics of deformable solids

Keywords: rubber-metal elements, the active seismic protection system, stress-strain state of the rubber elements, the experimental values, static boundary problem.

The object of research work. Stress-strain condition of rubber-metal elements under loading. Application of new methods with Matlab.

The aim of research work. The aim of dissertation work is to use of a new analytical method for determining the deformation of the rubber layer in the rubber-metal element.

Uses a non-traditional solution of the static boundary problem for the calculation of strenuous-deformed state and the displacements of points in the rubber layer.

Methods of research. For the application of the new, non-traditional method is used a mathematical model of rubber element under static loading, and application the basic of relations of the theory mechanics of deformable body revised by Professor Duishenaliev T.B. to calculate the stress-strain state of rubber metal elements.

The results of the work:

- A new method for calculating the rubber-metal elements used in constructions in the area of their ultimate and large deformations and displacements.
- The solution by using the new method is given in a system Matlab for a visual view.
- Experiments are carried out under static and dynamic loading. All results of experiment is used for comparison with the theoretical results.

Application area. The new method allows determining with the help of the analytic dependence of the stress-strain state of the body under the influence of loading. The experiments and results obtained in the studies are very useful for engineers and designers in the design of active seismic, vibration protection of buildings and other engineering structures.

АСКАРБЕКОВ РУСЛАН НУРКОЖОЕВИЧ

Моделирование напряженно-деформированного состояния вибро- и сейсμοизолирующих резинометаллических элементов

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать: 27.12.2016 г.

Объем: 1 п.л.
Формат 60x90 1/16.

Заказ № ____
Тираж 200 шт
