

ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКЦИОНЕРНАЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНАЯ
КОМПАНИЯ «УЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙУЛЛАРИ»

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи
УДК 629.423.31; 621.822

САДЫКОВА ГУЛЧЕХРА АЙТАЛИЕВНА

Модернизация конструкции пневморессоры электровоза

5А310704 – Электротехнический комплекс и
системы (на железнодорожном транспорте)

Диссертация
выполненная для получения академической степени
магистра

Научный руководитель:
д.т. н., профессор Хромова Г.А.

Ташкент – 2013 г.

«ЎЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙЎЛЛАРИ»
ДАВЛАТ АКЦИОНЕРЛИК ТЕМИР ЙЎЛ КОМПАНИЯСИ
ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ ОЛИЙ ВА ЎРТА МАХСУС
ТАЪЛИМ ВАЗИРЛИГИ
ТОШКЕНТ ТЕМИР ЙЎЛ МУҲАНДИСЛАРИ ИНСТИТУТИ

Қўлёзма ҳуқуқи асосида
УДК 629.423.31; 621.822

САДЫКОВА ГУЛЧЕХРА АЙТАЛИЕВНА

**“Электровознинг пневморессора конструкциясини
модернизациялаштириш”**

5А310704 – Электротехник мажмуалар ва
тизимлар (темир йўл транспортида)

Магистр
академик даражасини олиш учун ёзилган
диссертация

Илмий раҳбар:
т.ф.д., профессор Хромова Г.А.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ И ПАТЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО МЕТОДАМ РАСЧЕТА И ПЕРСПЕКТИВНЫМ КОНСТРУКЦИЯМ ПНЕВМОРЕССОР ЭЛЕКТРОВОЗОВ	12
1.1. Обзор научно-технической литературы по методам расчета пневморессор электровозов	12
1.2. Обзор патентной литературы по перспективным конструкциям пневматических упругих элементов и рессор транспортных средств.....	19
1.2.1. Пневматический упругий элемент.....	19
1.2.2. Рессора малого сопротивления.....	28
1.3. Постановка задач исследований.....	33
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПНЕВМОРЕССОРЫ В ВИДЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ДАВЛЕНИЯ	34
2.1 . Разработка динамической модели пневморессоры в виде пространственной системы с учетом влияния пульсирующего давления	3
4	
2.2 Численные исследования по разработанной новой модели пневморессоры в виде пространственной системы с пульсирующим давлением в рабочей среде с использованием <i>среды MathCAD 13</i>	49

2.3 Исследование совместных колебаний прямоугольного элемента мягкой оболочки в виде пластинки с сеточным каркасом для пневморессоры электрического транспорта.....52

2.4 Анализ численных результатов с построением графиков и таблиц.....62

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПНЕВМОРЕССОРЫ ЭЛЕКТРОВОЗА.....77

ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ.....85

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....87

ПРИЛОЖЕНИЯ.....91

1. Публикации магистранта САДЫКОВОЙ Г.А. :

1.1. Пневморессора электровозов. Авторы: Хромова Г.А., Уринбаева Г.А., Хромов С.А. Заявка на Патент Республики Узбекистан на изобретение № IAP 20120176, подана 11.05.2012 г.

1.2. Уринбаева Г.А. Научный руководитель: проф. Г.А. Хромова. Техник йуналишдаги бакалавр талабалар талабалар учун математик моделлаштириш фанидан укитиш хусусиятлари. В сборнике VIII межвузовской научно-методической конференции студентов магистратуры, стажеров и соискателей Посвященной 80-летию ТашИИТ «Актуальные проблемы научно-педагогической работы», 25 ноября 2011 года, ТашИИТ.

1.3. Уринбаева Г.А. Научный руководитель: проф. Г.А. Хромова. Новая конструкция пневморессоры

электроподвижного состава упругими демпфирующими элементами. В сборнике трудов X Межвузовской научно-практической конференции студентов, бакалавров и магистратуры, стажеров и соискателей «Молодой научный исследователь», 3-4 апреля 2012 года, ТашИИТ.

1.4. Уринбаева Г.А. Научный руководитель: проф. Г.А. Хромова. Применение виртуальных технологий при выполнении практических работ по предмету САПР в бакалавриате. IX межвузовской научно – методической конференции студентов магистратуры, стажеров-исследователей-соискателей «Актуальные проблемы научно-педагогической работы» 30 ноября 2012 года, ТашИИТ.

1.5. Уринбаева Г.А. Научный руководитель: проф. Г.А. Хромова. Исследование совместных колебаний прямоугольного элемента упругой оболочки пневморессоры в виде пластинки с сеточным каркасом. Научные труды республиканской научно-технической конференции с участием зарубежных учённых «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» 5-6 декабря 2012 года.

1.6. Уринбаева Г.А. Научный руководитель: проф. Г.А. Хромова. Исследования упругой оболочки пневморессоры в виде пластинки с сеточным каркасом. XI Межвузовская научно-практическая конференция студентов бакалавриата и магистратуры, стажеров-исследователей-соискателей «Молодой научный исследователь» 2-3 апреля 2013 г.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Анализ исследований по расчету пневматических рессор транспортных средств с резино-кордным армированием показал, что почти во всех конструкциях рессорного подвешивания современных электровазозов, вагонов метрополитена, трамваев и троллейбусов применяются пневматические рессорные элементы различного типа (например, во Франции, Германии, Швейцарии и Японии). Особенно широко они применяются при строительстве и эксплуатации новейших монорельсовых дорог, строительство которых планируется осуществить в городе Ташкенте в ближайшем будущем (в настоящее время монорельсовый электрический транспорт – Electrical Mono-rail Type-надежно функционирует в Швейцарии, Японии и Австрии).

Пневматические резино-кордные упругие элементы послужили основой для создания новых типов регулируемых подвесок с автоматически управляемыми параметрами. Использование в качестве упругого тела воздуха позволяет в небольшом объеме реализовать большую гибкость, вплоть до предельной, соответствующей нижней границе собственных частот колебаний кузова транспортного средства. Поэтому вопросы повышения надежности работы имеющихся в эксплуатации локомотивов и вагонов пневматических упругих элементов (типа рессор) путем модернизации отдельных конструктивных узлов при капитальном ремонте с продлением срока полезного использования, являются актуальными.

По проведенному нами обзору научно-технической и патентной литературы по проблеме повышения прочности и надежности рессорного подвешивания вагонов и локомотивов путем использования пневматических упругих элементов за последние 10 -15 лет по классам МПК⁸ В 61 D 3/04, МПК⁸ В 61 D 3/00, МПК⁸ В 61 Р 1/00, МПК⁸ В 61 F 5/14, МПК⁸ В 61 D 17/08, установлено, что основными путями повышения надежности и прочности рамы кузова являются создание прочной конструкции самой рамы кузова, а также

создание надежной конструкции рессорного подвешивания транспортных средств.

Недостатками существующих конструкций рессорных элементов являются гашение только вертикальных нагрузок, при этом они не способны демпфировать крутильные, горизонтальные нагрузки и боковые удары (боковая качка, виляние, откос), возникающие при движении транспортного средства.

Кроме того, методы расчета на динамическую прочность несущего эквивалентного каркаса пневматических рессорных элементов, а также методы их модернизации с целью продления срока полезной эксплуатации развиты недостаточно.

Объектом исследования является пневматический рессорный элемент (пневморессора) с учетом динамических воздействий, возникающих при движении рельсового транспортного средства.

Цель работы - исследование закономерности динамического нагружения модернизированной конструкции пневматического рессорного элемента и разработка численно-аналитической модели для квазистатического расчета элемента упругой оболочки пневморессоры, зажатой ребрами жесткости, которая является логическим продолжением моделей и методик расчета, представленных в работах проф. А.Н. Савоськина, проф. С.В. Вершинского и др.

Предлагаемая нами динамическая (квазистатическая) модель является абсолютно новой, так как она позволяет учесть вес элементов упругой резино -кордной оболочки пневморессоры, вес металлического каркаса, касательные и нормальные составляющие внутреннего давления воздуха (раньше учитывались только нормальные силы), влияние гибкости (упругости) элементов оболочки, их относительное перемещение, кривизну (радиус изгиба) , совместную работу элементов упругой оболочки и ребер жесткости металлического каркаса в динамике. Данный аналитико-численный метод (на базе метода Рунге- Кутты) позволит

осуществить расчет, в частности, пневматических рессор различного типа и конфигурации, а также при изменении режима работы емкостей, например, при боковой качке, галлопировании и пространственных колебаниях транспортного средства.

Данный метод полностью компьютеризирован (для PENTIUM), поэтому его использование не вызывает сложности при вычислениях, программы расчета выполняются в течение 2-3 минут, при этом необходимо лишь задать требуемые параметры элементов упругой оболочки и металлического каркаса пневматической рессоры, а также условия эксплуатации ее на транспортном средстве.

Методика исследований включает в себя аналитическое решение системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающей колебания упругого элемента пневморессоры, зажатого металлическими ребрами жесткости. Система уравнений решается методом Рунге – Кутты на ЭВМ. Связка по граничным условиям (стыковка) выполнена на базе метода кусочно-линейной аппроксимации с применением ЭВМ. Графики построены с использованием пакета программ **Mathcad 13**.

Научная новизна работы состоит в:

- проведении обзора научно-технических и патентных источников по проблеме повышения динамической прочности и надежности пневматических упругих элементов вагонов и локомотивов, применительно к электрическому транспорту, с подбором рекомендуемых решений и способов модернизации по зарубежным аналогам и прототипам (Обзор патентных исследований по конструкциям упругих пневматических элементов транспортных средств был выполнен за последние 15 - 20 лет по классам МПК⁸ В 61 D 3/04, МПК⁸ В 61 D 3/00, МПК⁸ В 61 Р 1/00, МПК⁸ В 61 F 5/14, МПК⁸ В 61 D 17/08;

- разработке численно-аналитической модели для динамического расчета пневматических упругих элементов вагонов и локомотивов (типа

пневморессор), базирующейся на методе Рунге – Кутта. Предлагаемый прикладной метод включает в себя аналитическое решение системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающей колебания упругого элемента пневморессоры, зажатого ребрами жесткости; система уравнений решается численно методом Рунге- Кутта на ЭВМ.

- разработке алгоритма, блок-схемы и программы для проведения численных исследований по модели колебаний пневморессоры электровоза, численные исследования по данной модели проведены в среде **MathCad 13**;

- численном исследовании колебаний упругого элемента пневматической рессоры, зажатого металлическими ребрами жесткости, с целью подбора решений по его модернизации;

- создании перспективной конструкции пневморессоры транспортных средств с улучшенной характеристикой динамического демпфирования (подана 1 заявка на Патент Республики Узбекистан на изобретение № IAP 2012 20176 от 11.05.2012 г.).

Практическая ценность. Разработанная автором перспективная конструкция пневморессоры транспортного средства с улучшенной динамической характеристикой демпфирования может быть широко внедрена на железнодорожном транспорте. Данная конструкция будет служить для повышения ходовых качеств экипажа (плавности хода, коэффициента вертикальной, горизонтальной и боковой динамики вагона).

Выполнение рессорного подвешивания тележки вагона указанным образом позволит получить технический результат в виде улучшения ходовых качеств экипажа и повышения надежности транспортного средства железнодорожного подвижного состава благодаря введению в конструкцию пневматической рессоры радиальных секторов с автоматическим регулированием подачи давления воздуха.

Подобная конструкция рессорного подвешивания транспортного средства может найти широкое применение на железнодорожном транспорте, преимущественно на вагонах метрополитена. Ее применение позволит в целом повысить надежность, улучшить плавность хода железнодорожного подвижного состава благодаря введению пневматической рессоры предлагаемой конструкции с радиальными секторами (не менее 6-ти), обеспечивающей гашение как вертикальных, так и горизонтальных нагрузок, а также крутильных и боковых ударов, возникающих при движении транспортного средства, как на прямых участках, так и в кривых.

Реализация работы.

В результате автором данной работы разработан комбинированный численно-аналитический метод на базе метода Рунге – Кутты. Данный инженерный прикладной метод позволяет производить динамический расчет по колебаниям пневматических рессор электрического транспорта.

Метод может быть широко применен при проектировании новых и модернизации существующих конструкций пневматических рессор с учетом процесса рациональной компьютеризации.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались в научные труды республиканской научно-технической конференции с участием зарубежных учёных по теме «Ресурсо-сберегающие технологии на железнодорожном транспорте» (5-6 декабря 2012 г.). Из них 2 статьи в X и XI межвузовской научно-практической конференции студентов, бакалавров и магистратуры, стажеров и соискателей «Молодой научный исследователь», (2-3, 3-4 апреля 2012-13 г.), и 2 статьи на научном семинаре посвященной 80-летию ТашИИТ «Актуальные проблемы научно-педагогической работы», (25 -30 ноября 2011-12 г.).

Имеется 1 положительное решение на изобретение на Патент Республики Узбекистан.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 5 печатных работы, из них 1 статья в научные труды республиканской научно-технической конференции с участием зарубежных ученых (декабрь 2010 г., ТашИИТ) «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте», ещё 2 статьи в научно – методической конференции студентов магистратуры, стажеров-исследователей-соискателей один из которых посвященной 80-летию ТашИИТ «Актуальные проблемы научно-педагогической работы», также 2 статьи в межвузовской научно-практической конференции студентов, бакалавров и магистратуры, стажеров и соискателей «Молодой научный исследователь».

Положительное решение формальной экспертизы на изобретение на Патент Республики Узбекистан (№ IAP 20120176, подана 11.05.2012 г.).

Работа выполнялась в Ташкентском институте инженеров железнодорожного транспорта на кафедре «Электрический транспорт» в 2010 – 2013 годах под руководством профессора Хромовой Г.А.

Структура и объем работы. Диссертационная работа содержит 97 страниц машинописного текста, состоит из введения, трех глав (с выводами по каждой из них), общих выводов и рекомендаций, списка использованной литературы, включающего 49 наименований, а также приложения. Работа выполнялась в Ташкентском институте инженеров железнодорожного транспорта на кафедре «Электрический транспорт» (2010÷2012 гг.).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность избранной темы, ставится цель работы, её научная новизна и практическая ценность, реализация работы и краткое содержание работы.

В первой главе «Обзор научно-технических и патентных источников по методам расчёта и перспективным конструкциям пневморессор

электровозов» представлен источниками научно-технической патентных литератур по методам расчета пневморессор электровозов.

В конце главы обосновываются задачи исследований.

Во второй главе «Разработка динамической модели пневморессоры в виде пространственной системы с учётом влияния пульсирующего давления» приводится разработка методов решения уравнений анализ результатов численного расчета с целью обоснования рациональных параметров созданной конструкции. В конце главы приводятся обобщающие выводы.

В третьей главе «Разработка модернизированной конструкции пневморессоры электровоза» приводится предлагаемый нами вариант модернизации существующих пневморессор электровозов, на который подана заявка на изобретение на Патент Республики Узбекистан (№ IAP 20120176, подана 11.05.2012 г).

В заключении работы приводятся выводы и рекомендации, список использованной литературы.

ГЛАВА 1. ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ И ПАТЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО МЕТОДАМ РАСЧЕТА И ПЕРСПЕКТИВНЫМ КОНСТРУКЦИЯМ ПНЕВМОРЕССОР ЭЛЕКТРОВОЗОВ

1.1. Обзор научно-технической литературы по методам расчета пневморессор электровозов.

В пневматических виброизолирующих элементах упругим телом является сжатый воздух, заполняющий резино-кордную оболочку. Преимущество таких рессор – возможность обеспечения сравнительно простыми средствами большого статического прогиба, а также стабильного и надежного демпфирования колебаний. Последнее достигают, устраивая специальные отверстия и каналы – дроссели, связывающие пневмобаллоны с дополнительными резервуарами. Кроме того, изменяя давление, с помощью таких рессор можно поддерживать постоянную высоту пола кузова над головками рельсов независимо от загрузки вагона пассажирами.

Баллонные пневморессоры (рисунок 1.1, а [2]) работают только в вертикальном направлении, подушечные (рисунок 1.1, а.) – в вертикальном и продольном, диафрагменные (рис. 1.1, в.) – в вертикальном и горизонтальном. Комбинированные пневморессоры (рис. 1.1, г) допускают повышенные вертикальные перемещения по сравнению с диафрагменными. Сопротивление диафрагменной рессоры поперечной деформации возникает вследствие изменения площади и формы поверхности контакта оболочки с поршнем пневморессоры и частично за счет жесткости оболочки.

Для снижения вертикальной жесткости пневморессоры соединяют с дополнительным резервуаром большого объема, в качестве которого используют обычно внутренние полости отдельных балок рамы тележки. Соединяют пневморессоры с дополнительным резервуаром

трубопроводами, которые используют в качестве дросселей, обеспечивающих требуемый демпфирующий эффект.

Для описания упругих свойств пневморессор обычно используют уравнение состояния газа при постоянной температуре:

$$p_0 V_0^n = p V^n \text{ или } p = p_0 (V_0 / V)^n,$$

где n - показатель политропы (при медленном статическом деформировании пневморессоры $n=1$, а при динамическом $n=1,3 \div 1,4$), p_0 и V_0 - соответственно давление и объем воздуха в исходном положении статического равновесия.

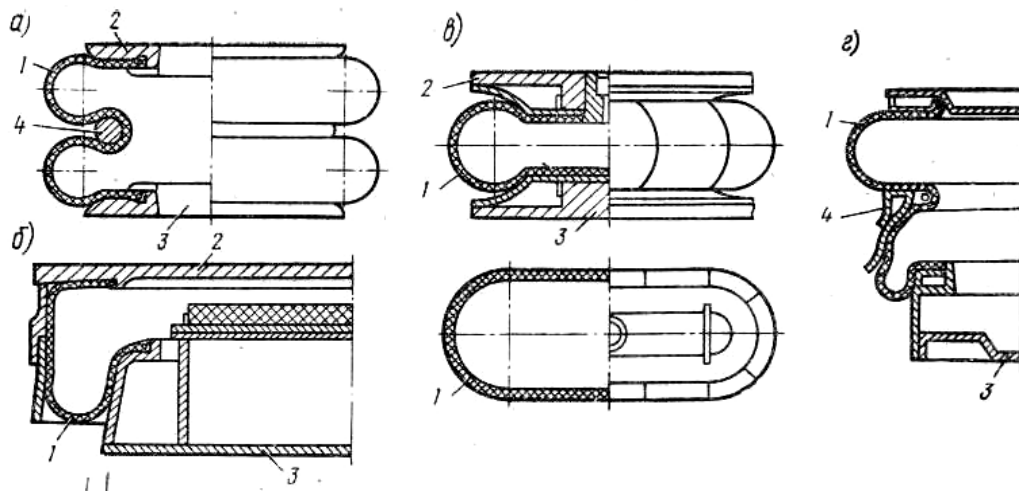


Рисунок 1.1. Баллонная (а), диафрагменная (б), подушечная (в) и комбинированная (г) пневморессоры:

1- резино-кордная оболочка; 2- поршень; 3- основание рессоры; 4- стяжка.

Текущее давление P и объем V воздуха соответственно:

$$P = P_e - P_a;$$

$$V = V_0 - S_y \Delta,$$

где p_a и p_e - соответственно атмосферное и избыточное давление воздуха; S_y - эффективная (несущая) площадь пневморессоры; Δ - деформация пневморессоры.

Преобразуем уравнение деформации газа к виду

$$P = P_0 \left(\frac{V_0}{V} \right)^n = \frac{P_0 V_0^n}{(V_0 - S_y \Delta)^n} \quad (1.1)$$

Нагрузка на рессоры определяется как сумма нагрузок, воспринимаемых оболочкой и воздухом:

$$P = P_{ia} + P_e = \alpha_{ia} \Delta + \delta_e S_y = \alpha_{ia} \Delta + (\delta + \delta_a) S_y.$$

Заменив здесь p в соответствии с выражением (1.1), получим

$$D = \alpha_{ia} \Delta + \left[\frac{\delta_0 V_0^n}{(V_0 - S_y \Delta)^n} + p_a \right] S_y. \quad (1.2)$$

Жесткость пневморессоры находят как производную от нагрузки по деформации:

$$\alpha = \frac{dP}{d\Delta} = \alpha_{ia} S_y \frac{d(p + p_a)}{d\Delta} + (p + p_a) \frac{dS_y}{d\Delta}$$

или

$$\alpha = \alpha_{ia} + \frac{npS_y^2 V_0^n}{(V_0 - S_y \Delta)^{n+1}} + (p + p_a) \frac{dS_y}{d\Delta}$$

Обычно жесткость α_{ia} мала по сравнению со вторым слагаемым этой формулы. Кроме того, площадь S_y при деформации рессоры изменяется так, что $\frac{dS_y}{d\Delta} \approx 0$. Поэтому в первом приближении можно принять

$$\alpha \approx \frac{np_0 S_y^2 V_0^n}{(V_0 - S_y \Delta)^{n+1}} = \frac{n S_y^2 p_0}{(1 - S_y \Delta / V_0)^{n+1} V_0} \quad (1.3)$$

Если рессора соединена с дополнительными резервуаром значительного объема $V_A \gg V_0$, то это приводит к снижению влияния $S_y \Delta$ и уменьшению жесткости пневмоподвешивания. Например, статическая характеристика пневморессоры баллонного типа, представляющая собой жесткую нелинейную характеристику (рисунок 1.2), при увеличении объема V_A вследствие снижения жесткости приближается к линейной. Последнее объясняется тем, что при увеличении $V_A + V_0$ влияние $S_y \Delta$ снижается.

Кроме того, пневмоэлементы, применяемые на подвижном составе, имеют такую конструкцию, что при их деформации площадь S_y меняется незначительно.

С учетом этого из выражения (1.3) можно получить приближенную формулу жесткости для комплекта пневмоподвешивания, состоящего из пневморессоры с дополнительным резервуаром, заменив V_0 на $V_{\dot{A}} + V_0$ и опустив малую величину $S_y \Delta$,

$$c = n S_y^2 p_0 \backslash (V_0 + V_{\dot{A}}).$$

Формулы (1.2) и (1.3) являются приближенными, так как в них не учтено рассеивание энергии, связанное с теплообменом с окружающей средой и потерями энергии при истечении газа из пневмоэлемента в дополнительный резервуар и обратно. Обычно теплообменом с окружающей средой пренебрегают. Рассмотрим рассеяние энергии, связанное с истечением газа из пневмобаллона в дополнительный объем. В этом случае состояние системы «пневмоэлемент и резервуар» описывается тремя уравнениями:

для пневмоэлемента

$$p_0 V_0^n = p_1 (V_0 - S_y \Delta - \chi \backslash \rho)^n;$$

для дополнительного резервуара

$$p_0 V_0^n = p_2 (V_{\dot{A}} - \chi \backslash \rho)^n; \quad (1.4)$$

для расхода воздуха χ через дроссель из пневмоэлемента в соединительную трубку

$$R \frac{d\chi}{dt} = p_1 = p_2, \quad (1.5)$$

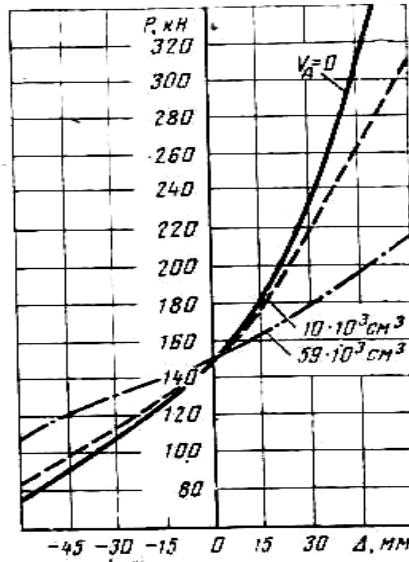


Рисунок 1.2. Статические характеристики баллонной рессоры грузоподъемностью 150 т, при различном объеме дополнительного резервуара.

Формула (1.5) записана в линейном приближении, поскольку разности давлений $p_1 - p_2$ и скорости протекания воздуха считаются малыми. Дальнейшее упрощение задачи связано с линеаризацией уравнений состояния, что можно выполнить в связи с тем, что $S_y \Delta \ll V_0$. Разлагая правые части уравнений (1.4) и (1.5) по формуле бинома Ньютона и ограничиваясь первой степенью и Δ получим:

$$\rho p_1 V_0 + n p_0 \chi = \rho n p_0 S_y \Delta; \quad (1.6)$$

$$0 = \delta_2 \rho V_A - p_0 n \chi. \quad (1.7)$$

Перепишем выражение для грузоподъемности с учетом введенных обозначений

$$D = (\delta_0 + \delta_1 - \delta_a) S_y. \quad (1.8)$$

Рассматривая уравнения (1.5) - (1.7) совместно с выражением (1.8) и исключая из них p_1 и χ , получим:

$$\begin{cases} P = S_y (p_0 - p_1) + n S_y^2 \frac{p_0}{V_0} \Delta - S_y \frac{V_d}{V_0} D_2; \\ S_y R \frac{V_d}{n p_0} \frac{dp_2}{dt} + S_y \left(1 + \frac{V_d}{V_0} \right) p_2 = n \frac{p_0}{V_0} S_y^2 \Delta. \end{cases} \quad (1.9)$$

Введя дополнительную обобщенную координату $\Delta_{\dot{A}} = S_{\dot{y}} P_2 \setminus (\alpha_1 \lambda)$, запишем систему уравнений (1.9) в виде уравнений движения безынерционной механической модели:

$$\begin{cases} P = P_{CT} + \kappa_1 (\Delta - \Delta_D); \\ \beta_3 \Delta + \lambda \kappa_1 \Delta_D = \kappa_1 (\Delta - \Delta_D). \end{cases} \quad (1.10)$$

Статическая грузоподъемность пневморессоры

$$P_{\bar{n}\delta} = S_{\dot{y}} (P_0 - P_a)$$

коэффициент затухания эквивалентного вязкого трения пневморессоры

$$\beta_3 = RS_3^2 \rho;$$

жесткость пневмобаллона в состоянии статического равновесия

$$\alpha_1 = nS_{\dot{y}}^2 P_0 \setminus V_0;$$

отношение объемов $\lambda = V_0 \setminus V_{\dot{A}}$.

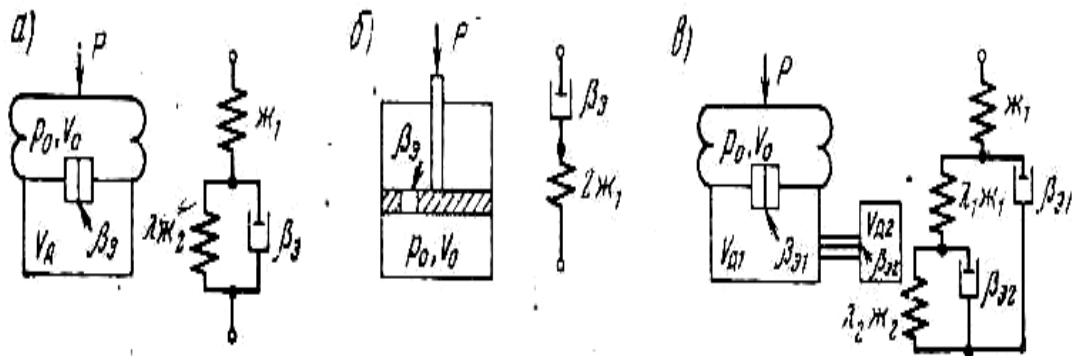


Рисунок 1.3. Структурные схемы (слева) и механические модели (справа) пневморессоры с одним дополнительным резервуаром (а), пневмогасителя (б) с двумя дополнительными резервуарами, включенными последовательно (в).

Уравнение (1.10) также описывают движение механической системы, нагруженной силой $P_{\bar{n}\delta}$ и состоящей из пружин и элемента вязкого трения (рисунок 1.3., а). Таким образом, пневморессору с упруго диссипативными свойствами, определяемыми ее уравнениями деформации, можно представить чисто механической моделью из упругих и диссипативных элементов, параметры которых однозначно определяются параметрами пневморессоры.

С помощью уравнений (1.9) или их механического аналога (1.10) можно получить выражение для динамической жесткости пневмоэлемента при колебаниях относительно положения статического равновесия. Предполагая, что Δ и $\Delta_{\dot{A}}$ изменяются по гармоническому закону $1\dot{a} \setminus \omega t$, можно найти динамическую жесткость как комплексную амплитуду соответствующей силы P

$$\mathcal{K} = (j\omega) = \frac{\mathcal{K}_1}{1 + 1 \setminus (\lambda + j\omega\tau)}, \quad (1.11)$$

Где τ - постоянная времени:

$$\tau = \beta \setminus \alpha_1 = RPV_0(np_0) \quad (1.12)$$

Таким образом, постоянная времени, характеризующая затухание колебаний, кроме параметров p_0, n и V_0 , входящих в характеристику жесткости рессоры, определяется еще грузоподъемностью рессоры P и постоянной R . Последнюю необходимо определять экспериментально для дросселей разных типов. Вместе с тем некоторые оценки величины R можно получить и теоритически.

В рассматриваемом линейном приближении

$$R = 1 \setminus (\beta\rho),$$

Где B - величина, зависящая от геометрических характеристик дросселя: длины и площади поперечного сечения, а также от динамической вязкости воздуха $\mu_{\dot{A}}$

Если предположить, что истечение воздуха происходит при ламинарном режиме, то для цилиндрического дросселя типа капилляр диаметром d

$$B = \frac{\pi d^4}{128\mu_{\dot{A}} l};$$

для дросселя в виде прямоугольной щели высотой \dot{a}_{δ} и шириной b_{δ}

$$\hat{A} = \frac{\dot{a}_{\delta}^3 b_{\delta}}{12\mu_{\dot{A}} l};$$

Динамическая вязкость воздуха, Па·с, зависит от температуры:

$$\mu_d = 1,71 \cdot 10^{-5} + 4,94 \cdot 10^{-8} T,$$

Эти формулы дают при определении \hat{A} и $\mu_{\hat{A}}$ достаточно точные результаты в рассматриваемом случае малых колебаний, когда $S_y \Delta \gg V_0$ и при $l \setminus d \geq 10$.

1.2. Обзор патентной литературы по перспективным конструкциям пневматических упругих элементов и рессор транспортных средств.

1.2.1. Пневматический упругий элемент.

Известен пневматический упругий элемент по патенту RU 2 428 602 С2, опубликован 10.09.2011 г., Бюл. № 25 [3]. Изобретение относится к амортизационным устройствам.

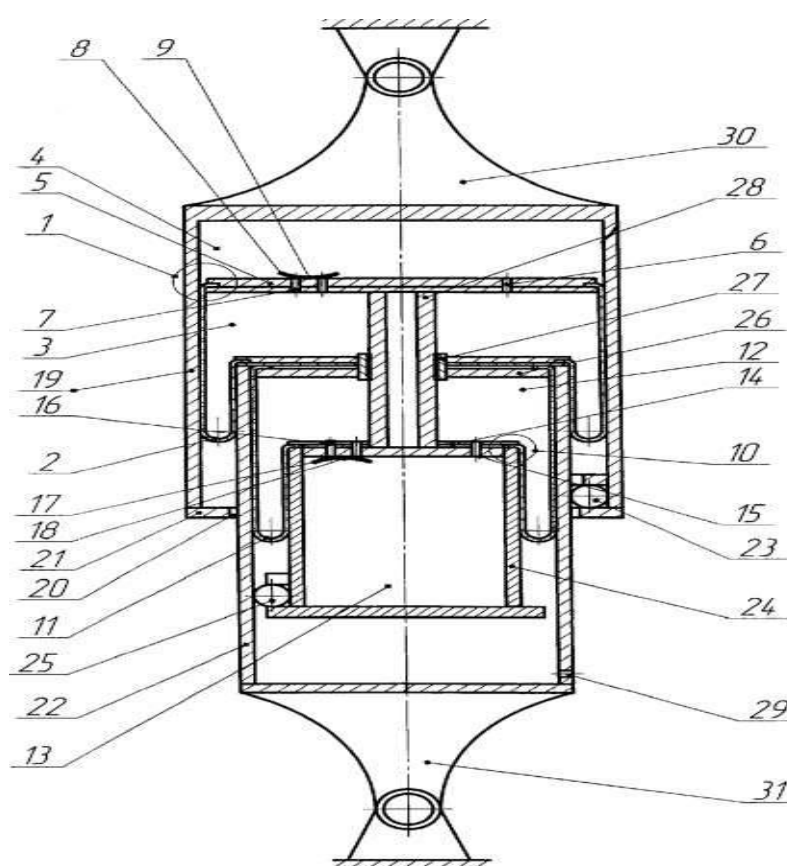


Рисунок 1.4. Пневматический упругий элемент по Патенту России на изобретение № RU 2 428 602 С2, разрез.

Пневматический упругий элемент содержит основной упругий элемент (1), состоящий из резинокордной оболочки (2), рабочей (3) и дополнительной (4) емкости и расположенной между ними перегородки (5) с калиброванным отверстием (6) и с отверстиями (7), перекрываемыми свободно лежащей диафрагмой (8) при ходе отдачи, и вспомогательный упругий элемент (10). Основной упругий элемент (1) заключен в первый цилиндрический стакан (19), имеющий отверстие (20) на торце (21) стакана. Вспомогательный упругий элемент (10) заключен во второй цилиндрический стакан (22), соосный первому цилиндрическому стакану (19) и установленный в его отверстии (20) на торце (21). Дополнительные емкости (4) и (13) соединены друг с другом за счет штока (28), соединяющего их перегородки и проходящего через обе рабочие емкости (3) и (12) и через отверстие (27) с уплотнением на торце (26) второго цилиндрического стакана (22). Вспомогательная дополнительная емкость (13) выполнена в виде третьего цилиндрического стакана (24), имеющего по нижнему краю центрирующие ролики (25), соприкасающиеся с внутренней поверхностью второго цилиндрического стакана (22). В днище второго цилиндрического стакана (22) выполнено отверстие (29), соединяющее его с атмосферой. Достигается упрощение конструкции, а также возможность присоединения амортизируемого объекта с разных сторон.

Изобретение относится к амортизационным устройствам, в частности с использованием газа в камерах с эластичными стенками.

Основным недостатком устройства является нестабильность демпфирующих свойств подвески и низкая эффективность диссипации энергии колебаний объекта.

Известен также пневматический упругий элемент, описанный в патенте РФ № 2325567, МПК. F16F 9/04 (прототип), содержащий резинокордную оболочку, рабочую и дополнительную емкости и расположенную между ними перегородку с калиброванным отверстием и с отверстиями,

перекрываемыми свободно лежащей диафрагмой при ходе отдачи, рабочая и дополнительная емкости заключены в нижний цилиндрический стакан с отверстием на верхнем торце стакана, а на верхнем торце дополнительной емкости соосно последней установлен вспомогательный упругий элемент, содержащий вспомогательную резинокордную оболочку, вспомогательные рабочую и дополнительную емкости и расположенную между ними вспомогательную перегородку с калиброванным отверстием и с отверстиями, перекрываемыми свободно висящей диафрагмой при ходе сжатия, кроме того, вспомогательная рабочая емкость помещена в верхний цилиндрический стакан, жестко закрепленный на верхнем торце нижнего цилиндрического стакана, причем вспомогательная дополнительная емкость расположена в отверстии верхнего торца нижнего цилиндрического стакана. Дополнительная емкость жестко соединена своим верхним торцом с основанием вспомогательной дополнительной емкости и со стойками, проходящими через направляющие отверстия верхнего торца нижнего цилиндрического стакана и связывающими амортизируемый объект с пневматическим упругим элементом.

Основным недостатком устройства, обладающего стабильными демпфирующими свойствами и высокой эффективностью диссипации энергии колебаний объекта, является сложность конструкции, отсюда технологическая сложность изготовления, т.к. конструкция содержит четыре цилиндрических стакана, имеющих соосное расположение. Также недостатком устройства является то, что связь амортизируемого объекта с пневматическим упругим элементом может быть осуществлена только посредством стоек, проходящих через направляющие отверстия верхнего торца нижнего цилиндрического стакана, т.е. только с одной стороны устройства, что ограничивает функциональные возможности использования устройства в конкретном виброзащищаемом объекте, в т.ч. в транспортных средствах.

Задача изобретения состоит в упрощении конструкции и ее изменении для возможности присоединения амортизируемого объекта с разных сторон устройства при сохранении стабильности демпфирующих свойств и высокой эффективности диссипации энергии колебаний объекта.

Поставленная задача достигается тем, что в известном пневматическом упругом элементе, содержащем основной упругий элемент, состоящий из резинокордной оболочки, рабочей и дополнительной емкости и расположенной между ними перегородки с калиброванным отверстием и с отверстиями, перекрываемыми свободно лежащей диафрагмой при ходе отдачи, вспомогательный упругий элемент, состоящий из вспомогательной резинокордной оболочки, вспомогательной рабочей и дополнительной емкости и расположенной между ними вспомогательной перегородки с калиброванным отверстием и с отверстиями, перекрываемыми свободно лежащей диафрагмой при ходе сжатия, причем основной упругий элемент заключен в первый цилиндрический стакан, имеющий отверстие на торце стакана, вспомогательный упругий элемент заключен также во второй цилиндрический стакан, соосный первому цилиндрическому стакану, а дополнительные емкости обоих упругих элементов жестко соединены друг с другом, согласно изобретению перегородка основного упругого элемента соединена с первым цилиндрическим стаканом, второй цилиндрический стакан установлен внутри первого цилиндрического стакана в его отверстии на торце, на краях первого цилиндрического стакана установлены центрирующие ролики, соприкасающиеся с внешней поверхностью второго 20 цилиндрического стакана, к верхнему торцу второго цилиндрического стакана, имеющего центральное отверстие с уплотнением, примыкают рабочие емкости основного и вспомогательного упругих элементов, вспомогательная дополнительная емкость выполнена в виде третьего цилиндрического стакана, имеющего по нижним краям центрирующие ролики, соприкасающиеся с внутренней поверхностью второго цилиндрического стакана, обе дополнительные емкости

основного и вспомогательного упругих элементов соединены друг с другом за счет штока, соединяющего их перегородки и проходящего через обе рабочие емкости основного и вспомогательного упругих элементов и через отверстие с уплотнением на торце 30 второго цилиндрического стакана, а в днище второго цилиндрического стакана выполнено отверстие, соединяющее его с атмосферой. С амортизируемым объектом может быть связан либо первый цилиндрический стакан, либо второй цилиндрический стакан.

Сущность изобретения поясняется чертежами, где (на рисунке 1.4) представлена конструктивная схема пневматического упругого элемента; на рисунке 1.5 представлена его упругодемпфирующая характеристика. Пневматический упругий элемент содержит основной упругий элемент 1, состоящий из резинокордной оболочки 2, рабочей 3 и дополнительной 4 емкости, расположенной между ними перегородки 5 с калиброванным отверстием 6 и с отверстиями 7, перекрываемыми свободно лежащей диафрагмой 8 при ходе отдачи, образующими обратный клапан 9, и вспомогательный упругий элемент 10, состоящий из вспомогательной резинокордной оболочки 11, вспомогательной рабочей 12 и дополнительной 13 емкости и расположенной между ними вспомогательной перегородки 14 с калиброванным отверстием 15 и с отверстиями 16, перекрываемыми свободно лежащей диафрагмой 17 при ходе сжатия, образующими обратный клапан 18.

Основной упругий элемент 1 заключен в первый цилиндрический стакан 19 с отверстием 20 на нижнем торце 21 стакана. Вспомогательный упругий элемент 10 помещен во второй цилиндрический стакан 22. На краях первого цилиндрического стакана 19 установлены центрирующие ролики 23, соприкасающиеся с внешней поверхностью второго цилиндрического стакана 22. Вспомогательная дополнительная емкость 13 выполнена в виде третьего цилиндрического стакана 24, имеющего по

нижним краям центрирующие ролики 25, соприкасающиеся с внутренней поверхностью второго цилиндрического стакана 22.

К верхнему торцу 26 второго цилиндрического стакана 22, имеющего центральное отверстие 27 с уплотнением, примыкают обе рабочие емкости 3 и 12 основного 1 и вспомогательного 10 упругих элементов. Обе дополнительные емкости 4 и 13 основного 1 и вспомогательного 10 упругих элементов соединены друг с другом за счет штока 28, соединяющего жестко их перегородки 5 и 14 и проходящего через обе рабочие емкости 3 и 12 основного 1 и вспомогательного 10 упругих элементов и через отверстие 27 с уплотнением на верхнем торце 26 второго цилиндрического стакана 22. В днище второго цилиндрического стакана 22 выполнено отверстие 29, соединяющее его с атмосферой.

Пневматический упругий элемент может быть связан с амортизируемым объектом либо с помощью проушины 30 первого цилиндрического стакана 19, либо с помощью проушины 31 второго цилиндрического стакана 22.

Пневматический упругий элемент работает следующим образом.

При перемещении амортизируемого объекта вниз в процессе его колебательного движения осуществляется ход сжатия для основного упругого элемента 1, давление в его емкостях 3 и 4 изменяется одинаково в силу подбора величины отверстий 7. Одновременно происходит ход отбоя для вспомогательного упругого элемента 10, его диафрагма 17 под действием разности давлений в емкостях 12 и 13 прилегает к перегородке 14, перекрывая отверстия 16. Вспомогательный упругий элемент 10 работает лишь с объемом полости 12, в которую поступает воздух из полости 13 через калиброванное отверстие 15.

При перемещении амортизируемого объекта вверх в процессе его колебательного движения осуществляется ход отбоя для основного упругого элемента 1, его диафрагма 8 под действием разности давлений в емкостях 3 и 4 прилегает к перегородке 5, перекрывая отверстия 7.

Основной упругий элемент 1 работает лишь с емкостью 3, в которую поступает воздух из емкости 4 через калиброванное отверстие 6. Одновременно происходит ход сжатия для вспомогательного упругого элемента 10, в начале хода сжатия в определенный момент времени, зависящий от величины калиброванного отверстия 15, давление между емкостями 12 и 13 выравнивается, диафрагма 17 открывает отверстия 16, давление в его емкостях 12 и 13 изменяется одинаково в силу подбора величины отверстий 16.

При следующем перемещении вниз амортизируемого объекта в начале хода сжатия в основном упругом элементе 1 в определенный момент времени, зависящий от величины калиброванного отверстия 6, давление между емкостями 3 и 4 выравнивается, диафрагма 8 открывает отверстия 7, и основной упругий элемент 1 вновь работает с емкостями 3 и 4 одновременно, а для вспомогательного упругого элемента 10 происходит ход отбоя и он работает лишь с емкостью 12.

Формирование рабочей характеристики пневматического упругого элемента показано (на рисунке 1.5), направления сжатие и отбой указаны для основного упругого элемента 1. Штриховыми линиями "а-б-в" изображена рабочая характеристика основного упругого элемента 1, а штриховыми линиями "г-д-е" - рабочая характеристика вспомогательного упругого элемента 10. Рабочая характеристика пневматического упругого элемента изображена замкнутой кривой "ж-з-и-к-ж" и представляет собой кривую изменения суммарного усилия, развиваемого основным 1 и вспомогательным 10 упругими элементами. Общая величина поглощенной энергии в пневматическом упругом элементе за период колебаний амортизированного объекта равна сумме поглощенных энергий в основном 1 и вспомогательном 10 упругих элементах. Кривая "л-м-н" изображает рабочую характеристику пневматического упругого элемента без демпфирующих устройств в упругих элементах. Отрезок "ОМ" в масштабе соответствует весу Q амортизированного объекта.

Формула изобретения

1. Пневматический упругий элемент, содержащий основной упругий элемент, состоящий из резинокордной оболочки, рабочей и дополнительной емкости и расположенной между ними перегородки с калиброванным отверстием и с отверстиями, перекрываемыми свободно лежащей диафрагмой при ходе отдачи, вспомогательный упругий элемент, состоящий из вспомогательной резинокордной оболочки, вспомогательной рабочей и дополнительной емкости и расположенной между ними вспомогательной перегородки с калиброванным отверстием и с отверстиями, перекрываемыми свободно лежащей диафрагмой при ходе сжатия, причем основной упругий элемент заключен в первый цилиндрический стакан, имеющий отверстие на торце стакана, вспомогательный упругий элемент заключен также во второй цилиндрический стакан, соосный первому цилиндрическому стакану, а дополнительные емкости обоих упругих элементов жестко соединены друг с другом, отличающийся тем, что перегородка основного упругого элемента соединена с первым цилиндрическим стаканом, второй цилиндрический стакан установлен внутри первого цилиндрического стакана в его отверстии на торце, на краях первого цилиндрического стакана установлены центрирующие ролики, соприкасающиеся с внешней поверхностью второго цилиндрического стакана, к верхнему торцу второго цилиндрического стакана, имеющего центральное отверстие с уплотнением, примыкают рабочие емкости основного и вспомогательного упругих элементов, вспомогательная дополнительная емкость выполнена в виде третьего цилиндрического стакана, имеющего по нижним краям центрирующие ролики, соприкасающиеся с внутренней поверхностью второго цилиндрического стакана, обе дополнительные емкости основного и вспомогательного упругих элементов соединены друг с другом за счет штока, соединяющего их перегородки и проходящего через обе рабочие емкости основного и вспомогательного упругих элементов и через

отверстие с уплотнением на торце второго цилиндрического стакана, а в днище второго цилиндрического стакана выполнено отверстие, соединяющее его с атмосферой.

2. Пневматический упругий элемент по п.1, отличающийся тем, что с амортизируемым объектом может быть связан либо первый цилиндрический стакан, либо второй цилиндрический стакан.

1.2.2. Рессора малого сопротивления.

Существует рессора малого сопротивления по патенту России № RU 2 409 481 С1, опубликован 20.01.2011 г., Бюл. № 2 [4]. Изобретение относится к подвеске транспортных средств.

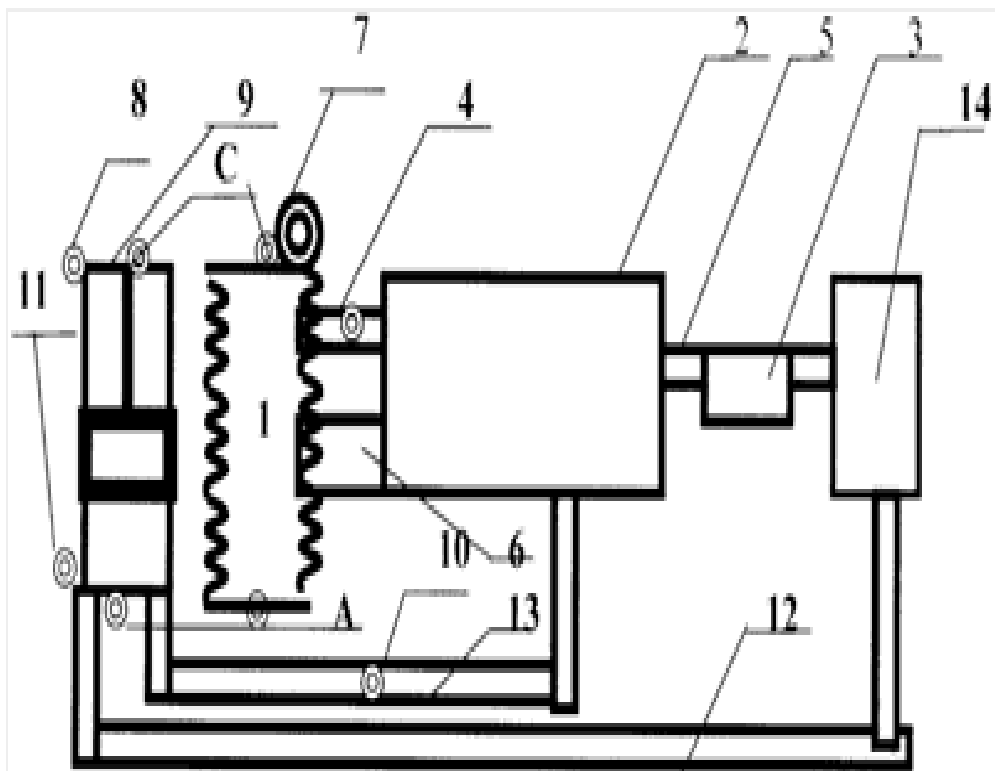


Рисунок 1.6. Рессора малого сопротивления по патенту России № RU 2 409 481 С1, разрез

Рессора содержит пневморессору (1), разгрузочную емкость (2), компрессор (3), датчик (4) разницы давления между разгрузочной емкостью (2) и пневморессорой (1), разгрузочный клапан (7), датчик (8) положения точки (С) соединения рессоры с приемником колебаний по отношению к точке (А) соединения рессоры с источником колебаний, пневмонасос (9) с выпускным клапаном (10) и впускным клапаном (11). Трубка (5) соединяет компрессор (3) и разгрузочную емкость (2). Трубка (6) соединяет пневморессору (1) и разгрузочную емкость (2). Трубка (12) соединяет впускной клапан (11) и приемную емкость (14). Трубка (13) соединяет разгрузочный клапан (7) и приемную емкость (14). Пневморессора (1) посредством трубок (5) и (6) дополнительно соединена с разгрузочной емкостью (2) и компрессором (3). Датчик (4) разницы давления соединен с пневморессорой (1), разгрузочной емкостью (2) и разгрузочным клапаном (7). Датчик (8) положения соединен с компрессором (3) и разгрузочным клапаном (7). Достигается ликвидация колебаний кузова транспортного средства. 1 ил.

Изобретение относится к механике и может применяться в средствах передвижения в целях передачи нагрузки кузова на подвеску и ликвидации условий возникновения колебаний кузова во время преодоления вертикальных неровностей дороги.

Известна пружинная рессора, применяемая для передачи нагрузки кузова на подвеску транспортного средства, а также для смягчения ударов и толчков, передаваемых подвеской кузову во время преодоления транспортным средством вертикальных неровностей дороги, и состоящая из упругого элемента, один конец которой связан с источником колебаний (подвеской), а другой - с приемником колебаний (кузовом).

Недостатками пружинной рессоры является то, что она при движении подвески вверх передает это движение кузову и тем самым включает в образование возникновения энергии импульса массу кузова, что составляет основную часть массы всего транспортного средства, а масса в

данном случае прямо пропорциональна производной энергии импульса. Также пружинная рессора имеет узкий рабочий диапазон передаваемой нагрузки при смягчении ударов и толчков. Так, при малых нагрузках пружина поднимает кузов выше нормального положения и при колебаниях подвески не сжимается, а поэтому не смягчает удары и толчки, при больших нагрузках пружина опускает кузов ниже нормального положения, полностью сжимаясь, и также не смягчает удары и толчки.

Техническим результатом заявленной рессоры малого сопротивления является ликвидация условий возникновения колебания кузова во время преодоления транспортным средством вертикальных неровностей дороги.

Заявителю аналоги такого устройства неизвестны.

Указанный технический результат достигается тем, что устройство - рессора малого сопротивления (рисунок 1.6), содержащая пневморессору 1, разгрузочную емкость 2, компрессор 3, датчик 4 разницы давления между разгрузочной емкостью 2 и пневморессорой 1, трубку 5, соединяющую компрессор 3 и разгрузочную емкость 2, трубку 6, соединяющую пневморессору 1 и разгрузочную емкость 2, трубку 6, соединяющую пневморессору 1 и разгрузочную емкость 2, разгрузочный клапан 7, датчик 8 положения точки С соединения рессоры с приемником колебаний по отношению к точке А соединения рессоры с источником колебаний, пневмонасос 9 с выпускным клапаном 10 и впускным клапаном 11, трубку 12, соединяющую впускной клапан 11 и приемную емкость 14, трубку 13, соединяющую разгрузочный клапан 7 и приемную емкость 14, при этом пневморессора 1 посредством трубок 5 и 6 дополнительно соединена с разгрузочной емкостью 2 и компрессором 3, датчик 4 разности давления соединен с пневморессорой 1, разгрузочной емкостью 2 и разгрузочным клапаном 7, а датчик 8 положения соединен с компрессором 3 и разгрузочным клапаном 7.

При изменении веса транспортного средства датчик положения 8, если точка С находится ниже нормального положения, включает компрессор 3,

который нагнетает воздух через соединительную трубку 5 в разгрузочную емкость 2, откуда через соединительную трубку 6, воздух попадает в пневморессору 1, где увеличивающееся давление воздуха поднимает точку С.

При нахождении точки С в нормальном положении датчик 8 держит компрессор выключенным. Давление в пневморессоре 1 и разгрузочной емкости становится одинаковым и нормальным. Если точка С находится выше нормального положения, датчик 8 открывает разгрузочный клапан 7, давление в пневморессоре 1 и разгрузочной емкости 2 уменьшается и точка С опускается.

При нахождении точки С в нормальном положении датчик 8 держит клапан 7 закрытым. Датчик положения 8 обладает достаточной инерционностью, при рабочей частоте и равновеликой амплитуде колебания - в пределах нормального положения точки С, датчик 8 не срабатывает.

При незначительных колебаниях точки А, удовлетворяющих заданным требованиям, при движении точки А вверх давление в пневморессоре 1 незначительно возрастает и избыточный воздух через соединительную трубку 5 отводится в разгрузочную емкость 2, а при движении точки А вниз воздух снова попадает в рессору 1. Разгрузочная емкость имеет достаточный объем, чтобы при этом давление точки С на приемник осталось практически неизменным. В связи с тем, что воздух через соединительную трубку 5 беспрепятственно попадает в разгрузочную емкость, датчик разницы давления 4 между емкостью 2 и пневморессорой 1 при этих колебаниях на открытие клапанов 7 и 10 не срабатывает. Во всех случаях этих колебаний клапаны 10 и 11 открыты.

Как только амплитуда колебаний точки А заходит за пределы незначительных колебаний, датчик разницы давления 4 при избыточном давлении в пневморессоре 1 обязательно во время движения точки А вверх открывает разгрузочный клапан 7 и клапан 11 до установления

нормального давления в пневморессоре 1, одновременно с этим через открытый клапан 11 через трубку 12 такое же количество воздуха с приемной емкости 14 попадает в пневмонасос 9. После этого, когда точка А начинает двигаться вниз, под избыточным давлением, воздух с разгрузочной емкости 2 через соединительную трубку 5 попадает в пневморессору 1, компенсируя потерю воздуха через разгрузочный клапан 7, одновременно через открытый клапан 10 через трубку 13 в разгрузочную емкость 2 попадает количество воздуха, равное вышедшему через клапан 7. Таким образом, при наезде колеса на возвышенность подвеска транспортного средства получает энергию импульса, производной массы которой является только масса подвески. Кроме того, образовавшаяся при этом энергия не передается приемнику, а передается пневморессоре на полезную работу. Резонансное колебание транспортного средства предотвращают путем открытия или закрытия клапанов 10 и 11.

Рессора малого сопротивления, содержащая пневморессору, разгрузочную емкость, компрессор, датчик разницы давления между разгрузочной емкостью и пневморессорой, трубку, соединяющую компрессор и разгрузочную емкость, трубку, соединяющую пневморессору и разгрузочную емкость, разгрузочный клапан, датчик положения точки соединения рессоры с приемником колебаний по отношению к точке соединения рессоры с источником колебаний, пневмонасос с выпускным и впускным клапанами, трубку, соединяющую впускной клапан и приемную емкость, трубку, соединяющую разгрузочный клапан и приемную емкость, при этом пневморессора посредством трубок дополнительно соединена с разгрузочной емкостью и компрессором, датчик разницы давления соединен с пневморессорой, разгрузочной емкостью и разгрузочным клапаном, а датчик положения соединен с компрессором и разгрузочным клапаном.

1.3. Постановка задач исследований

В данной работе исследованы конструкции пневморессор железнодорожных транспортных средств, применяющихся в наше время на электровозах и методов расчета их деталей и узлов [2]. Проведён анализ методов расчета на динамическую прочность пневморессор электровозов. Основываясь на данный анализ нами были поставлены следующие задачи исследований:

1. Разработка новой модернизированной конструкции, направленной на повышение надёжности и улучшение характеристик, а так же работоспособности пневморессор электровозов.

2. Теоретическое обоснование технических решений, принятых в ходе разработки модернизированной конструкции. Составление расчётных схем, решение уравнений, определяющих эффективность новой модели.

3. Составление алгоритма и блок-схемы для программирования в среде MATHCAD 13, проведение численных исследований, построение графиков и таблиц, анализ результатов численных исследований.

4. Выводы по результатам исследований и разработка рекомендаций по дальнейшему совершенствованию пневморессор электровозов.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПНЕВМОРЕССОРЫ В ВИДЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ДАВЛЕНИЯ.

2.1 Обоснование допущений и составление систем дифференциальных уравнений для колебаний пневморессоры в виде пространственной системы с учетом влияния пульсирующего давления

Анализ исследований по расчету пневматических рессор транспортных средств с резинокордным армированием показал, что почти во всех конструкциях рессорного подвешивания современных электровозов, вагонов метрополитена, трамваев и троллейбусов применяются пневматические рессорные элементы различного типа (например, во Франции, Германии, Швейцарии и Японии). Особенно широко они применяются при строительстве и эксплуатации новейших монорельсовых дорог, строительство которых планируется осуществить в городе Ташкенте в ближайшем будущем (в настоящее время монорельсовый электрический транспорт – Electrical Mono-rail Type- надежно функционирует в Швейцарии, Японии и Австрии).

Пневматические резинокордные упругие элементы послужили основой для создания новых типов регулируемых подвесок с автоматически управляемыми параметрами. Использование в качестве упругого тела воздуха позволяет в небольшом объеме реализовать большую гибкость, вплоть до предельной, соответствующей нижней границе собственных частот колебаний кузова транспортного средства.

Основным узлом пневматического упругого элемента является резинокордная оболочка, состоящая из двух - четырех слоев вязкоупругой, нейлоновой или капроновой ткани, армированной снаружи стальными ребрами жесткости. Снаружи и изнутри оболочка покрывается слоями

маслобензостойкой резины. Внутреннее давление воздуха прижимает отбортовки упругой оболочки к стальной арматуре.

Основными исходными параметрами при расчете пневматических упругих элементов являются:

1) Эквивалентный статический прогиб подвешивания $f_{ст}$, т.е. прогиб, который должен был бы иметь нерегулируемый упругий элемент, чтобы обеспечить заданную частоту собственных колебаний надрессорного строения транспортного средства.

2) Максимальная статическая нагрузка на элемент $P_{ст}$.

3) Номинальное расчетное (избыточное) давление, обеспечиваемое источником питания $P_{ор}$ и, определяемое выражением:

$$P_{ор} = P_{вк} - \Delta P - P_3, \quad (2.1)$$

где $P_{вк}$ – давление автоматического включения компрессора;

ΔP - добавка давления при самом неблагоприятном сочетании нагрузок на элемент (обычно ΔP не превышает $0.2 P_{ор}$);

P_3 – запас давления на преодоление сопротивлений перепуску сжатого воздуха из резервуара в упругий элемент (принимают $P_3 = 1$).

Нами в данной диссертации предлагается новая конструкция пневморессоры для транспортного средства с улучшенной характеристикой динамического демпфирования и обеспечением автоматического регулирования амплитудно-частотными характеристиками. Сущность предлагаемого нами изобретения состоит в разделении оболочки на радиальные сектора (не менее 6-ти) и автоматическом регулировании подачи давления воздуха в каждый из секторов отдельно. Для данной конструкции пневматического упругого элемента предлагается новый метод квазистатического расчета упругой резинокордной оболочки, зажатой стальными ребрами жесткости, при гармоническом внешнем воздействии, возникающем при движении транспортного средства.

На основании проведенного обзора научно-технической и патентной литературы нами разработана численно-аналитическая модель для квазистатического расчета элемента упругой оболочки пневморессоры, зажатой ребрами жесткости, которая является логическим продолжением моделей и методик расчета, представленных в работах [15,16,25].

Для обоснования расчетной модели вводим ряд допущений, возможных для проведения инженерного расчета:

1) Почти все виды пневморессор имеют «жесткую» оболочку в виде металлического каркаса различного типа. В связи с этим будем считать, что замкнутые выпуклые резинокордные поверхности в металлическом каркасе, образующиеся в результате выдавливания элементов упругой оболочки, не допускают местных деформаций складчатости в отдельных районах, например, криволинейных оконечностях.

2) Металлический каркас в виде ребер жесткости будем считать абсолютно жестким.

3) Резинокордную оболочку считаем растяжимой. Элементы ее зажаты между ребрами жесткости металлического каркаса [15,16,25]. Представим расчетную схему в виде 2-х элементов упругой оболочки, зажатой между двумя ребрами жесткости и элементом металлического каркаса в стыке отсеков i и $(i+1)$. При этом каждый из элементов упругой оболочки 1, 3 имеет свой начальный радиус изгиба R_{01} и R_{03} . Элемент металлического каркаса 2 также имеет начальный радиус изгиба R_{02} , получаемый под действием начального внутреннего давления воздуха в системе $P_{0в}$. Элементы упругой оболочки 1 и 3 имеют соответственно массы m_1 и m_3 , а элемент металлического каркаса, зажатый между ними - m_2 . Вся система изгибается в начальный момент под действием начального внутреннего давления воздуха $P_{0в}$. Далее исследуем процесс колебаний в системе под действием боковой качки, возникающей при движении транспортного средства.

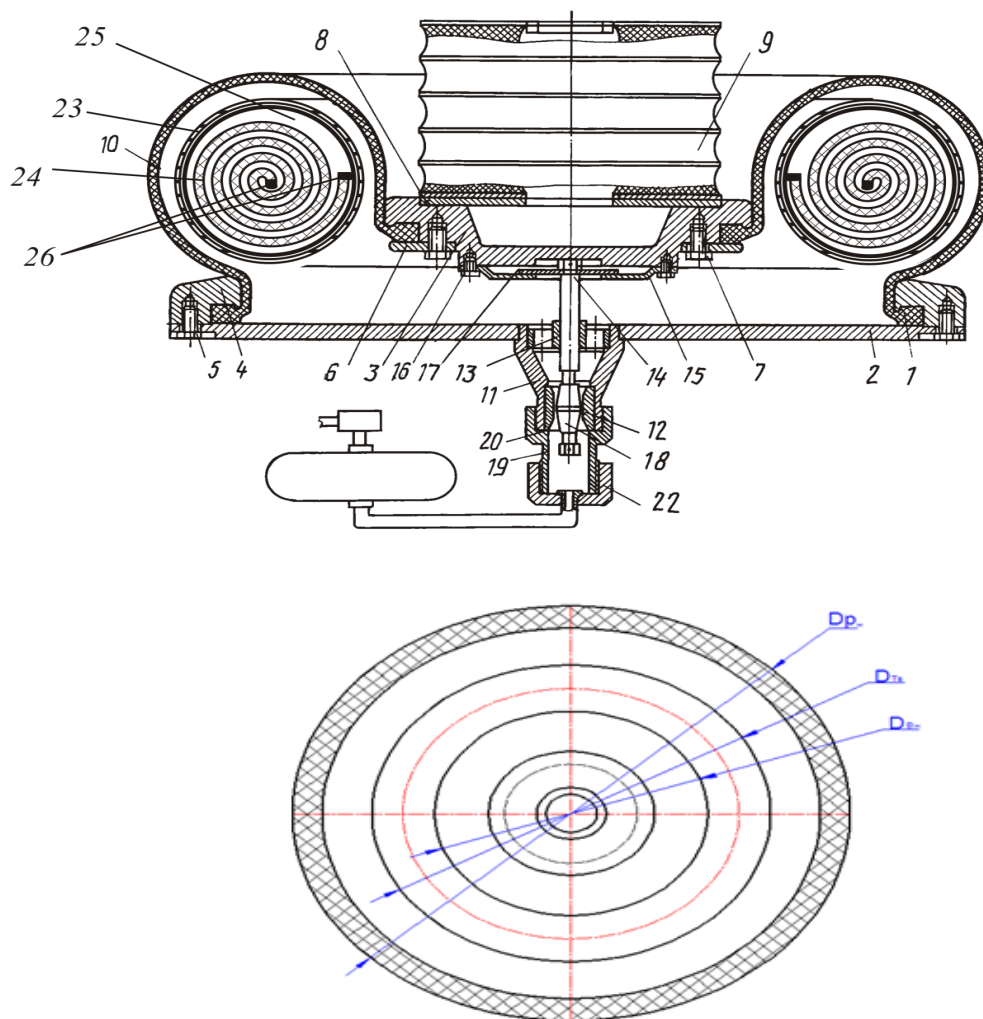


Рисунок 2.1. (а,б) – Перспективная конструкция пневморессоры, предлагаемая нами в виде изобретения

4) Вся система совершает перемещение в плоскости за счет совместных колебаний пневморессоры и, например, электровоза при его движении по рельсовому пути с периодическими стыковыми неровностями. Первый упругий элемент оболочки 1 с одной стороны жестко заделан, а другой его конец имеет возможность плоского перемещения X_1 и вертикального Z_1 причем он имеет начальный радиус изгиба R_{01} , обусловленный наличием ребра жесткости АВ (рисунок 2.1).

Координаты центра тяжести Ц1 можно записать в виде:

$$\tilde{O}_1 = r_{\tilde{O}_1} \cdot \sin \varphi_1; \quad Z_1 = r_1 - r_{\tilde{O}_1} \cdot \cos \varphi_1, \quad (2.2)$$

где $r_{\tilde{O}_1}$, r_1 - радиусные расстояния от точки А и от точки Ц1,

φ_1 – угол поворота центра тяжести Ц1 относительно оси OZ (рисунок 2.1).

При жестком закреплении каждого последующего i -го элемента упругой оболочки его можно рассчитать в зависимости от условия расположения металлических решеток на каркасе.

5) Элемент металлического каркаса 2 рассматривается как абсолютно жесткое тело, центр тяжести которого Ц2 может совершать горизонтальные перемещения X_2 и вертикальные - Z_2 :

$$\tilde{O}_2 = 2 \cdot \dot{a}_1 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1) + r_1 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_2 + \varphi_2 - 90^0); \quad (2.3)$$

$$Z_2 = 2 \cdot \dot{a}_1 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1) + r_1 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_2 + \varphi_2 - 90^0); \quad (2.4)$$

6) Второй упругий элемент 3 мягкой оболочки пневматической рессоры имеет возможность перемещения - горизонтального - X_3 и вертикального - Z_3 :

$$\begin{aligned} \tilde{O}_3 = 2 \cdot \dot{a}_1 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1) + r_1 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 - 90^0) + \\ + r_{\dot{O}_3} \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \beta_4 - 90^0) \end{aligned}; \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} Z_3 = 2 \cdot \dot{a}_1 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1) + r_1 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 - 90^0) + \\ + r_{\dot{O}_3} \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \beta_4 - 90^0) \end{aligned}; \quad (2.6)$$

7) В точке O приложена динамическая сила, возникающая, например, при боковой качке на рельсовом транспортном средстве:

$$D_{AA}(t) = D_{AA} \cdot \cos(\omega_A t), \quad (2.7)$$

где $P_{дБА}$ - амплитуда силы динамического воздействия, возникающая при боковой качке; τ_B и ω_B - период и циклическая частота боковой качки. Характер внешней динамической нагрузки обусловлен видом динамического воздействия и типом транспортного средства.

Для получения значений динамических нагрузок и ускорений элементов упругой оболочки и металлического каркаса пневморессор локомотивов необходимо учитывать скоростные режимы их работы. По данным отчетов ВНИИТИ [3], распределение скоростей движения,

полученное путем статистической обработки результатов регистрации режимов работы тепловозов, оказалось следующим: локомотивы со скоростями $V = 0 \div 40$ км/ч работают 30 % от всего времени T в движении; с $V = 40 \div 70$ км/ч - 65 % от T ; с $V = 70 \div 100$ км/ч - 5 % от T . Следовательно, большую часть времени T тепловозы работают со скоростями $40 \div 70$ км/ч, и за расчетные режимы работы можно выбрать скорости движения тепловозов, входящие в этот диапазон. Таким образом, диапазон частот наиболее вероятных в условиях эксплуатации тепловозов, составляет $\omega_B = 110 \div 280$ рад/с. При численных расчетах проанализируем работу системы для 1 периода колебаний электровоза, при условии $0 \leq t \leq \tau_B$.

8) Важными при решении задачи также оказываются *граничные и начальные условия, а также условия граничной стыковки узлов и элементов* при численном решении задачи динамики на ЭВМ. В нашей расчетной модели начальная сила внутреннего давления в упругой емкости пневморессоры постоянна и равна P_0 . н.а.л. Однако, в процессе наклона транспортного средства при боковой качке при изменении угла наклона, $0 \leq Q \leq 10^0$, возможно изменение силы внутреннего давления по точкам оболочки. При этом P_Γ , P_D , P_K – переменные силы давления, действующие соответственно в точках Γ , D и K .

Виртуальные перемещения точек приложения внешних сил в точке Γ :

$$\tilde{O}_{\bar{A}} = 2 \cdot \dot{a}_1 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1) + r_1 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \varphi_2 - 90^0); \quad (2.8)$$

$$Z_{\bar{A}} = 2 \cdot \dot{a}_1 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1) + r_1 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \varphi_2 - 90^0); \quad (2.9)$$

в точке D :

$$\tilde{O}_{\bar{A}} = 2 \cdot \dot{a}_1 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1) + r_1 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 - 90^0) + r_3 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2); \quad (2.10)$$

$$Z_{\bar{A}} = 2 \cdot \dot{a}_1 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1) + r_1 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 - 90^0) + r_3 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2); \quad (2.11)$$

в точке К:

$$\begin{aligned} \tilde{O}_{\hat{E}} &= 2 \cdot \dot{a}_1 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1) + r_1 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 - 90^\circ) + \\ &+ 2 \cdot \dot{a}_3 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) + r_3 \cdot \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3); \quad (2.12) \\ Z_{\hat{E}} &= 2 \cdot \dot{a}_1 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1) + r_1 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 - 90^\circ) + \\ &+ 2 \cdot \dot{a}_3 \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) + r_3 \cdot \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3). \end{aligned}$$

Для учета движения системы введем две обобщенные координаты φ_2 и φ_3 при кинематически задаваемой φ_1 , где φ_2 и φ_3 - углы раздвижки (перемещения) упругих элементов оболочки 1 и 3 в результате упругого углового поворота под действием внутреннего давления (рисунок 2.1).

Используем обратную форму задания обобщенных координат. Для составления уравнений колебаний системы используем уравнение Лагранжа.

Запишем кинетическую энергию системы «элементы упругой оболочки - металлические ребра жесткости»:

$$T = \frac{1}{2} \cdot \left\{ m_1 \cdot (\dot{X}_1)^2 + I_1 \cdot (\dot{\varphi}_1)^2 + m_2 \cdot (\dot{X}_2)^2 + I_2 \cdot (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 + m_3 \cdot (\dot{X}_3)^2 + I_3 \cdot (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3)^2 \right\} \quad (2.13)$$

Запишем уравнение потенциальной энергии системы:

$$П = \frac{1}{2} \cdot \left\{ C_{П1} \cdot \varphi_2^2 + C_{П3} \cdot \varphi_3^2 \right\}. \quad (2.14)$$

Уравнение элементарной работы внешних сил на виртуальных перемещениях системы:

$$\begin{aligned} \delta \dot{A} &= D_{\hat{A}} \cdot \left[\sin(\varphi_1 + \beta_1 + \varphi_2 - 90^\circ) \delta \tilde{O}_{\hat{A}} + \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \varphi_2 - 90^\circ) \delta Z_{\hat{A}} \right] + \\ &+ D_{\hat{A}} \cdot \left[\sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) \delta \tilde{O}_{\hat{A}} + \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) \delta Z_{\hat{A}} \right] + \quad (2.15) \\ &+ D_{\hat{E}} \cdot \left[\sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) \delta \tilde{O}_{\hat{E}} + \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) \delta Z_{\hat{E}} \right]. \end{aligned}$$

Проводим вывод уравнений для двух обобщенных координат φ_2 и φ_3 при кинематически задаваемой φ_1 :

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} \right] - \frac{\partial T}{\partial \varphi_2} + \frac{\partial П}{\partial \varphi_2} = \frac{dA}{d\varphi_2}, \quad (2.16)$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_3} \right] - \frac{\partial T}{\partial \varphi_3} + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_3} = \frac{dA}{d\varphi_3}. \quad (2.17)$$

С учетом введенных допущений получаем дифференциальные уравнения движения системы (2-х элементов упругой оболочки мягкой емкости, зажатой между ребрами жесткости и элементом металлического каркаса в стыке отсеков i и $(i + 1)$), изгибающихся под действием внутреннего давления $P_{ид}(t)$:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} \right] = A_{11} \ddot{\varphi}_1 + A_{12} \ddot{\varphi}_2 + A_{13} \ddot{\varphi}_3 + A_{14} (\dot{\varphi}_1)^2 + \quad (2.18)$$

$$+ A_{15} \dot{\varphi}_1 \cdot \dot{\varphi}_2 + A_{16} (\dot{\varphi}_2)^2 + A_{17} \dot{\varphi}_3 \dot{\varphi}_1 + A_{18} \dot{\varphi}_1 + A_{19} \dot{\varphi}_2, \quad ,$$

где введены следующие обозначения:

$$A_{11} = a_{11} m_2 r_1 + a_{16} - m_3 a_{21} + a_{23} + a_{3.12};$$

$$A_{12} = a_{12} m_2 r_1 + a_{16} - m_3 a_{22} + a_{28} + a_{3.12};$$

$$A_{13} = a_{28} + a_{3.12}; \quad A_{14} = a_{13} m_2 r_1 - m_3 a_{23};$$

(2.19)

$$A_{15} = a_{14} m_2 r_1 - m_3 a_{24}; \quad A_{16} = a_{15} m_2 r_1 - m_3 a_{25};$$

$$A_{17} = a_{3.12}; A_{18} = -a_{26} m_3; A_{19} = -m_3 a_{27};$$

$$a_{11} = a_1 \cdot \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \varphi_2 + \beta_2) + a_1 \cdot \cos(\varphi_2 + \beta_2) - \frac{1}{2} r_1 + \frac{1}{2} r_1 \cdot \cos(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_2 + \varphi_2));$$

$$a_{12} = -\frac{1}{2} r_1 + \frac{1}{2} r_1 \cdot \cos(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_2 + \varphi_2)); \quad (2.20)$$

$$a_{13} = 2a_1 \cdot \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \varphi_2 + \beta_2) - r_1 \cdot \sin(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_2 + \varphi_2));$$

$$a_{14} = a_1 \cdot \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \varphi_2 + \beta_2) - a_1 \cdot \sin(\varphi_2 + \beta_2) - 2r_1 \cdot \sin(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_2 + \varphi_2));$$

$$a_{15} = -r_1 \cdot \sin(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_2 + \varphi_2)); a_{16} = I_2; \quad ;$$

(2.21)

$$a_{21} = a_1 \cdot r_1 \cdot \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \varphi_2 + \beta_3) + a_1 \cdot r_1 \cos(\varphi_2 + \beta_3) + 2 \cdot a_1 \cdot r_{ц3} \cdot \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \beta_4) + 2a_1 r_{ц3} \cos(\beta_3 + \varphi_2 + \beta_4) - \frac{1}{2} r_1^2 + \frac{1}{2} r_1^2 \cdot \cos(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_2 + \varphi_2)) - r_1 r_{ц3} \cos \beta_4 +$$

$$-r_{U3}^2 \frac{1}{2} + \frac{1}{2} r_{U3}^2 \cdot \cos(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_2 + \varphi_2)) \quad ;$$

(2.22)

$$a_{22} = -\frac{r_1^2}{2} + \frac{r_1^2}{2} \cdot \cos(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2)) - r_1 r_{U3} \cos \beta_4 +$$

$$+ r_{U3} \cdot r_1 \cdot \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\varphi_2 + 2\beta_3 + \beta_4) - \frac{r_{U3}^2}{2} +$$

$$+ r_{U3}^2 / 2 \cdot \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + 2\beta_4)$$

(2.23)

$$a_{23} = 2a_1 \cdot r_1 \cdot \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \varphi_2 + \beta_3) + 4a_1 \cdot r_{U3} \cdot \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \beta_4) -$$

$$- r_1^2 \sin(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2)) - 2r_1 r_{U3} \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \beta_4) -$$

$$- r_{U3}^2 \cdot \sin(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_2 + \varphi_2 + \beta_4)) \quad ; \quad (2.24)$$

$$a_{24} = a_1 \cdot r_1 \cdot \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \varphi_2 + \beta_3) - a_1 \cdot r_1 \cdot \sin(\beta_3 + \varphi_2) +$$

$$+ 2a_1 r_{U3} \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \beta_4) - 2a_1 r_{U3} \sin(\beta_3 + \varphi_2 + \beta_4) -$$

$$- 2r_1^2 \sin(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2)) - 4r_1 r_{U3} \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \beta_4) -$$

$$- 2r_{U3}^2 \cdot \sin(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_2 + \varphi_2 + \beta_4)) \quad ;$$

(2.25)

$$a_{25} = -r_1^2 \cdot \sin(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2)) +$$

$$+ 2r_1 r_{U3} \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \beta_4) - 2r_{U3}^2 \cdot \sin(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \beta_4));$$

$$a_{26} = a_{27} = r_1 r_{U3} \sin \beta_4; \quad a_{28} = I_3; \quad (2.26)$$

$$a_{31} = a_1 r_1 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) + a_1 r_1 \cos(\beta_3 + \varphi_2) -$$

$$- \frac{r_1^2}{2} + \frac{r_1^2}{2} \cdot \cos(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2)) + a_3 r_1 \sin(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2)) -$$

$$- r_3 \cdot r_1 \cdot \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\varphi_2 + 2\beta_3 + \varphi_3) - r_1 \cdot r_3 \cdot \cos \varphi_3 - 2a_1 a_3 \cos(\beta_3 + \varphi_2) -$$

$$- 2a_1 a_3 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) + a_3 r_1 \sin(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2)) -$$

$$- 2a_3^2 - 2a_3^2 \cos(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2)) + \frac{1}{2} r_3 a_1 \cos \varphi_3 +$$

$$+ \frac{1}{2} r_3 a_1 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) +$$

$$\begin{aligned}
& + a_1 r_3 \cos(\beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) - a_1 r_3 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) - \\
& - \frac{r_1 r_3}{2} \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) + r_1 r_3 / 2 \cos \varphi_3 + a_3 r_3 \cos \varphi_3 + \\
& + a_3 r_3 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) - \frac{1}{2} r_3^2 - \quad ; \\
& - \frac{r_3^2}{2} \cdot \cos(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3))
\end{aligned}$$

(2.27)

$$\begin{aligned}
a_{32} = & \frac{1}{2} r_1^2 + \frac{1}{2} r_1^2 \cos(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2)) + a_3 r_1 \sin(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2)) - \\
& - r_3 \cdot r_1 \cdot \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\varphi_2 + 2\beta_3 + \varphi_3) - r_1 \cdot r_3 \cdot \cos \varphi_3 + \\
& + a_3 r_1 \sin(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2)) - 2a_3^2 - 2a_3^2 \cos(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2)) + \\
& + \frac{1}{2} r_3 a_1 \cos \varphi_3 + \frac{1}{2} r_3 a_1 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) -
\end{aligned}$$

(2.28)

$$\begin{aligned}
& - \frac{r_1}{2} r_3 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) + - \frac{r_1 r_3}{2} \cos \varphi_3 + a_3 r_3 \cos \varphi_3 + \\
& + a_3 r_3 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) - \frac{r_3^2}{2} - \frac{r_3^2}{2} \cdot \cos(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3)) \quad ;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_{33} = & 2a_1 r_1 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) - r_1^2 \sin(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2)) + \\
& + 2a_3 r_1 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2) - 2r_1 r_3 \cos(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) + \varphi_3) + \\
& + 4a_3 a_1 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) + 2r_1 a_3 \cos(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2)) + \\
& + 4a_3^2 \sin(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2)) - 2r_3 a_1 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) - \\
& - 2a_1 r_3 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) - r_1 r_3 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) + \\
& + r_3^2 \sin(2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3));
\end{aligned}$$

(2.29)

$$\begin{aligned}
a_{34} = & a_1 r_1 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) - a_1 r_1 \sin(\beta_3 + \varphi_3) - \\
& - 2r_1^2 \times \sin 2(2\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) - 4a_3 r_1 \cos 2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) - \\
& - 4r_3 r_1 \cos(2\varphi_2 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) + 2a_1 a_3 \sin(\beta_3 + \varphi_3) + \\
& + 2a_1 a_3 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) + 4a_3 r_1 \cos 2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) + \\
& + 8a_3^2 \sin 2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) - 2r_3 a_1 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) - \\
& - a_1 r_3 \sin(\beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) - a_1 r_3 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) - \\
& - \frac{3}{2} r_1 r_3 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) - 4a_3 r_3 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3); \quad (2.30)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_{35} = & -r_1^2 \sin 2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) - 2a_3 r_1 \cos 2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) - \\
& - 2r_3 r_1 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_2 + 2\varphi_2 + \varphi_3) + 2a_3 r_1 \cos 2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) + \\
& + 4a_3^2 \sin 2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) - r_3 a_1 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) - \\
& - \frac{r_1}{2} r_3 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) - 2a_3 r_3 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3);
\end{aligned} \tag{2.31}$$

$$\begin{aligned}
a_{36} = & -r_3 r_1 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) - r_1 r_3 \cos \varphi_3 - \\
& r_3^2 / 2 - r_3^3 / 2 \cos 2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) \\
a_{37} = & -3r_3 r_1 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) - \frac{3}{2} r_3 a_1 \times \\
& \times \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) - a_1 r_3 \sin(\beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) - \\
& - a_1 r_3 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) - \frac{r_1 r_3}{2} \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) - \\
& - a_3 r_3 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3);
\end{aligned} \tag{2.32}$$

$$\begin{aligned}
a_{38} = & -3r_3 r_1 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) - \frac{3}{2} r_3 a_1 \times \\
& \times \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) - \frac{r_1 r_3}{2} \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) - \\
& - a_3 r_3 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3); \\
a_{39} = & -r_3 r_1 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) + \frac{1}{2} r_3 a_1 \cos(\varphi_3) + \\
& + \frac{1}{2} r_3 a_1 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) - \frac{1}{2} r_3 a_1 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3); \\
a_{310} = & r_3 r_1 \sin(\varphi_3) - \frac{1}{2} r_3 a_1 \sin(\varphi_3) \\
& - \frac{r_3 r_2}{2} \sin(\varphi_3) - a_3 r_3 \sin(\varphi_3) = K_1 \sin \varphi_3 \quad ;
\end{aligned}$$

ГДЕ:

$$\begin{aligned}
K_1 = & r_3 r_1 - \frac{1}{2} r_3 a_1 - \frac{r_3 r_2}{2} - a_3 r_3; \\
a_{311} = & r_3 r_1 \sin(\varphi_3) - \frac{1}{2} r_3 a_1 \sin(\varphi_3);
\end{aligned}$$

$$\frac{dT}{d\varphi_2} = B_{11} (\dot{\varphi}_1)^2 \dot{\varphi}_2 + B_{12} (\dot{\varphi}_2)^2 \dot{\varphi}_1 + B_{13} (\dot{\varphi}_2)^3,$$

ГДЕ $B_{11} = b_{11} + b_{21}$; $B_{12} = b_{12} + b_{22}$; $B_{13} = b_{13} + b_{23}$.

$$\begin{aligned}
b_{11} = & -2r_1 m_2 a_1 \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) \times \cos(\varphi_1 + \beta_1) + \\
& + m_2 r_1^2 \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_2 + \varphi_2) \times \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_2 + \varphi_2);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b_{12} = & -2r_1 m_2 a_1 \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) \times \cos(\varphi_1 + \beta_1) + \\
& + 2m_2 r_1^2 \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) \times \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2);
\end{aligned}$$

$$b_{13} = m_2 r_1^2 \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) \times \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2);$$

$$\begin{aligned} b_{21} = & -r_1 m_3 \times 2a_3 \cos(\varphi_1 + \beta_1) \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) - \\ & - 2m_3 a_1 \cos(\varphi_1 + \beta_1) \times r_{u3} \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \beta_4) + \\ & + m_3 r_1^2 \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) + \\ & + r_1 r_{u3} m_3 \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \beta_4) \times \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) + \\ & + m_3 r_1 r_{u3} \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \beta_4) \times \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) - \\ & - m_3 r_{u3}^2 \sin^2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \beta_4); \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} b_{22} = & -2m_3 a_1 \cos(\varphi_1 + \beta_1) \times \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) - \\ & - 2m_3 a_1 r_{u3} \times \cos(\varphi_1 + \beta_1) \times \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \beta_4) + \\ & + 2m_3 r_1^2 \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) \times \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) + \\ & + 2m_3 r_1 r_{u3} \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \beta_4) \times \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) + \\ & + 2m_3 r_1 r_{u3} \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \beta_4) \times \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) + \\ & + 2r_{u3}^2 m_3 \sin^2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \beta_4); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{23} = & m_3 r_1^2 \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) \times \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) + \\ & + m_3 r_1 r_{u3} \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \beta_4) \times \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) + \\ & + m_3 r_1 r_{u3} \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \beta_4) \times \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) + \\ & + m_3 r_{u3}^2 \sin^2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \beta_4); \end{aligned}$$

$$\frac{d\Pi}{d\varphi_2} = C_{\Pi 1} \varphi_2, \quad (2.34)$$

$$\frac{d\Pi}{d\varphi_3} = C_{\Pi 3} \varphi_3, \quad (2.35)$$

С введенными допущениями:

$$\frac{dA}{d\varphi_2} = -\frac{r_1}{2} P_{\text{жс}} - P_{\text{л}} r_1 \sin \varphi_3, \quad (2.36)$$

Для второго уравнения системы (2.31):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{d\dot{\varphi}_3} \right) = & D_{11} \ddot{\varphi}_1 + D_{12} \ddot{\varphi}_2 + D_{13} (\dot{\varphi}_1)^2 + D_{14} \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 + \\ & + D_{15} (\dot{\varphi}_2)^2 + D_{16} \ddot{\varphi}_3 + D_{17} \dot{\varphi}_3 \dot{\varphi}_1 + D_{18} \dot{\varphi}_2 \dot{\varphi}_3 + D_{19} (\dot{\varphi}_3)^2 + D_{111} \ddot{\varphi}_4, \end{aligned} \quad (2.37)$$

где:

$$\begin{aligned} D_{11} &= d_{11} + d_{110} + d_{111}; \\ D_{12} &= d_{12} + d_{110} + d_{111}; \\ D_{13} &= d_{13}; \quad D_{14} = d_{14}; \quad D_{15} = d_{15}; \\ D_{16} &= d_{16} + d_{110} + d_{111}; \quad D_{17} = d_{17}; \\ D_{18} &= d_{18}; \quad D_{19} = d_{19}; \quad D_{111} = d_{111}. \end{aligned}$$

$$d_{11} = [a_1 r_3 \cos(\beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) + a_1 r_3 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) - \\ - \frac{1}{2} r_1 r_3 \times \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) - 1/2 r_1 r_3 \cos(\varphi_3) + \\ + a_3 r_3 \cos(\varphi_3) + a_3 r_3 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) + \\ + r_3^2 / 2 (1 + \cos 2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3))] \times m_4;$$

$$d_{12} = [-\frac{1}{2} r_1 r_3 (\sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) - \cos(\varphi_3)) + \\ + a_3 r_3 (\cos(\varphi_3) + \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3)) + r_3^2 / 2 (1 + \\ + \cos 2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3))] \times m_4;$$

$$d_{13} = m_4 \times [2a_1 r_3 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) - \\ - r_1 r_3 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) - 2a_3 r_3 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) - \\ - r_3^2 \sin 2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3)];$$

$$d_{14} = m_4 \times [(-a_1 r_3 \sin(\beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) - a_1 r_3 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) - \\ - 2r_1 r_3 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) - 4a_3 r_3 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) - \\ - 2r_3^2 \sin 2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3)];$$

$$d_{15} = m_4 \times [-r_1 r_3 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) - \\ - 2a_3 r_3 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) - \\ - r_3^2 \sin 2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3)];$$

$$d_{16} = m_4 \times [r_3^2 / 2 (1 + \cos 2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3))];$$

$$d_{17} = m_4 \times [-a_1 r_3 \sin(\beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) - a_1 r_3 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) - \\ - \frac{1}{2} r_1 r_3 \times \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) - 1/2 r_1 r_3 \sin(\varphi_3) - \\ - a_3 r_3 \sin(\varphi_3) - a_3 r_3 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) - \\ - 2r_3^2 \sin 2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3)];$$

$$d_{18} = m_4 \times [-\frac{1}{2} r_1 r_3 \cos(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) + \\ - \frac{1}{2} r_1 r_3 \times \sin \varphi_3 - a_3 r_3 \sin \varphi_3 - a_3 r_3 \sin(2\varphi_1 + 2\beta_1 + 2\beta_3 + 2\varphi_2 + \varphi_3) - \\ - 2r_3^2 \sin 2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3)];$$

$$d_{19} = m_4 \times [-r_3^2 \sin 2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3)];$$

$$d_{20} = J_3; \quad d_{21} = J_4;$$

$$\frac{dT}{d\varphi_3} = E_{11} (\dot{\varphi}_2)^2 \dot{\varphi}_3 + E_{12} (\dot{\varphi}_2)^2 \dot{\varphi}_3 + (\dot{\varphi}_3)^2 E_{13}, \quad (2.38)$$

$$E_{11} = m_4 / 2 \times r_1 r_3 \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) -$$

$$-m_4 a_3 r_3 \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) - \\ - (r_3)^2 m_4 / 4 \sin 2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3);$$

$$E_{12} = m_4 / 2 \times r_1 r_3 \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) - \\ - m_4 a_3 r_3 \cos(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2) \sin(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3) - \\ - (r_3)^2 m_4 / 2 \sin 2(\varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2 + \varphi_3);$$

$$E_{13} = -\frac{(r_3)^2}{4} m_4 \sin 2(\varphi_1 + \varphi_3 + \beta_1 + \beta_3 + \varphi_2);$$

$$\frac{dA}{d\varphi_3} = 0. \quad (2.39)$$

Объединив (2.16) - (2.17), получим 1-е и 2-е уравнения системы; для второго уравнения системы необходимо собрать вместе (2.18) - (2.39). Общие уравнения колебаний системы с 2-мя упругими оболочками, зажатыми ребрами жесткости (для упругой вкладной емкости пневматической рессоры рельсового транспортного средства с металлическим каркасом) запишутся в виде:

$$A_{11} \ddot{\varphi}_1 + A_{12} \ddot{\varphi}_2 + A_{13} \ddot{\varphi}_3 + A_{14} (\dot{\varphi}_1)^2 + A_{15} \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 + \\ + A_{16} (\dot{\varphi}_2)^2 + A_{17} \ddot{\varphi}_4 + A_{18} \dot{\varphi}_3 \dot{\varphi}_1 + A_{19} \dot{\varphi}_2 \dot{\varphi}_3 + A_{110} (\dot{\varphi}_3)^2 + A_{111} \dot{\varphi}_1 + A_{112} \dot{\varphi}_2 + A_{113} \dot{\varphi}_3 + \\ B_{11} (\dot{\varphi}_1)^2 \dot{\varphi}_2 + B_{12} (\dot{\varphi}_2)^2 \dot{\varphi}_1 + B_{13} (\dot{\varphi}_2)^3 + C_{П1} \varphi_2 = \\ = -\frac{1}{2} r_1 P_{ж} - r_1 \sin \varphi_3 P_r, \quad (2.40)$$

$$D_{11} \ddot{\varphi}_1 + D_{12} \ddot{\varphi}_2 + D_{13} (\dot{\varphi}_1)^2 + D_{14} \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 + \\ + D_{15} (\dot{\varphi}_2)^2 + D_{16} \ddot{\varphi}_3 + D_{17} \dot{\varphi}_3 \dot{\varphi}_1 + D_{18} \dot{\varphi}_2 \dot{\varphi}_3 + D_{19} (\dot{\varphi}_3)^2 + D_{111} \ddot{\varphi}_4 + \\ + E_{11} (\dot{\varphi}_2)^2 \dot{\varphi}_3 + E_{12} (\dot{\varphi}_3)^2 \dot{\varphi}_2 + (\dot{\varphi}_3)^3 E_{13} + C_{П3} \varphi_3 = 0. \quad (2.41)$$

В результате инженерных упрощений и преобразований методом Лагранжа получаем упрощенные уравнения колебаний системы с 2-мя упругими оболочками, зажатыми ребрами жесткости (для упругой вкладной емкости пневморессоры с металлическим каркасом) в виде:

$$(\dot{A}_{11} + \dot{A}_{12} \tilde{n} \cos 2\varphi_2 + A_{13} \sin 2\varphi_2) \cdot \ddot{\varphi}_2 + \dot{A}_{14} \ddot{\varphi}_3 + \dot{A}_{15} \dot{\varphi}_2 + \dot{A}_{16} \varphi_2 = \frac{r_1}{2} P_{OB} \sigma(t - t_1), \quad (2.42)$$

$$\dot{A}_{21} \ddot{\varphi}_2 + \dot{A}_{22} \ddot{\varphi}_3 + \dot{A}_{23} \varphi_3 = \mathcal{D}_{\dot{A}\dot{A}\dot{\lambda}} \cdot \tilde{n} \dot{\lambda} \omega_A t, \quad (2.43)$$

где в системе (2.28)-(2.29) введены следующие обозначения:

φ_2 и φ_3 - обобщенные координаты – углы поворота упругих элементов 1 и 3 в результате упругого углового поворота под действием внутреннего давления φ_1 принимается в виде константы по конструктивным соображениям [19,20,35]);

$$A_{11} = -\frac{1}{2} r_1^2 m_2 + I_2 + I_3 + \frac{1}{2} r_1^2 m_3 + r_1 r_{u3} m_3 \cos \beta_4 - m_3 r_{u3}^2 / 2;$$

$$A_{12} = \frac{1}{2} r_1^2 m_2 \cdot \cos 2\alpha_1 - \frac{1}{2} r_1^2 m_3 \cdot \cos 2\alpha_2 - r_1 r_{\delta 3} m_3 \cos 2\alpha_3 + m_3 r_{\delta 3}^2 / 2 \cdot \cos 2\alpha_4;$$

$$A_{13} = -\frac{1}{2} r_1^2 m_2 \cdot \sin 2\alpha_1 + \frac{1}{2} r_1^2 m_3 \cdot \sin 2\alpha_2 + r_1 r_{\delta 3} m_3 \sin 2\alpha_3 - m_3 r_{\delta 3}^2 / 2 \cdot \sin 2\alpha_4;$$

$$A_{14} = A_{16} = I_3; \quad A_{15} = -m_3 r_1 r_{u3} \sin \beta_4;$$

$$A_{21} = A_{22}; \quad A_{16} = C_{п1}; \quad A_{23} = C_{п3};$$

$$\alpha_1 = \varphi_1 + \beta_1 + \beta_2; \quad \alpha_2 = \varphi_1 + \beta_1 + \beta_3;$$

$$\alpha_3 = \varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \beta_4 / 2; \quad \alpha_4 = \varphi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \beta_4.$$

Предлагаемая нами динамическая (квазистатическая) модель является абсолютно новой, так как она позволяет учесть вес элементов упругой резинокордной оболочки пневморессоры, вес металлического каркаса, касательные и нормальные составляющие внутреннего давления воздуха (раньше учитывались только нормальные силы), влияние гибкости (упругости) элементов оболочки, их относительное перемещение, кривизну (радиус изгиба), совместную работу элементов упругой оболочки и ребер жесткости металлического каркаса в динамике. Данный аналитико-численный метод (на базе метода граничных элементов и кусочно-линейной аппроксимации) позволит осуществить расчет, в частности, пневматических рессор различного типа и конфигурации, а также при изменении режима работы емкостей, например, при боковой качке, галлопировании и пространственных колебаниях транспортного средства.

Данный метод полностью компьютеризирован (для PENTIUM), поэтому его использование не вызывает сложности при вычислениях, программы расчета выполняются в течение 2-3 минут, при этом необходимо лишь задать требуемые параметры элементов упругой оболочки и металлического каркаса для различных типов пневматических рессор, а также условия эксплуатации ее на транспортном средстве.

Алгоритм и блок-схема для данной задачи по исследованию колебаний элемента мягкой (упругой) оболочки, зажатой ребрами жесткости для различных типов пневматических рессор, применяемых на электрическом транспорте, представленном в пункте 2.2. Численные исследования проводились в среде *MathCad 13*.

2.2 Численные исследования по разработанной новой модели пневморессоры в виде пространственной системы с пульсирующим давлением в рабочей среде с использованием среды *MathCAD 13*.

Решение по реальным конструктивным размерам элемента упругой оболочки, зажатой металлическими ребрами жесткости, применительно к пневморессорам электрического транспорта, получено численным методом по готовому аналитическому решению, представленному в пункте 2.1, путем кусочно-линейной аппроксимации и связки по узлам по аналогии с работами [15,16]. Алгоритм и блок-схема для данной задачи по исследованию колебаний элемента мягкой (упругой) оболочки, зажатой ребрами жесткости для различных типов пневматических рессор, применяемых на электрическом транспорте, представлены на рисунке 2.2. Численные исследования проводились в среде *MathCAD 13*.

Исходные данные принимались по таблицам 1.1,1.2 и 1.3, представленными в главе 1, где проводится обзор имеющихся

конструкций пневматических рессор, применяемых на железнодорожном подвижном составе.

Для численных исследований используется среда MathCAD 13..

Данный метод полностью компьютеризирован (для PENTIUM), поэтому его использование не вызывает сложности при вычислениях, программы расчета выполняются в течение 2-3 минут, при этом необходимо лишь задать требуемые параметры элементов упругой оболочки и металлического каркаса для различных типов пневматических рессор, применяемых на электрическом транспорте.

Решение по реальным конструктивным размерам элемента упругой оболочки пневматических рессор получено численным методом по готовому аналитическому решению, представленному в главе 2, путем применения метода кусочно-линейной аппроксимации и связки по узлам по аналогии с работой [4].

В результате строятся графики по совместным колебаниям элемента упругой оболочки, армированной металлическими стержнями, типа пневматических рессор электровазов (таблицы 1.2 и 1.3). Алгоритмы для численных исследований по предлагаемой модели составлены (на примере расчета пневматических рессор электровазов), по формулам, представленным в пункте 2.1.

Блок-схема для численных исследований (рисунок 2.2) состоит из 5-ти этапов:

1 этап:

Ввод исходных данных:

1) Параметры массовые и геометрические для упругого оболочечного элемента и металлического каркаса пневматической.

2) Параметры режимов динамического нагружения.

3) Параметры этапов усложнения задачи.

2 этап:

1) Организация цикла по гармоникам внешнего нагружения:

(цикл по N) FOR $n = 0$ TO 3

2) Применение метода Рунге – Кутта для системы: дифференциальных уравнений (3.1) – (3.2) с заданием шага по времени:

(цикл по K) FOR $k = 0$ TO 3

3 и 4 этапы:

В результате инженерных упрощений и преобразований методом Лагранжа исследуются методом Рунге – Кутта полученные упрощенные уравнения колебаний системы с 2-мя упругими оболочками, зажатыми ребрами жесткости (для упругой вкладной емкости пневморессоры с металлическим каркасом) в виде системы (2.28) – (2.29). Производится нахождение координат упругих смещений и углов поворота по элементам анализируемой модели:

- 1) Пошаговое вычисление коэффициентов для системы (2.28) – (2.29).
- 2) $\varphi_2(t)$, $\varphi_3(t)$ - система уравнений (2.28)-(2.29).

5 этап:

Построение необходимых графиков с помощью пакетов прикладных программ EXCEL, среды *Mathcad 13*, печатание таблиц расчетов и конец программного численного анализа.

БЛОК-СХЕМА





Рисунок 2.2 - Численное исследование по модели упругого оболочечного элемента, зажатого ребрами жесткости, для пневматических рессор электровозов

2.3 Исследование совместных колебаний прямоугольного элемента мягкой оболочки в виде пластинки с сеточным каркасом для пневморессоры электрического транспорта.

В данном параграфе нами проводится разработка численно-аналитической модели для динамического расчета боковой стенки мягкой оболочки пневморессоры *в виде пластинки с сеточным каркасом*, которая является логическим продолжением моделей и методик расчета, представленных в пунктах 2.1, 2.2.

Использование сложных моделей для нестационарных гидромеханических процессов требует выполнения трудоемких расчетов на ЭВМ, которые могут и не дать обозримых результатов [1]. В связи с этим в практике чаще применяются более простые модели для исследования динамики эластичных оболочек и пластинчато-стержневых систем, заполненных жидкостью под давлением, основанные большей частью своей на ряде практических допущений.

Задача о колебаниях трубопроводов большого сечения (в виде пластинчато-стержневых конструкций или эластичных оболочек), заполненных жидкостью под давлением изучалась рядом авторов вследствие практического интереса к поведению гидравлических емкостей при смешанных вибрационных нагрузках. При этом особое внимание уделялось исследованию динамики системы, так как возникающие в ней динамические напряжения и деформации могут в $1,5 \div 10$ раз превосходить статические [1]. Ввод коэффициента динамики в статические напряжения и нагрузки по аналогии с работой [2] не дает желаемого эффекта и может привести к разрушению конструкции эластичной оболочки, армированной металлическим каркасом, при повышенных динамических нагрузках, возникающих, например, при транспортировке на судне (боковая и килевая качка), на железнодорожном или автомобильном транспорте.

Для обоснования предлагаемой нами расчетной модели мягкой оболочки виде пластинки с сеточным каркасом вводим ряд допущений.

1. Будем моделировать элемент боковой стенки мягкой емкости в виде тонкой упругой пластины, закрепленной по контуру стержнями металлической сетки. Принимаем контур модельной пластины в виде прямоугольника – длиной $h_{\text{п}}$ и шириной $b_{\text{п}}$. При этом площадь его будет равна: $S_{\text{п}} = h_{\text{п}} * b_{\text{п}}$. Считаем толщину модельной пластинки $\Delta_{\text{п}}$ постоянной в

пределах всей площади S_{Π} . При анализе статических деформаций модельной пластинки принимаем упрощенные функции удельной нагрузки $q_{\Pi}(X, Y)$, приложенной по всей поверхности S_{Π} . Упругие деформации изгиба срединного слоя, размещенного на расстоянии $0.5 \Delta_{\Pi}$ от поверхности S_{Π} приложения равномерно распределенной нагрузки $q_{\Pi}(X, Y)$ учитываем функцией $W_{\Pi}(X, Y)$.

2. Принимаем цилиндрическую жесткость модельной пластинки элемента боковой стенки постоянной и равной:

$$D_{\Pi} = \frac{E_K \cdot \Delta_{\Pi}^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}, \quad (2.44)$$

где E_K - приведенный модуль упругости материала эквивалентного несущего каркаса боковой стенки грузового вагона, ν - приведенный коэффициент Пуассона для материала упругой пластинки.

3. Для модели прямоугольной пластинки элемента боковой стенки упругой оболочки (без учета сеточного каркаса) и с учетом введенных допущений запишем дифференциальное уравнение изгибных колебаний в виде [19]:

$$\frac{\partial^4 W_{\Pi}}{\partial X^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 W_{\Pi}}{\partial X^2 \partial Y^2} + \frac{\partial^4 W_{\Pi}}{\partial Y^4} = \frac{q_{\Pi}(X, Y)}{D_{\Pi}}. \quad (2.45)$$

Используем функции изгиба срединного слоя модели несущего каркаса вдоль оси OX , учитывающие

собственные функции изгиба упругих стержней металлического сеточного каркаса, которые возникают при квазистатическом воздействии жидкой среды, транспортирующейся в грузовом вагоне или на судне. В связи с этим с учетом нелинейности воздействия примем динамическую нагрузку в виде гармонического разложения в ряд:

$$\frac{q_{II}(X, Y)}{D_{II}} = \sum_{i=1,3,5} A_{iII}(Y) \cdot \text{SIN} \frac{i\pi X}{2 \cdot h_{II}} \quad (2.46)$$

Для таких допущений возможно по методу Фурье представить решение уравнения (2.45) в форме суммы ряда вида:

$$W_{iII}(X, Y) = W_{iII}(Y) \cdot \text{SIN} \frac{i\pi X}{2 \cdot h_{II}} \quad (2.47)$$

где $i = 1, 3, 5...$

После подстановки частных производных от (2.47) в уравнение (2.45) для каждой « i » формы колебаний получим уравнение:

$$\frac{d^4 W_{iII}}{dY^4} - \frac{\pi^2 \cdot i^2}{4 \cdot h_{II}^2} \cdot \frac{d^2 W_{iII}}{dY^2} + \frac{\pi^4 \cdot i^4}{16 \cdot h_{II}^4} \cdot W_{iII} = A_{iII}(Y) \quad (2.48)$$

которое допускает точные решения для определения функции $W_{iII}(X, Y)$. Для этого уравнения

действительны следующие граничные условия:

- при $Y = 0$ по прогибам модели упругого стержневого каркаса:

$$W_{iII}(0) = W_{oi} \quad ;$$

- углам поворота его от кручения:

$$\frac{dW_{iII}(0)}{dY} = \dot{W}_{oi} \quad ; \quad \frac{d^2W_{iII}(0)}{dY^2} = \ddot{W}_{oi} \quad ; \quad \frac{d^3W_{iII}(0)}{dY^3} = \dddot{W}_{oi} \quad . \quad (2.49)$$

- при $Y = \pm 0.5 \cdot b_{II}$:

$$\frac{d^2W_{iII}(0.5 \cdot b_{II})}{dY^2} = \frac{d^3W_{iII}(0.5 \cdot b_{II})}{dY^3} = 0 \quad . \quad (2.50)$$

Решение уравнения (2.48) выполняем методом операционного преобразования Лапласа. В результате получаем решение вида

$$\begin{aligned} W_i(Y) = & A_{iII} \cdot \left[\frac{16 \cdot h_{II}^4}{\pi^4 \cdot i^4} + \frac{(\rho_1^2 - \rho_2^2) \cdot sh \rho_1 Y \cdot \sin \rho_2 Y - 2 \rho_1 \rho_2 \cdot ch \rho_1 Y \cdot \cos \rho_2 Y}{2 \rho_1 \rho_2 \cdot [(\rho_1^2 - \rho_2^2) + 4 \cdot \rho_1^2 \cdot \rho_2^2]} \right] + \\ & + W_{oi} \cdot \frac{1}{2 \rho_1 \rho_2} \cdot [(\rho_1^2 - \rho_2^2) \cdot sh \rho_1 Y \cdot \sin \rho_2 Y - 2 \rho_1 \rho_2 \cdot ch \rho_1 Y \cdot \cos \rho_2 Y] + \\ & + \dot{W}_{oi} \cdot \frac{1}{2 \rho_1 \rho_2} \cdot [\rho_1 \cdot ch \rho_1 Y \cdot \sin \rho_2 Y - \rho_2 \cdot sh \rho_1 Y \cdot \cos \rho_2 Y] + \\ & + (\ddot{W}_{oi} + \frac{\pi^2 i^2}{4 \cdot h_K^2} \cdot W_{oi}) \cdot \frac{1}{2 \rho_1 \rho_2} \cdot [sh \rho_1 Y \cdot \sin \rho_2 Y] + \end{aligned} \quad (2.51)$$

$$+ (\ddot{W}_{oi} + \frac{\pi^2 i^2}{4 \cdot h_K^2} \cdot \dot{W}_{oi}) \cdot \frac{1}{2 \rho_1 \rho_2} \cdot [\rho_1 ch \rho_1 Y \cdot \sin \rho_2 Y - \rho_2 \cdot sh \rho_1 Y \cdot \cos \rho_2 Y]$$

Для нахождения постоянных $\dot{W}_{oi}, \ddot{W}_{oi}, \dddot{W}_{oi}$ используются граничные условия (2.49) – (2.50). Начальные условия при колебаниях принимаем нулевыми.

Для крутильных колебаний прямоугольного элемента мягкой оболочки в виде пластинки с сеточным каркасом можно записать следующее уравнение:

$$i_k(x) \frac{d^2 \theta_k}{dt^2} - \frac{\gamma}{dx} \left[\mathcal{J}_k(x) \frac{d \theta_k}{dx} \right] = n_k(x, t) \quad . \quad (2.52)$$

Для получения развернутых уравнений определяем функции частных производных:

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dx^2} \left[(\mathcal{K}_0 + b_1x + b_2x + b_2x^2) \frac{d^2W_k}{dz^2} \right] &= 2b_2 \frac{d^2W_k}{dz^2} + \\ &+ 2(b_1 + 2b_2x) \frac{d^3W_k}{dx^3} + \mathcal{K}_n(x) \frac{d^4W_k}{dx^4} ; \\ \frac{d^2}{dxdt} \left[(i_0 + \delta_1x + \delta_2x^2) \frac{d^2W_k}{dxdt} \right] &= i_k(x) \frac{d^4W_k}{dx^2dt^2} + (\delta_1 + 2\delta_2x) \frac{d^3W_k}{dxdt^2} ; \\ \frac{\gamma}{dx} \left[(\mathcal{K}_c + r_1x + r_2x^2) \frac{d\theta_k}{dx} \right] &= (r_1 + 2r_2x) \frac{d\theta_k}{dx} + \mathcal{K}_k(x) \frac{d^2\theta_k}{dx^2} . \end{aligned}$$

После подстановки последних функций в (2.52) и деления всех членов уравнений на $\mathcal{K}_n(x)$ и $\mathcal{K}_k(x)$ соответственно получим нелинейные уравнения совместных изгибно - крутильных колебаний всей боковой стенки одиночной упругой емкости напряженного класса в виде оболочки с учетом сеточного каркаса (вводится учет переменности массы и жесткостей для эквивалентного несущего каркаса):

$$\begin{aligned} \frac{m_k(x)}{\mathcal{K}_n(x)} \frac{d^2W_k}{dt^2} + 2b_2 \frac{d^2W_k}{dz^2} + \frac{b_1 + 2b_2x}{\mathcal{K}_n(x)} \frac{d^3W_k}{dx^3} + \\ + \frac{d^4W_k}{dx^4} - \frac{i_k(x)}{\mathcal{K}_n(x)} \frac{d^4W_k}{dx^2dt^2} - \frac{\delta_1 + 2\delta_2x}{\mathcal{K}_n(x)} \frac{d^3W_k}{dxdt^2} = \frac{n_w(x,t)}{\mathcal{K}_n(x)} , \end{aligned} \quad (2.53)$$

$$\frac{i_k(x)}{\mathcal{K}_k(x)} \frac{d^2\theta_k}{dt^2} - \frac{r_1 + 2r_2x}{\mathcal{K}_k(x)} \frac{d\theta_k}{dx} - \frac{d^2\theta_k}{dx^2} = n_k(x,t) / \mathcal{K}_k(x) . \quad (2.54)$$

Для получения приближенных решений проводим интегральные осреднения коэффициентов при части членов последних уравнений:

$$\frac{1}{h_k} \int_0^{h_k} \frac{m_k(x)}{\mathcal{K}_n(x)} dx = A_1 ;$$

$$\frac{1}{h_k} \int_0^{h_k} \frac{b_1 + 2b_2x}{\mathcal{K}_n(x)} dx = \frac{1}{h_k} \ln \mathcal{K}_n(x) \Big|_0^{h_k} = \frac{1}{h_k} \ln \frac{\mathcal{K}_0 + b_1h_k + b_2h_k^2}{\mathcal{K}_0} = 0 ;$$

с учетом обращения $\mathcal{K}_n(h_k)=0$ (по рисунку 2.4):

$$\frac{1}{h_k} \int_0^{h_k} \frac{i_k(x)}{\mathcal{K}_n(x)} dx = A_2 ; \quad \frac{1}{h_k} \int_0^{h_k} \frac{\delta_1 + 2\delta_2x}{\mathcal{K}_n(x)} dx \approx 0 ;$$

$$\frac{1}{h_k} \int_0^{h_k} \frac{r_1 + 2r_2 x}{\mathcal{J}_k(x)} dx = 0; \quad \frac{1}{h_k} \int_0^{h_k} \frac{i_k(x)}{\mathcal{J}_k(x)} dx = A_3;$$

$$\frac{n_w(x)}{\mathcal{J}_n(x)} = d_0 + d_1 x + d_2 x^2; \quad \frac{n_k(x)}{\mathcal{J}_k(x)} = l_0 + l_1 x + l_2 x^2,$$

где $d_0, d_1, d_2, l_0, l_1, l_2$ - постоянные коэффициенты, определяемые после разложения функций в ряды по степеням (или тригонометрические ряды функций $\sin \frac{i\pi x}{\pi k}$, при $i=1,2,3\dots$), $n_w(x), n_k(x)$ - функции, зависящие только от x и допускающие их выделение из $n_w(x,t), n_k(x,t)$ динамического нагружения модели упругого стержня:

$$\begin{aligned} A_1 \frac{d^2 W_k}{dt^2} + 2b_2 \frac{d^2 W_k}{dx^2} + \frac{d^4 W_k}{dx^4} - A_2 \frac{d^4 W_k}{dx^2 dt^2} = \\ = (d_0 + d_1 x + d_2 x^2) \Psi_1(t), \end{aligned} \quad (2.55)$$

$$A_3 \frac{d^2 \theta_k}{dt^2} + \frac{d^2 \theta_k}{dx^2} = (l_0 + l_1 x + l_2 x^2) \Psi_2(t), \quad (2.56)$$

где $\psi_1(t), \psi_2(t)$ - функции времени, характеризующие динамичность нагружения модели упругих металлических стержней сеточного каркаса.

Рассмотрим характерные примеры нагружения модели упругой оболочки с сеточным каркасом из металлических стержней.

Задача 1. Нагружение квазистатической нагрузкой, учитывающей увеличение статического нагружения за некоторый интервал времени τ_0 .

В этом случае принимаем функции:

$$\Psi_1(t) = e^{\alpha_u t}, \quad \Psi_2(t) = e^{\alpha_k t}, \quad (2.57)$$

где $e^{\alpha_u \tau_0}$ и $e^{\alpha_k \tau_0}$ - характеризуют увеличение нагрузок при $t = \tau_0$ в $e_n \alpha_u \tau_0$ и $e_n \alpha_k \tau_0$ раз сравнительно с начальной при $t=0$.

Такому случаю соответствуют условия возрастающего давления жидкой среды (при постоянной скорости). Для такого случая решение уравнений отыскиваем в форме:

$$W_{k1}(x, t) = W_1(x) e^{\alpha_u t}, \quad (2.58)$$

$$\theta_{k1}(x, t) = \theta_1(x) e^{\alpha_k t}, \quad (2.59)$$

После подстановки частных производных от (2.58) и (2.59) в систему уравнений (2.55), (2.56) получим дифференциальные уравнения вида:

$$\begin{aligned} \frac{d^4 W_1}{dx^4} + B_1 \frac{d^2 W_1}{dx^2} + B_2 W_1 &= \\ &= d_0 + d_1 x + d_2 x^2, \end{aligned} \quad (2.60)$$

$$\frac{d^2 \theta_1}{dx^2} - A_3 \alpha_k^2 \theta_1 = -(l_0 + l_1 x + l_2 x^2), \quad (2.61)$$

где $B_1 = 2B_2 - A_2 \alpha_n^2$, $B_2 = A_1 \alpha_n^2$. Эти уравнения удовлетворяют условиям:

- заземленного сечения при $x=0$, $x=n_k$:

$$\begin{aligned} W_1(0) = \frac{dW_1(0)}{dx} = 0; \\ \frac{d^2 W_1(0)}{dx^2} = \ddot{W}_1; \quad \frac{d^3 W_1(0)}{dx^3} = \dddot{W}_1 \\ \theta_1(0) = 0; \quad \frac{d\theta_1(0)}{dx} = \dot{\theta}_1, \end{aligned} \quad (2.62)$$

Решения уравнений (2.60) и (2.61) выполняем последовательно методом операционного исчисления [7]. Пусть $W_1(x) \leftarrow W_1(q)$, тогда:

$$\frac{d^2 W_1(x)}{dx^2} \leftarrow q^2 W_1(q); \quad \frac{d^4 W_1(x)}{dx^4} \leftarrow q^4 W_1(q) - q^2 \ddot{W}_1 - q \dddot{W}_1, \quad (2.63)$$

получим изображение решение (2.63):

$$W_1(q) = \frac{1}{q^4 + B_1 q^2 + B_2} \cdot \left(d_0 + \frac{d_1}{q} + \frac{2d_2}{q^2} + q^2 \ddot{W}_1 + q \dddot{W}_1 \right). \quad (2.64)$$

А теперь отыскиваем оригиналы отдельных членов правой части последнего изображения, для этого предварительно определяем корни уравнения знаменателя при $B_1^2 > 4B_2$, где:

$$q^4 + B_1 q^2 + B_2 = (q^2 + q_1^2)(q^2 + q_2^2) = 0,$$

$$q_1 = \sqrt{\frac{B_1}{2} \left[\sqrt{1 - \frac{4B_2}{B_1^2}} + 1 \right]}, \quad q_2 = \sqrt{\frac{B_1}{2} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4B_2}{B_1^2}} \right]}, \quad (2.65)$$

с учетом (2.65) получим:

$$\begin{aligned} \frac{d_0 + q^2 \ddot{W}_1 + q \ddot{W}_1}{(q^2 + q_1^2)(q^2 + q_2^2)} &\rightarrow d_0 \left[\frac{1}{q_1^2 q_2^2} - \frac{\cos q_1 x}{(q_2^2 - q_1^2) q_1^2} - \frac{\cos q_2 x}{(q_1^2 - q_2^2) q_2^2} \right] + \\ &+ \frac{\ddot{W}_1 (\cos q_1 x - \cos q_2 x)}{q_1^2 - q_2^2} + \frac{\ddot{W}_1}{(q_1^2 - q_2^2)} \cdot \left(\frac{\sin q_1 x}{q_1} - \frac{\sin q_2 x}{q_2} \right); \\ \frac{d_1}{q(q^4 + B_1 q^2 + B_2)} &\rightarrow d_1 \int_0^x \left[\frac{1}{q_1^2 q_2^2} + \frac{\cos q_1 x}{(q_1^2 - q_2^2) q_1^2} - \frac{\cos q_2 x}{(q_1^2 - q_2^2) q_2^2} \right] dx = \\ &= d_1 \left[\frac{x}{q_1^2 q_2^2} + \frac{\sin q_1 x}{(q_1^2 - q_2^2) q_1^3} - \frac{\sin q_2 x}{(q_1^2 - q_2^2) q_2^3} \right], \\ \frac{2d_2}{q^2(q^4 + B_1 q^2 + B_2)} &\rightarrow d_2 \int_0^x \left[\frac{x}{q_1^2 q_2^2} + \frac{\sin q_1 x}{(q_1^2 - q_2^2) q_1^3} - \frac{\sin q_2 x}{(q_1^2 - q_2^2) q_2^3} \right] dx = \\ &= d_2 \left[\frac{x^2}{2q_1^2 q_2^2} + \frac{1 - \cos q_1 x}{(q_1^2 - q_2^2) q_1^4} - \frac{1 - \cos q_2 x}{(q_1^2 - q_2^2) q_2^4} \right], \end{aligned}$$

а затем и полное решение:

$$\begin{aligned} W_1(x) &= \frac{1}{(q_1^2 - q_2^2)} \cdot \left\{ \frac{d_0}{q_1^2 q_2^2} \cdot \left[q_1^2 (1 - \cos q_2 x) - q_2^2 (1 - \cos q_1 x) \right] + \right. \\ &+ \ddot{W}_1 (\cos q_1 x - \cos q_2 x) + \ddot{W}_1 \left(\frac{\sin q_1 x}{q_1} - \frac{\sin q_2 x}{q_2} \right) + d_1 \left(\frac{x}{q_1^2 q_2^2} + \frac{\sin q_1 x}{q_1^4} - \frac{\sin q_2 x}{q_2^4} \right) + \\ &\left. d_2 \left(\frac{x^2}{2q_1^2 q_2^2} + \frac{1 - \cos q_1 x}{q_1^4} - \frac{1 - \cos q_2 x}{q_2^4} \right) \right\}. \end{aligned} \quad (2.66)$$

С использованием условий (2.62) составляем уравнения для определения \ddot{W}_1 и \ddot{W}_1 :

$$\begin{aligned} \ddot{W}_1 (q_1^2 \cos q_1 h_k - q_2^2 \cos q_2 h_k) + \ddot{W}_1 (q_1 \sin q_1 h_k - q_2 \sin q_2 h_k) &= \\ = d_0 (\cos q_1 h_k - \cos q_2 h_k) - d_1 \left(\frac{\sin q_1 h_k}{q_1} - \frac{\sin q_2 h_k}{q_2} \right) + \\ + \frac{d_2}{q_1^2 q_2^2} \cdot \left(1 - \frac{q_1^2}{q_2^2} \cos q_1 h_k + \frac{q_2^2}{q_1^2} \cos q_2 h_k \right), & \\ - \ddot{W}_1 (q_1^3 \sin q_1 h_k - q_2^3 \sin q_2 h_k) + \ddot{W}_1 (q_1^2 \cos q_2 h_k - q_2^2 \cos q_1 h_k) &= \\ = -d_0 (q_1 \sin q_1 h_k - q_2 \sin q_2 h_k) - d_1 (\cos q_1 h_k - \cos q_2 h_k) + \end{aligned} \quad (2.67)$$

$$+ \frac{d_2}{q_1^2 q_2^2} \cdot \left(1 + \frac{q_1^3}{q_2^2} \sin q_1 h_k + \frac{q_2^3}{q_1} \sin q_2 h_k \right). \quad (2.68)$$

Для решения (2.61) принимаем $A_3 \alpha_k^3 = q_3^2$, $\theta_1(x) \leftarrow \theta_1(q)$ и получим:

$$\theta_1(q) = \frac{\dot{\theta}_1 q - l_0 - \frac{l_1}{q} - \frac{2l_2}{q}}{q^2 - q_3^2}.$$

Переходим к оригиналам функции:

$$\begin{aligned} \frac{q}{q^2 - q_3^2} &\rightarrow \frac{\sin q_3 x}{q_3}; & \frac{l_0}{q^2 - q_3^2} &\rightarrow \frac{l_0}{q_3^2} (\cos q_3 x - 1); \\ \frac{l_1}{q(q^2 - q_3^2)} &\rightarrow \frac{l_1}{q_3^2} \int_0^x (\cos q_3 x - 1) dx = \frac{l_1}{q_3^2} \left(\frac{\sin q_3 x}{q_3} - x \right); \\ \frac{l_2}{q^2(q^2 - q_3^2)} &\rightarrow \frac{l_2}{q_3^2} \int_0^x \left(\frac{\sin q_3 x}{q_3} - x \right) dx = -\frac{l_2}{q_3^2} \left(\frac{\cos q_3 x - 1}{q_3^2} + \frac{x^2}{2} \right); \\ \theta_1(x) &= \frac{\dot{\theta}_1}{q_3} \sin q_3 x + \frac{1}{q_3^2} \left[l_0 (1 - \cos q_3 x) + l_1 \left(x - \frac{\sin q_3 x}{q_3} \right) + l_2 \left(\frac{x^2}{2} - \frac{1 - \cos q_3 x}{q_3^2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (2.69)$$

Для определения $\dot{\theta}_1$ используем условие (2.62) и получим:

$$\dot{\theta}_1 = -\frac{1}{q_3 \sin q_3 h_k} \cdot \left[l_0 (1 - \cos q_3 h_k) + l_1 \left(h_k - \frac{\sin q_3 h_k}{q_3} \right) + l_2 \left(\frac{h_k^2}{2} - \frac{1 - \cos q_3 h_k}{q_3^2} \right) \right], \quad (2.70)$$

Задача 2. Выполняем второй вариант решения системы уравнений (2.53) - (2.54) для условий разложения функций внешней динамической нагрузки в ряды, соответствующие гармоникам, возникающим при боковой или килевой качке на судне или колебаниях виляния и галлопирования при движении грузовых вагонов.

Этому случаю соответствуют функции:

$$\frac{n_w(x)}{\mathcal{K}_n(x)} = \sum_{i=1,3,5} a_{w_i} \cdot \sin \frac{i\pi x}{2h_k}; \quad (2.71)$$

$$\frac{n_k(x)}{\mathcal{K}_k(x)} = \sum_{i=1,3,5} a_{k_i} \cdot \sin \frac{i\pi x}{2h_k}; \quad (2.72)$$

В этом случае, сохраняя левые части уравнений (2.53) и (2.54) и ранее принятые функции $\psi_1(t)$ и $\psi_2(t)$, к этим уравнениям, с учетом (2.71) и (2.72) получим решения для “ i ” формы колебаний в виде:

$$W_k(x, t) = \psi_{ni}(t) \cdot \sin \frac{i\pi x}{2h_k}, \quad (2.73)$$

$$\theta_k(x, t) = \psi_{ki}(t) \cdot \sin \frac{i\pi x}{h_k}, \quad (2.74)$$

После подстановки частных производных от последних функций в (2.53) и (2.54) получим уравнения:

$$\frac{d^2 \psi_{ni}}{dt^2} + P_{ni}^2 \psi_{ni} = b_{wi} e^{\alpha_n t}, \quad (2.75)$$

$$\frac{d^2 \psi_{ki}}{dt^2} + P_{\theta i}^2 \psi_{ki} = b_{ki} e^{\alpha_k t}, \quad (2.76)$$

где:

$$P_{ni}^2 = \frac{\pi^2 i^2}{4h_k^2} \left(\frac{\pi^2 i^2}{4h_k^2} - 2b_2 \right) / \left(A_1 + A_2 \frac{\pi^2 i^2}{4h_k^2} \right),$$

$$b_{ni} = \frac{a_{wi}}{A_1 + A_2 \frac{\pi^2 i^2}{4h_k^2}}; \quad P_{\theta i}^2 = \frac{\pi^2 i^2}{4h_k^2 A_3}; \quad b_{ki} = \frac{a_{ki}}{A_3}, \quad (2.77)$$

где P_{ni} и $P_{\theta i}$ - частоты собственных изгибных и крутильных колебаний модели упругого стержня сетчатого металлического каркаса, соответствующие “ i ” форме деформации. Для статических деформаций при $t=0$, $\frac{d^2 \psi_{ni}}{dt^2} = \frac{d^2 \psi_{ki}}{dt^2} = 0$, получим коэффициенты таких деформаций при $i=1,3,5\dots$

$$\psi_{ci} = \frac{b_{wi}}{P_{ni}} = \frac{4a_{wi} h_k^2}{\pi^2 i^2 \left(\frac{\pi^2 i^2}{4h_k^2} - 2b_2 \right)}, \quad (2.78)$$

$$\psi_{ki} = \frac{4a_{ki} h_k}{\pi^2 i^2}. \quad (2.79)$$

Начальные условия для (2.75) и (2.76) и решения уравнений « i » формы будут характеризоваться величинами при $t=0$:

$$\psi_{ni}(0) = \psi_{ci}, \quad \psi_{ki}(0) = \psi_{ki}. \quad (2.80)$$

При этом принимаем $\frac{d\psi_{ni}(0)}{dt} = \frac{d\psi_{ki}(0)}{dt} = 0$, учитывая принятые ранее условия квазистатического нагружения.

Решения уравнений (2.75), (2.76) выполняем методом операционного исчисления:

Пусть $\psi_{ni}(t) \rightarrow \psi_{ni}(p)$,

тогда:

$$\frac{d^2\psi_{ni}(t)}{dt^2} \rightarrow \psi_{ni}(p) \cdot p^2 - \psi_{ni}(x)p^2$$

получим:

$$\psi_{ni}(p) = \frac{b_{wi}}{(p - \alpha_n)(p^2 + p_{ni}^2)} + \frac{\psi_{nx}(x)p^2}{(p^2 + p_{ni}^2)}. \quad (2.81)$$

После перехода к оригиналу последней функции получим:

$$\psi_{ni}(t) = \frac{b_{wi}}{(p_{ni}^2 + \alpha_n^2)} \cdot \left[e^{\alpha_n t} - \cos p_{ni} t - \frac{\alpha_n}{p_{ni}} \sin p_{ni} t \right] + \psi_{ni} \cos p_{ni} t. \quad (2.82)$$

По аналогичной методике получаем:

$$\psi_{ki}(t) = \frac{b_{ki}}{(p_{\theta}^2 + \alpha_k^2)} \cdot \left[e^{\alpha_k t} - \cos p_{\theta} t - \frac{\alpha_k}{p_{\theta}} \sin p_{\theta} t \right] + \psi_{ki} \cos p_{\theta} t. \quad (2.83)$$

С учетом (2.73) и (2.74) получим:

$$W_n(x, t) = \sum_{i=1,3,5} \psi_{ni}(t) \cdot \sin \frac{i\pi x}{2h_k}, \quad (2.84)$$

$$\theta_k(x, t) = \sum_{i=1,3,5} \psi_{ki}(t) \cdot \sin \frac{i\pi x}{2h_k}. \quad (2.85)$$

Решение по реальным конструктивным размерам вкладной мягкой емкости будет получено численным методом по готовому аналитическому решению для элемента упругой оболочки путем кусочно-линейной аппроксимации и связки по узлам по аналогии с работами [15, 16, 25]. Для исследований используются 2 задачи:

1. Задача 1. Нагружение квазистатической нагрузкой, учитывающей увеличение статического нагружения за некоторый интервал времени τ_0 .

2. Задача 2. Выполняем второй вариант решения системы уравнений (2.53) - (2.54) для условий разложения функций внешней динамической нагрузки в ряды, соответствующие гармоникам, возникающим при боковой или килевой качке на судне или колебаниях виляния и галлопирования при движении грузовых вагонов.

Блок-схема для численных исследований по модели упругой оболочки в виде пластинки с сеточным каркасом, который имеет вид металлических стержней, представлена на рисунке 2.3 в пункте 2.4.

2.4 Анализ численных результатов с построением графиков и таблиц.

Решение по реальным конструктивным размерам вкладной мягкой емкости пневматической рессоры получено численным методом по готовому аналитическому решению для элемента упругой оболочки путем кусочно-линейной аппроксимации и связки по узлам по аналогии с работами [15,16,25].

При численных исследованиях проводится анализ 3-х задач:

1. **Задача 1. Исследование колебаний элемента мягкой (упругой) оболочки, зажатой ребрами жесткости (пункт 2.1), в предположении системы с сосредоточенными массами.**

2. **Задача 2. Нагружение упругого элемента оболочки в виде пластинки с металлическим сетчатым каркасом квазистатической нагрузкой, учитывающей увеличение статического нагружения за некоторый**

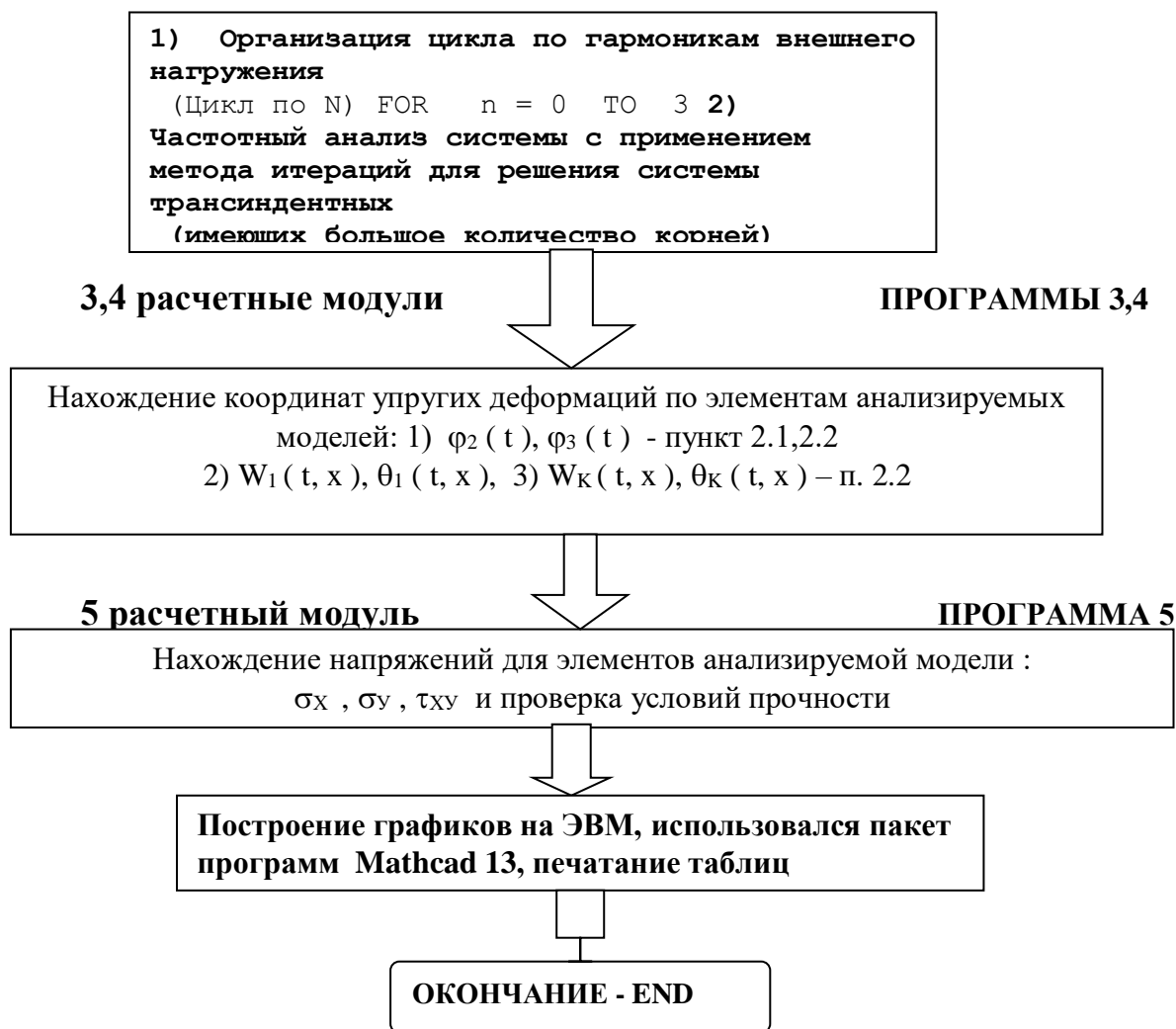


Рисунок 2.3 - Численное исследование по модели упругой оболочки в виде пластинки с сеточным каркасом в виде металлических стержней (пункты 2.1 – 2.3)

Блок-схема для численных исследований состоит из

5-ти этапов.

1 этап:

Ввод исходных данных:

1) Параметры массовые и геометрические для упругой емкости и металлического каркаса (таблицы 1.1 и 1.2).

2) **Параметры режимов динамического нагружения.**

3) Параметры этапов усложнения задачи.

(Рассмотрены 3 задачи: пп.2.1 – 2.3)

1) Для первой задачи (глава 2):

$$\psi_1 := \frac{\pi \cdot 60}{180} \quad \psi_2 := \frac{\pi \cdot 27}{180} \quad \psi_3 := \frac{\pi \cdot 45}{180} \quad P_0 := 5.2 \cdot 10^5$$

$$\beta_1 := \frac{\pi \cdot 30}{180} \quad \beta_2 := \frac{\pi \cdot 87}{180} \quad \beta_3 := \beta_2 + \psi_2 \quad \beta_4 := \frac{\pi \cdot 22}{180}$$

$$r_1 := 1.3 \quad r_2 := 1.32 \quad r_3 := 1.34$$

$$\rho_1 := 2.35 \cdot 10^3 \quad \rho_2 := 7.81 \cdot 10^3$$

$$F_1 := 25 \cdot 10^{-4} \quad F_2 := 6036 \cdot 10^{-4} \quad F_3 := F_1$$

$$m_1 := \rho_1 \cdot F_1 \quad m_2 := \rho_2 \cdot F_2 \quad m_3 := m_1$$

$$I_1 := \frac{[5 \cdot (10^{-2})]^4}{12} \quad I_2 := 6.118 \cdot 10^{-8} \quad I_3 := I_1$$

$$r_{11} := 25 \cdot 10^{-3} \quad r_{22} := 3 \cdot 10^{-3} \quad r_{33} := r_1$$

2 этап:

1) Организация цикла по гармоникам внешнего нагружения:

(цикл по N) FOR n = 0 TO 3

2) Частотный анализ системы с применением метода итераций для решения системы трансцендентных (имеющих большое количество корней) уравнений:

(цикл по K) FOR k = 0 TO 3

3 этап:

Нахождение координат упругих деформаций для масс анализируемым моделям:

1) $\varphi_2(t)$, $\varphi_3(t)$ - п.2.1,

$$\alpha_1 := \psi_1 + \beta_1 + \beta_2 \quad \alpha_2 := \psi_1 + \beta_1 + \beta_3 \quad \alpha_3 := \psi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \frac{\beta_4}{2}$$

$$\alpha_4 := \psi_1 + \beta_1 + \beta_3 + \beta_4$$

$$CP1 := 2.85 \cdot 10^6 \quad \underline{CP1} := 2.55 \cdot 10^6 \quad CP3 := CP1$$

$$\underline{K_1} := \frac{-1}{2} \cdot (r_{11})^2 \cdot m_2 + I_2 + I_3 + \frac{1}{2} \cdot (r_{11})^2 \cdot m_3 + r_1 \cdot r_3 \cdot m_3 \cdot \cos(\beta_4) - m_3 \cdot \frac{(r_3)^2}{2}$$

$$K_2 := \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot (r_{11})^2 \cdot \cos(2 \cdot \alpha_1) - m_3 \cdot \frac{(r_{11})^2}{2} \cdot \cos(2 \cdot \alpha_2) - m_3 \cdot r_{11} \cdot r_3 \cdot \cos(2 \cdot \alpha_3) + m_3 \cdot \frac{(r_3)^2}{2} \cdot \cos(2 \cdot \alpha_4)$$

$$K_3 := \frac{-1}{2} \cdot (r_{11})^2 \cdot m_2 \cdot \sin(2 \cdot \alpha_1) + \frac{1}{2} \cdot (r_1)^2 \cdot m_3 \cdot \sin(2 \cdot \alpha_2) + r_{11} \cdot r_3 \cdot m_3 \cdot \sin(2 \cdot \alpha_3) - m_3 \cdot \frac{(r_3)^2}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha_4)$$

$$K_4 := I_3$$

$$K_5 := -m_3 \cdot r_{11} \cdot r_3 \cdot \sin(\beta_4)$$

$$K_6 := I_3$$

2) $W_1(t, x)$, $\theta_1(t, x)$, 3). $W_K(t, x)$, $\theta_K(t, x)$ – п. 2.2

4 этап:

Нахождение напряжений для элементов анализируемой модели:

σ_x , σ_y , τ_{xy} и проверка условий прочности.

Можно также по разработанным теоретическим моделям для динамического расчета вкладной одиночной упругой емкости напряженного класса в виде оболочки пневморессоры для электроподвижного состава провести численные исследования по напряженно-деформированному состоянию грузонесущих элементов.

Для этого, воспользовавшись приближением линеаризации и обратившись к анализу периодического движения, можно построить решение связанной гидроупругой системы в классе бегущих волн.

Рассмотрим гибкую (упругую) оболочку с двумя кривизнами

$\left\{ \frac{1}{R_x}; \frac{1}{R_y} \right\}$ по методу Филиппова [9]. Возникающие динамические

напряжения (изгибные в двух плоскостях и крутильные) можно вычислить по формулам:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (e_{xx} + \nu \cdot e_{yy}), \quad (2.86)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (e_{yy} + \nu \cdot e_{xx}), \quad (2.87)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} \cdot e_{xy}, \quad (2.88)$$

где ν - коэффициент Пуассона; E - эквивалентный модуль упругости материала вкладной одиночной емкости напряженного класса;

e_{xx} , e_{yy} , e_{xy} - относительные удлинения в направлении соответствующих осей; σ_x , σ_y - нормальные напряжения;

$\tau_{xy} = \tau_{yx}$ - касательные напряжения по площадям соответствующих граней.

При этом относительные удлинения в направлении X и Y :

$$e_{xx} = \frac{Z}{R_{1X}} \approx Z \cdot \left(\frac{1}{R_x} - \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} \right), \quad (2.89)$$

$$e_{yy} = \frac{Z}{R_{2Y}} \approx Z \cdot \left(\frac{1}{R_y} - \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} \right). \quad (2.90)$$

5 этап:

Для решения наиболее простых задач использовалась среда MathCAD 13, печатание таблиц расчетов и конец программного численного анализа.

Далее проводим численные расчеты в среде Mathcad

13.

1 - задача (пункт 2.1)

Расчет необходимых коэффициентов и параметров:

$$R_1 := K_1 - K_4 + K_2 \cdot \cos(2 \cdot \psi_2) + K_3 \cdot \sin(2 \cdot \psi_2)$$

$$R_2 := K_5 \quad R_3 := CP1 \quad R_4 := -CP3 \quad R_5 := \frac{r_1}{2} \cdot P0$$

$$S_1 := \frac{-R_2 + \sqrt{(R_2)^2 - 4 \cdot R_1 \cdot R_2}}{2 \cdot R_1} \quad S_2 := \frac{-R_2 - \sqrt{(R_2)^2 - 4 \cdot R_1 \cdot R_2}}{2 \cdot R_1}$$

$$S_1 = 0.189 \quad S_2 = -0.159 \quad tt := \frac{t_1}{20} \quad t := 0, tt \dots 4 \cdot t_1$$

$$\eta_1 := K_1 + K_2 \cdot \cos(2 \cdot \psi_2) + K_3 \cdot \sin(2 \cdot \psi_2) \quad tA := 13 \quad t_1 := 13$$

Расчет угловых смещений упругого элемента оболочки, зажатой ребрами жесткости (п.2.1):

$$A1 := \frac{r_{11} \cdot tA \cdot P0}{CP1} \quad A1 = 0.066$$

$$A2(t) := \frac{R_5 (1 - e^{-S_1 \cdot t})}{S_1 \cdot (S_2 - S_1)} \quad A3(t) := \frac{R_5 (1 - e^{-S_2 \cdot t})}{S_2 \cdot (S_1 - S_2)}$$

$$\phi_1(t) := (A1 + A2(t) \cdot e^{S_1 \cdot t} + A3(t) \cdot e^{S_2 \cdot t}) \cdot 10^{-6}$$

$$\phi_2(t) := \frac{r_{11} \cdot tA \cdot P0}{2 \cdot CP1} + \frac{r_{11} \cdot P0}{2} \cdot (S_1 \cdot e^{S_2 \cdot t} - S_2 \cdot e^{S_1 \cdot t} - S_1 \cdot e^{-S_2 \cdot t} \cdot e^{S_2 \cdot t} + S_2 \cdot e^{-S_1 \cdot tA} \cdot e^{S_1 \cdot t})$$

$\phi_1(t)$, рад

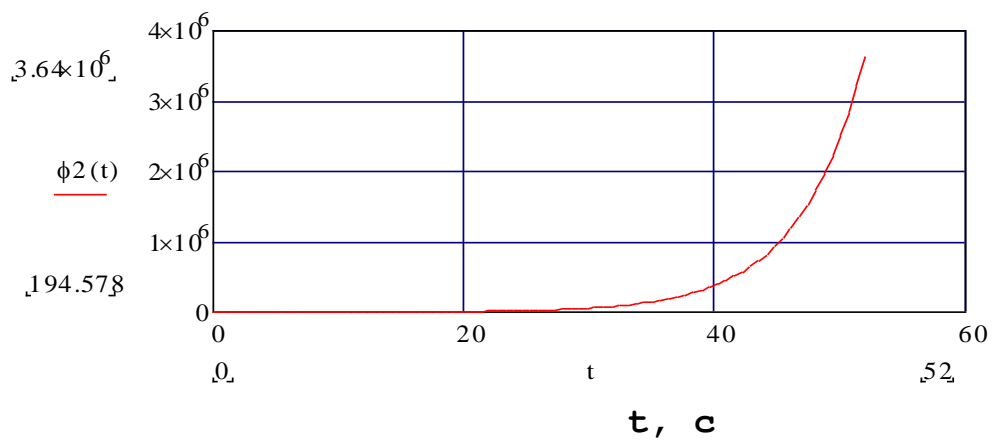
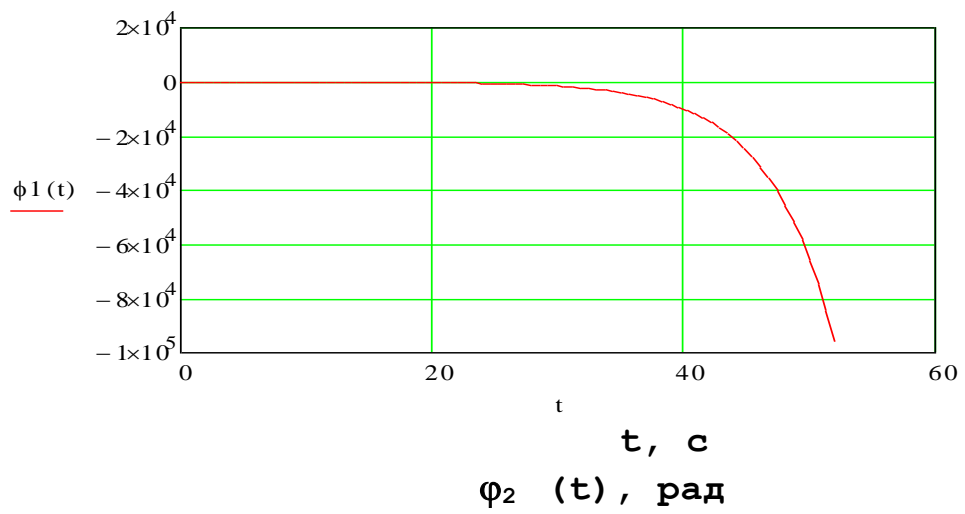


Рисунок 2.4 - График изменения угловых смещений φ_1 (t),

φ_2 (t) упругого элемента оболочки, зажатого ребрами жесткости

2 и 3 задачи (пункт 2.2 -2.4)

Расчет необходимых коэффициентов и параметров.

Для расчетов принимались следующие параметры: ω - частота внешнего динамического воздействия.

$$t_1 := 13 \quad \underline{t_{max}} := 40 \quad \underline{\tau_{kmax}} := \frac{480}{2 \cdot \pi}$$

$$\underline{\tau_A} := 13 \quad \underline{t_{imax}} := \frac{130}{2 \cdot \pi} \quad \underline{\tau_k} := 6$$

$$\alpha_i := \ln\left(\frac{\underline{\tau_A}}{\underline{t_{imax}}}\right) \quad \alpha_k := \ln\left(\frac{\underline{\tau_k}}{\underline{\tau_{kmax}}}\right) \quad \alpha_i = -0.465$$

$$\underline{h_k} := 5 \cdot 10^{-2} \quad \underline{x} := 0, 0.01 \dots 0.5 \quad \alpha_k = -2.544$$

$$\underline{m_k(x)} := 0.75 \cdot \underline{x} + 1.25 \cdot \underline{x}^2 + 0.26 \cdot \underline{x}^3 \quad \underline{t} := 0, 1 \dots \underline{t_{max}}$$

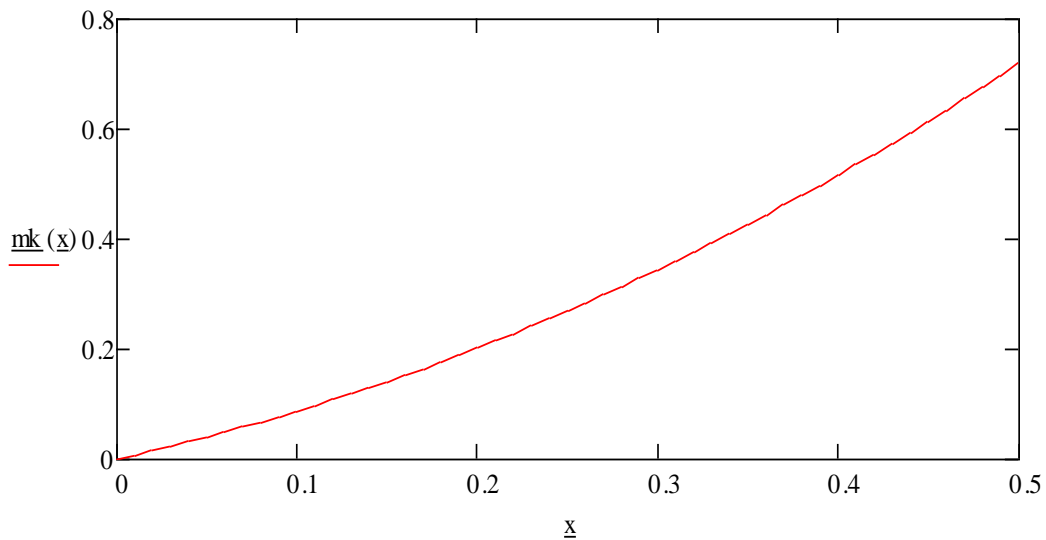
$$\underline{E1} := 0.0085 \cdot 10^{11} \quad \underline{E2} := 2.1 \cdot 10^{11} \quad \underline{E3} := \underline{E1}$$

$$\underline{I1} := \frac{\underline{h_k}^4}{12} \quad \underline{Ii(x)} := \underline{I1} \cdot (2.75 \cdot \underline{x} + 1.25 \cdot \underline{x}^2 + 3.3 \cdot \underline{x}^3)$$

$$\underline{Gi(x)} := \underline{E1} \cdot \underline{Ii(x)}$$

В расчетах считается боковая качка и относ, возникающие при движении электроподвижного состава.

На рисунке 2.5 представлен график изменения массы эквивалентного несущего каркаса пневморессоры



(упругая оболочка вместе с металлическим сетчатым каркасом) по длине X (в относительных единицах – выполнена аппроксимация по длине полиномом 3-ей степени) .

Рисунок 2.5 - График изменения массы эквивалентного несущего каркаса (упругая оболочка вместе с металлическим сетчатым каркасом) по длине X (в относительных единицах выполнена аппроксимация по длине полиномом 3-ей степени)

Момент инерции аппроксимируется также полиномом 3-ей степени, а все коэффициенты в уравнениях (2.53) – (2.56) усредняются по высоте h_k и вычисляются в интегральной форме (несущий эквивалентный каркас имеет переменную массу и момент инерции – для 2 и 3 задачи (п.2.3)) .

$$\underline{A11} := \frac{1}{\underline{hk}} \cdot \int_0^{\underline{hk}} \frac{\underline{mk}(x)}{\underline{Gi}(x)} dx$$

$$\underline{B2} := \underline{A11} \cdot (\alpha i)^2 \quad \underline{Ik} := \frac{I_1}{22}$$

$$\underline{Ik}(x) := \underline{Ik} \cdot (2.75 \cdot x + 1.25 \cdot x^2 + 3.3 \cdot x^3)$$

$$\underline{A22} := \frac{1}{\underline{hk}} \cdot \int_0^{\underline{hk}} \frac{\underline{Ik}(x)}{\underline{Gi}(x)} dx \quad \underline{Gk}(x) := \frac{gg \cdot \underline{Ik}(x)}{22} \quad gg := 0.00047 \cdot 10^{11}$$

$$\underline{B1} := 2\underline{B2} - \underline{A22} \cdot (\alpha i)^2 \quad \underline{B1} = 2.738 \times 10^{-4}$$

$$\underline{A33} := \frac{1}{\underline{hk}} \cdot \int_0^{\underline{hk}} \frac{\underline{Ik}(x)}{\underline{Gi}(x)} dx \quad \underline{A11} = 6.34 \times 10^{-4}$$

$$\underline{A22} = 5.348 \times 10^{-11}$$

$$\underline{A33} = 5.348 \times 10^{-11}$$

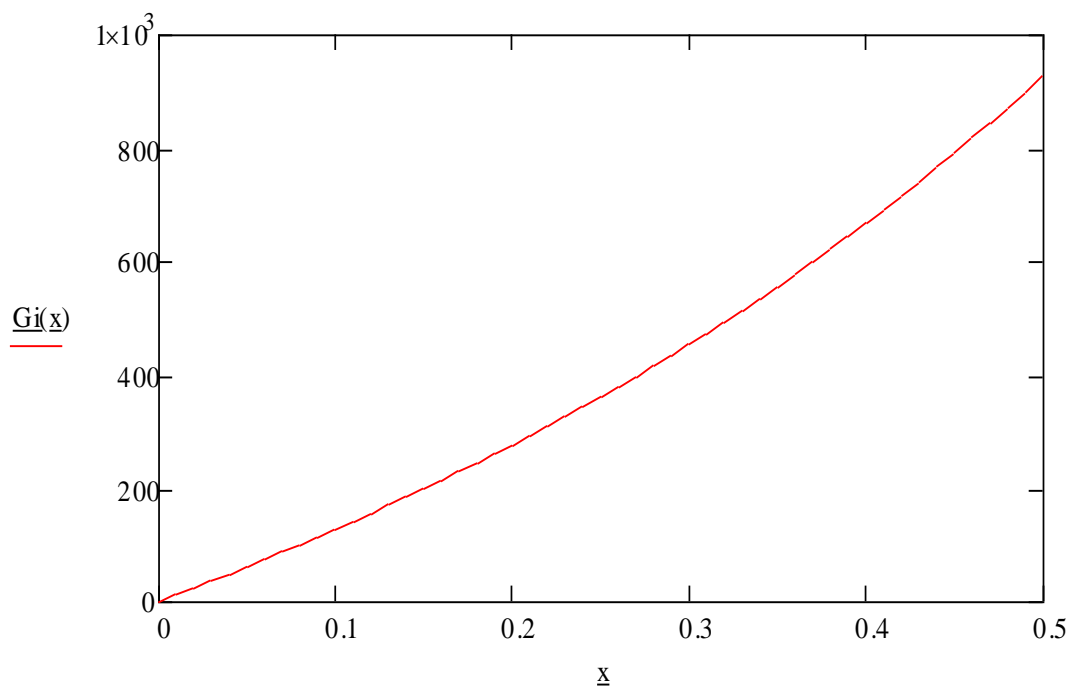


Рисунок 2.6 - График изменения момента инерции эквивалентного несущего каркаса (упругая оболочка вместе с металлическим сетчатым каркасом) по длине X (в относительных единицах - выполнена аппроксимация по длине полиномом 3-ей степени)

Далее вычисляются корни уравнений (2.65) - (2.66) :

$$\varrho_1 := \sqrt{1 + \frac{\underline{B}_1 \cdot \sqrt{\left| 1 - \frac{4 \cdot \underline{B}_2}{(\underline{B}_1)^2} \right| + 1}}{2}}$$

$$\varrho_2 := \sqrt{\underline{B}_1 \cdot \frac{\sqrt{\left| 1 - \frac{4 \cdot \underline{B}_2}{(\underline{B}_1)^2} \right|}}{2}}$$

$$\varrho_1 = 1.006$$

$$\varrho_2 = 0.108$$

с учетом граничных условий (2.62) :

- для заземленного сечения при $x=0$, $x= h_K$:

$$W_1(0) = \frac{dW_1(0)}{dx} = 0 ; \quad \frac{d^2 W_1(0)}{dx^2} = \ddot{W}_1 ; \quad \frac{d^3 W_1(0)}{dx^3} = \dddot{W}_1$$

$$\theta_1(0) = 0 ; \quad \frac{d\theta_1(0)}{dx} = \dot{\theta}_1.$$

$$\underline{Lk} := 2.6 \quad P0 := 5.2 \cdot 10^5$$

$$\underline{Mk} := \frac{2.35 \cdot 10^3 \cdot (\underline{hk})^2}{\underline{Lk}} \quad \nu := 0.5$$

$$\underline{CP1} := 2.85 \cdot 10^6 \quad \underline{CP2} := 2.55 \cdot 10^6 \quad \underline{CP3} := \underline{CP1}$$

$$\underline{d0} := \frac{P0}{\underline{Mk} \cdot \underline{CP1}} \quad \underline{d1} := \frac{\underline{d0}}{[(\underline{a1})^2 - (\underline{a2})^2] \cdot \underline{CP2}} \quad \underline{d2} := \frac{\underline{d0} \cdot \underline{a2}}{[(\underline{a1})^2 - (\underline{a2})^2] \cdot \underline{CP3}}$$

$$\underline{Ww1} := 1.25 \cdot 10^{-4} \quad \underline{Ww2} := 3.6 \cdot 10^{-3}$$

$$\underline{Dp} := \frac{\underline{E1} \cdot \underline{hk}^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}$$

$$\underline{Dp} = 1.181 \times 10^4$$

$$\underline{R1} := \frac{1}{[(\underline{a1})^2 - (\underline{a2})^2]} \quad \underline{R2} := \frac{\underline{d0}}{(\underline{a1})^2 \cdot (\underline{a2})^2} \quad \underline{R1} = 1$$

$$\underline{R2} = 6.902$$

$$\underline{R3}(x) := (\underline{a1})^2 \cdot ((1 - \cos(\underline{a2} \cdot x))) - (\underline{a2})^2 \cdot [[1 - \cos((\underline{a1} \cdot x))]]$$

$$\underline{R4}(x) := \cos(\underline{a1} \cdot x) - \cos(\underline{a2} \cdot x)$$

$$\underline{R5}(x) := \frac{\sin(\underline{a1} \cdot x)}{\underline{a1}} - \frac{\sin(\underline{a2} \cdot x)}{\underline{a2}}$$

$$\underline{R6}(x) := \frac{\sin(\underline{a1} \cdot x)}{(\underline{a1})^4} - \frac{\sin(\underline{a2} \cdot x)}{(\underline{a2})^4}$$

$$\underline{R7}(x) := \frac{x^2}{2(\underline{a1})^2} + \frac{[1 - \cos((\underline{a1} \cdot x))]}{(\underline{a1})^4} - \frac{[1 - \cos((\underline{a2} \cdot x))]}{(\underline{a2})^4}$$

$$\underline{W1}(x) := \underline{R1} \cdot (\underline{R2} \cdot \underline{R3}(x) + \underline{Ww1} \cdot \underline{R4}(x) + \underline{Ww2} \cdot \underline{R5}(x) + \underline{d1} \cdot \underline{R6}(x) + \underline{d2} \cdot \underline{R7}(x))$$

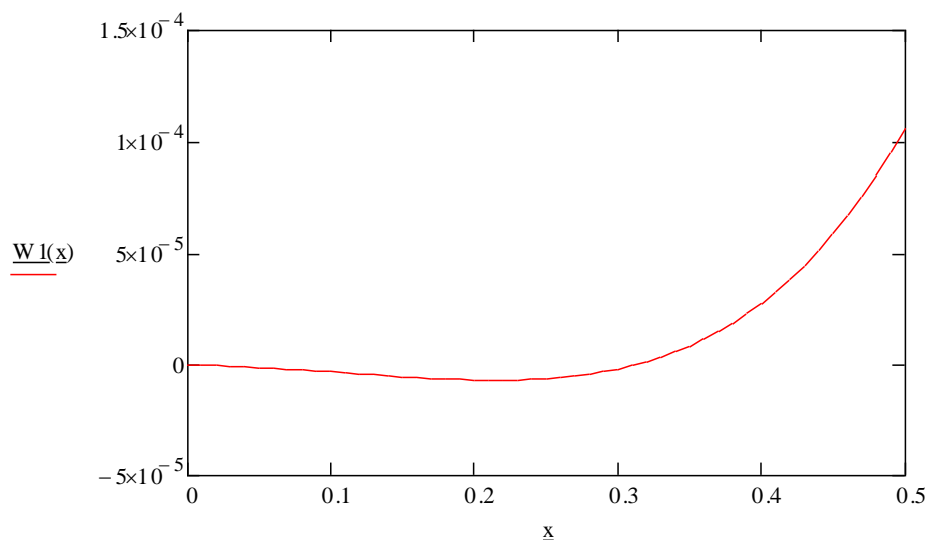


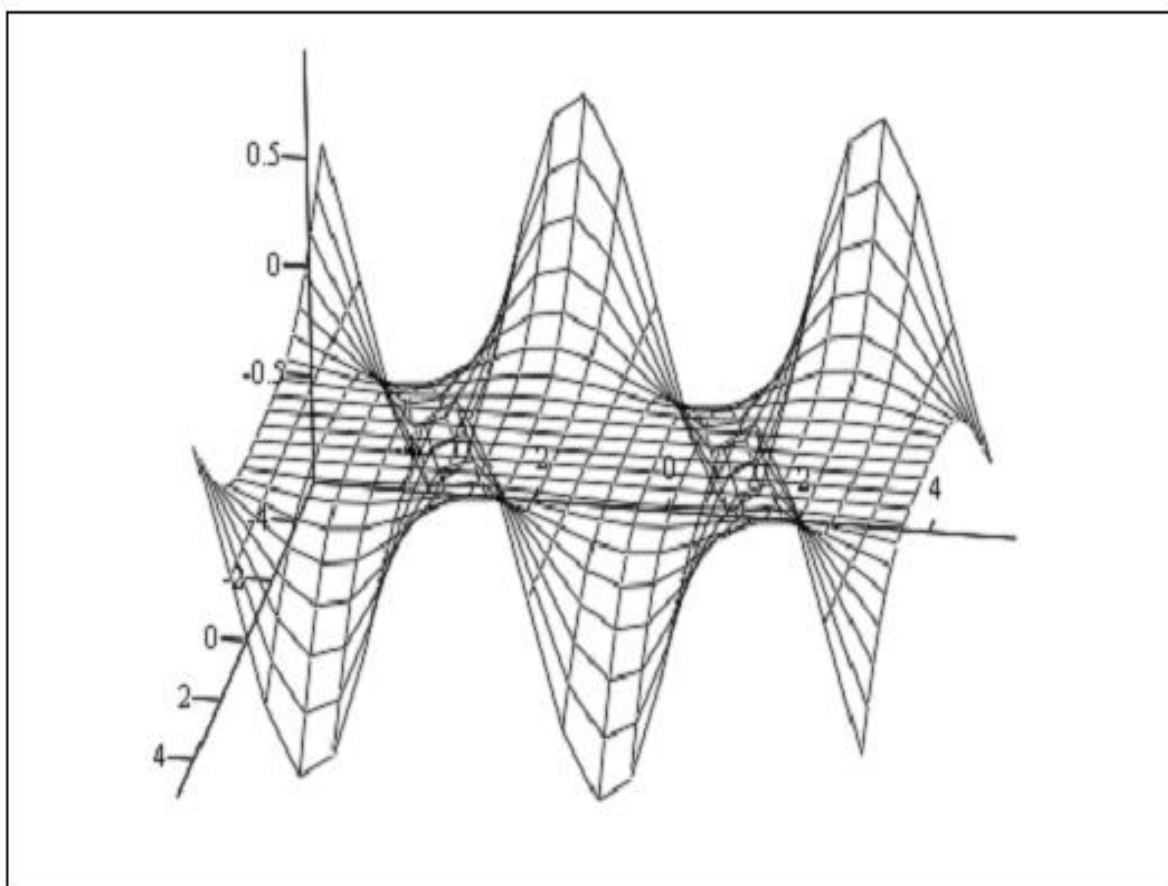
Рисунок 2.7 - График изменения поперечного смещения оболочки эквивалентного несущего каркаса

по длине X (в относительных единицах – выполнена аппроксимация по длине полиномом 3-ей степени) .

2 - задача (п.2.3) .

Нагружение упругого элемента оболочки в виде пластинки с металлическим сетчатым каркасом квазистатической нагрузкой, учитывающей увеличение статического нагружения за некоторый интервал времени τ_0 . Режим увеличения внутреннего давления в упругой оболочке (например, при ее заполнении воздушной смесью).

$$\underline{WW1}(x,t) := \underline{W1}(x) \cdot \underline{\sin}(\omega n \cdot t)$$



WW1

Рисунок 2.8 - График изменения собственных функций $WW1(X,t)$ пластинки эквивалентного несущего каркаса (упругая оболочка вместе с металлическим сетчатым каркасом)

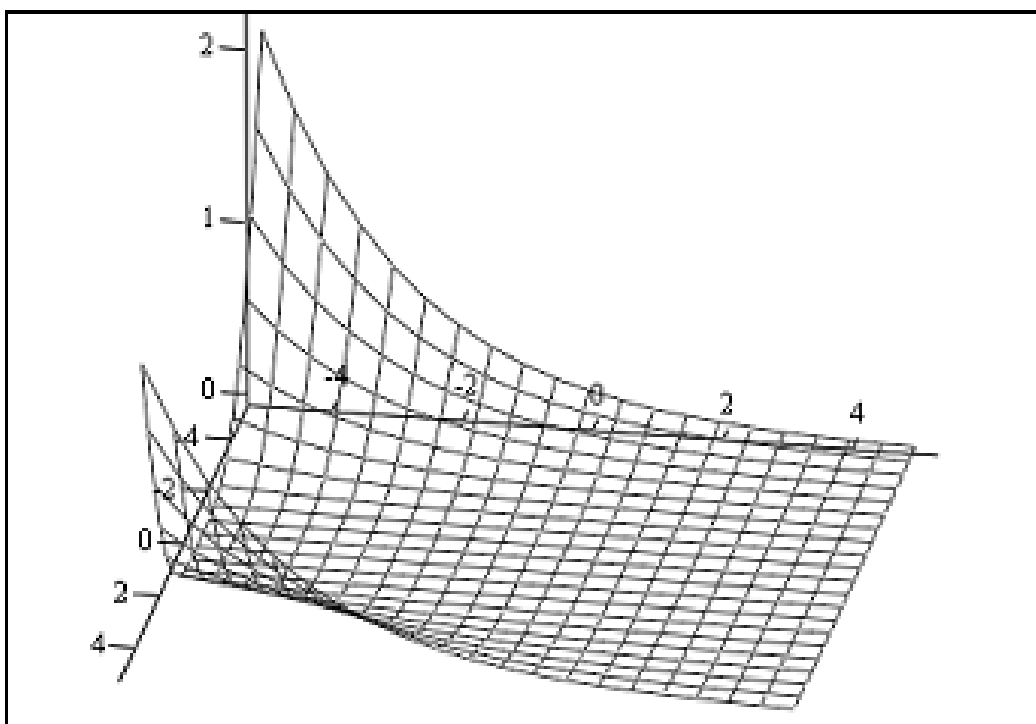
Для крутильных колебаний также вычисляются все необходимые параметры:

$$q_3 := \sqrt{|A_3 \cdot \alpha k^3|}$$

$$\theta_n := 1.75 \cdot 10^{-4} \quad q_3 = 1.888 \times 10^3$$

$$e_0 := 1.3 \cdot 10^4 \quad e_1 := 1.8 \cdot 10^{-5} \quad e_2 := 1.3 \cdot 10^{-6}$$

$$\underline{W_{k1}}(x, t) := \left(\underline{W_1}(x) \cdot e^{\alpha_i \cdot t} \right)$$



W_{k1}

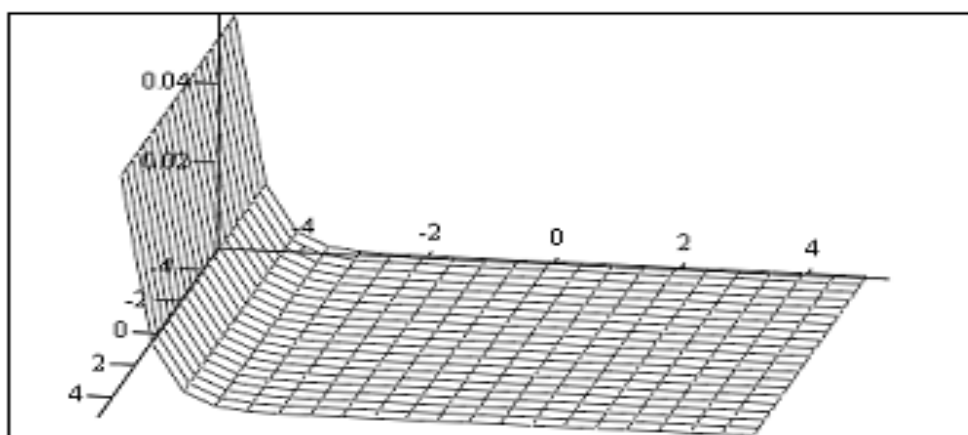
Рисунок 2.9 - График изменения динамических прогибов $W_{k1}(X, t)$ эквивалентного несущего каркаса (упругая оболочка вместе с металлическим сетчатым каркасом)

3 - задача.

Нагружение упругого элемента оболочки пневморессоры в виде пластинки с металлическим сетчатым каркасом гармонической нагрузкой (пункт 2.3).

Решения выполнены для условий разложения функций внешней динамической нагрузки в ряды, соответствующие гармоникам, возникающим при колебаниях вилы и галлопирования при движении электроподвижного состава.

$$\theta_{k1}(x, t) := 10^{-3} \theta_1(x) \cdot e^{\alpha_k \cdot t}$$



θ_{k1}

Рисунок 2.10 - График изменения динамических прогибов при кручении $\theta_{k1}(X, t) \cdot 10^{-3}$ м эквивалентного несущего каркаса (упругая оболочка вместе с металлическим сетчатым каркасом)

2.5 Выводы по главе 2

В результате аналитико-численных исследований, выполненных в главе 2, можно сделать следующие обобщающие выводы:

1. В данной главе решены 3 задачи с поэтапным усложнением теоретических моделей:

Задача 1. Исследование колебаний элемента мягкой (упругой) оболочки, зажатой ребрами жесткости (пункты 2.1, 2.2), в предположении системы с сосредоточенными массами.

Задача 2. Нагружение упругого элемента оболочки в виде пластинки с металлическим сетчатым каркасом квазистатической нагрузкой, учитывающей увеличение статического нагружения за некоторый интервал времени τ_0 (пункты 2.3, 2.4). Режим увеличения внутреннего давления воздушной смеси в упругой оболочке (например, при ее нагружении внешней нагрузкой).

Задача 3. Нагружение упругого элемента оболочки в виде пластинки с металлическим сетчатым каркасом гармонической нагрузкой (пункты 2.3, 2.4).

Решения выполнены для условий разложения функций внешней динамической нагрузки в ряды, соответствующие гармоникам, возникающим при колебаниях виляния и галлопирования при движении электроподвижного состава.

2. Для всех 3-х задач составлены алгоритмы, блок-схема и проведены численные исследования на ЭВМ. Для численных исследований используется среда MathCAD 13. В результате строятся графики по совместным колебаниям элемента упругой оболочки с металлическим сетчатым каркасом. Собственные частоты колебаний элементов пластинчатых упругой оболочки эквивалентного металлического каркаса из стержней (сетка), связанные с граничными условиями, находятся по частотным уравнениям в зависимости от условий закрепления узлов методом итераций. Численные исследования выполнялись на ЭВМ.

3. В данной главе разработан для исследования напряженно-деформированного состояния эластичной оболочки пневморессоры, заполненной воздухом под давлением, перспективный комплексный аналитико-численный метод с получением конечных результатов на ЭВМ. Нами разработана методика инженерного расчета гибких

оболочек пневморессор и облегченного решетчатого каркаса стержневого типа с подбором их рациональных параметров для электроподвижного состава на базе теоретических, экспериментальных и опытно-конструкторских разработок.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПНЕВМОРЕССОРЫ ЭЛЕКТРОВОЗА.

Предлагаемое изобретение относится к области подвижного состава железных дорог и может быть использовано для гашения колебаний рельсового транспортного средства, а именно, в системах виброзащиты локомотивов и подвижного состава.

Известен способ гашения вертикальных колебаний объекта с пневматической подвеской по Патенту Российской Федерации RU № 2 405 990, МПК F 16 F 15/023, F 9/05, (опубл. в Бюл. № 34, 10.12.2010 г.), включающий периодическое увеличение упругой силы пневматической подвески в начале каждого хода сжатия за счет подвода дополнительной массы газа и периодическое уменьшение упругой силы пневматической подвески в начале каждого хода отбоя за счет частичного отведения массы газа, согласно данному изобретению подвод массы газа в начале каждого хода сжатия осуществляют к дополнительному упругому элементу пневматической подвески от автономного источника энергии, в начале каждого хода отбоя осуществляет ее отведение из дополнительного упругого элемента в атмосферу.

Совпадающими признаками с заявляемым являются трубопроводы для подвода и отвода массы газа (воздуха), дополнительный упругий элемент пневматической подвески (у нас – резинокордная оболочка).

Недостатками известной конструкции является то, что такая конструкция предназначена для частичного гашения только вертикальных колебаний пневматической подвеской (в нашей предлагаемой конструкции можно будет гасить как вертикальные, так и горизонтальные колебания экипажа), кроме того она обладает низкой эффективностью демпфирования (гашения колебаний).

Также известен пневматический упругий элемент по Патенту Российской Федерации RU № 2 413 103, МПК F 16 F 9/04 (опубл. в Бюл. № 28, 27.02.2011 г.), содержащий основной упругий элемент, содержащий резинокордную оболочку, рабочую и дополнительную емкости и расположенную между ними перегородку с калиброванным отверстием и с отверстиями, перекрываемыми свободно лежащей диафрагмой при ходе отдачи, а также из вспомогательного упругого элемента, содержащего вспомогательную резинокордную оболочку, вспомогательные рабочую и дополнительные емкости и расположенную между ними вспомогательную перегородку с калиброванным отверстием и с отверстиями, перекрываемыми свободно висящей диафрагмой при ходе сжатия, и стоек, связывающих амортизируемый объект с пневматическим упругим элементом, согласно данному изобретению рабочие емкости основного и вспомогательного упругих элементов заключены во внешний неподвижный цилиндрический стакан, внутри которого располагается внутренний подвижный цилиндрический стакан, служащий общей дополнительной емкостью основного и вспомогательного упругих элементов, причем в центральной части внешнего неподвижного цилиндрического стакана выполнен ряд направляющих пазов, через которые амортизируемый объект жестко связан с Г-образными стойками с внутренним подвижным цилиндрическим стаканом.

Совпадающими признаками с заявляемым является основной упругий элемент, содержащий резинокордную оболочку, сообщенную с дополнительным резервуаром через трубопровод, установленное в нем дросселирующее устройство (перегородка с калиброванным отверстием и с отверстиями, перекрываемыми свободно висящей диафрагмой при ходе сжатия).

Недостатками известной конструкции является то, что такая конструкция предназначена для частичного гашения только вертикальных колебаний пневматической подвеской (в нашей предлагаемой конструкции можно будет гасить как вертикальные, так и горизонтальные колебания экипажа), кроме того она обладает низкой эффективностью демпфирования (гашения колебаний).

Наиболее близкой по технической сущности к заявляемому является пневморессора железнодорожного экипажа, содержащая прикрепленную к разнесенным по высоте плитам резинокордную оболочку, сообщенную с дополнительным резервуаром через трубопровод, установленное в нем дросселирующее устройство и размещенный в полости резинокордной оболочки кольцевой упругий элемент, при этом отношение объема кольцевого упругодеформируемого элемента, выполненного торообразным, к объему резинокордной оболочки в их свободном состоянии равно 0,78.

Совпадающими признаками с заявляемым является прикрепленная к разнесенным по высоте плитам резинокордную оболочку, сообщенная с дополнительным резервуаром через трубопровод, установленное в нем дросселирующее устройство и размещенный в полости резинокордной оболочки кольцевой упругий элемент.

Недостатками данной конструкции является достаточно низкая демпфирующая способность пневморессоры, в связи с этим низкая эффективность работы рессорного подвешивания, невозможность гашения высокочастотных динамических нагрузок, в целом более низкая по сравнению с заявляемым плавность хода железнодорожного экипажа и надежность всего узла в целом.

Задачей изобретения является повышение эффективности работы пневморессоры за счет улучшения её демпфирующих характеристик, возможность гашения как низкочастотных, так и

высокочастотных динамических нагрузок, повышение плавности хода экипажа, повышение надежности и долговечности работы в целом всего локомотива и подвижного состава.

Поставленная задача решается тем, что внутри упругодеформируемого элемента торообразной формы установлен полый кольцевой упругий элемент, в полости которого находится спиральная пружина трубчатого сечения, при этом внутри трубчатого сечения которой расположен упругий элемент, например, сырая резина или резиновый наполнитель, а с двух сторон на спиральной пружине установлены заглушки, причем одна заглушка находится в центре спиральной пружины, а другая расположена на её конце и жестко фиксирована к внутренней стенке полого кольцевого упругого элемента.

Решение поставленной задачи позволит получить технический результат в виде повышения эффективности работы пневморессоры за счет улучшения её демпфирующих характеристик, повышение плавности хода экипажа, продление срока службы и улучшение безопасной работы всего рессорного подвешивания локомотива и подвижного состава.

На рисунке 3.1. показана пневморессора железнодорожного экипажа (поперечный разрез).

Пневморессора железнодорожного экипажа состоит из резинокордной оболочки баллонного типа 1, герметизированная снизу плитой 2 и сверху крышкой 3. Края оболочки прижаты к нижней плите 2 с помощью фланца 4 и болтов 5 и к верхней крышке 3 при помощи кольца 6 и болтов 7. Сверху на крышку 3 через пластину 8 опираются пять резинометаллических элементов 9, на которые передается нагрузка от кузова локомотива. Во внутренней полости пневморессоры расположен упругодеформируемый элемент торообразной формы 10. В плиту 2 вварен корпус 11 золотникового

устройства с отверстиями для прохода воздуха, внутрь которого запрессован цилиндрический двухконусный дроссель 12 и втулка 13 с отверстиями для прохода воздуха направляющего стержня 14. Верхний конец стержня 14 крепится к крышке 3 при помощи крышки 15, имеющей отверстие, болтов 16 и кольца 17 таким образом, что возможны поперечные перемещения стержня 14 относительно крышки 3. На нижнем конце стержня 14 помещена двухконусная втулка 18 с утолщением в центре, перемещающаяся между упорами. На корпус 11 накручен штуцер 19, уплотненный прокладкой 20, для подсоединения трубопровода 21 с гайкой 22 к дополнительному резервуару и подачи сжатого воздуха в полость пневморессоры. Внутри упругодеформируемого элемента торообразной формы 10 установлен полый кольцевой упругий элемент 23, в полости 25 которого находится спиральная пружина трубчатого сечения 24, при этом внутри трубчатого сечения которой расположен упругий элемент, например, сырая резина или резиновый наполнитель. С двух сторон на спиральной пружине 24 установлены заглушки 26. Одна заглушка 26 находится в центре спиральной пружины 24, а другая расположена на её конце и жестко фиксирована к внутренней стенке полого кольцевого упругого элемента 23.

Пневморессора железнодорожного экипажа работает следующим образом.

В виброзащитной системе локомотивов, вагонов и электроподвижного состава нижняя плита 2 устанавливается обычно на раме тележки, а кузов (обрессоренная масса) через резинометаллические элементы 9 опирается на крышку 3. При прохождении неровностей железнодорожного пути возникают вертикальные и горизонтальные колебания кузова на пневморессорах. При перемещении кузова, например, вниз, верхняя

крышка 3 будет сближаться с нижней плитой 2 за счет деформации резинокордной оболочки 1. В результате этого появляется разность давлений между объемом внутри пневморессоры и объемом в дополнительном резервуаре, причем в последнем давление будет меньше. Под действием перепада давлений сжатый воздух устремляется из полости пневморессоры по дроссельному каналу 12 и далее по трубопроводу 21 в дополнительный резервуар 23, а двухконусная втулка 18 на направляющем стержне 14 будет регулировать поток воздуха и тем самым вертикальную диссипативную силу демпфирования. При этом двухконусная втулка 18 в самом начале сближения днищ пневморессоры будет переброшена потоком воздуха вниз до упора, благодаря чему в начальный момент проходное сечение дроссельного канала будет минимальным, что приведет к интенсивному росту давления в пневморессоре. Однако при подходе днищ к среднему положению утолщенная в центре двухконусная втулка 18 будет перемещаться своим наибольшим сечением в расширяющемся конусе цилиндрического двухконусного дросселя 12, увеличивая при этом его проходное сечение. Поджатый в пневморессоре воздух устремится в дополнительный резервуар и при подходе днищ к нижнему положению давление в пневморессоре и дополнительном резервуаре сравняется вследствие широкого канала в дросселе.

Благодаря торообразному упругодеформируемому элементу 10, расположенному внутри пневмооболочки, в дополнительный резервуар вытесняется большая часть сжатого воздуха (элемент 10 значительно уменьшает "мертвый" объем внутри резинокордной оболочки 1).

При обратном движении кузова верхняя крышка 3 будет удаляться от нижней плиты 2. Давление в пневморессоре будет уменьшаться и легкая двухконусная втулка 18 будет переброшена вверх до упора

потоком воздуха, идущим из дополнительного резервуара 23 в пневморессору, благодаря чему в начальный момент проходное сечение дроссельного канала будет минимальным, что приведет к интенсивному росту разрежения в пневморессоре. Однако при подходе днищ к среднему положению втулка 18 будет перемещаться в расширяющемся конусе цилиндрического двухконусного дросселя 12, увеличивая при этом его проходное сечение. Из-за разности давлений воздух устремится из дополнительного резервуара 23 по трубопроводу 21 в пневморессору и при подходе днищ к верхнему положению давление в дополнительном резервуаре и в пневморессоре выровняется благодаря широкому каналу в дросселе.

Кроме того, спиральная пружина трубчатого сечения 24, находящаяся внутри полого кольцевого упругого элемента 23 совместно с упругим элементом, расположенным внутри трубчатого сечения, будет деформироваться, тем самым появиться дополнительный демпфирующий эффект, т.е. повысится демпфирующая способность пневморессоры, а, значит, повысится эффективность ее работы.

Таким образом, предлагаемая конструкция пневморессоры железнодорожного экипажа обладает повышенной способностью демпфирования, способна гасить как низкочастотные, так и высокочастотные динамические нагрузки, повышает плавность хода экипажа, создает условия для повышения надежности и долговечности работы в целом всего локомотива и подвижного состава.

Благодаря высокой степени демпфирования данная конструкция пневморессоры может найти широкое применение на подвижном составе железных дорог.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Пневморессора железнодорожного экипажа, содержащая прикрепленную к разнесенным по высоте плитам резинокордную оболочку, сообщенную с дополнительным резервуаром через трубопровод, установленное в нем дросселирующее устройство и размещенный в полости резинокордной оболочки кольцевой упругий элемент торообразной формы, отличающаяся тем, что внутри упругодеформируемого элемента торообразной формы установлен полый кольцевой упругий элемент, в полости которого находится спиральная пружина трубчатого сечения, при этом внутри трубчатого сечения которой расположен упругий элемент, например, сырая резина или резиновый наполнитель, а с двух сторон на спиральной пружине установлены заглушки, причем одна заглушка находится в центре спиральной пружины, а другая расположена на её конце и жестко фиксирована к внутренней стенке полого кольцевого упругого элемента.

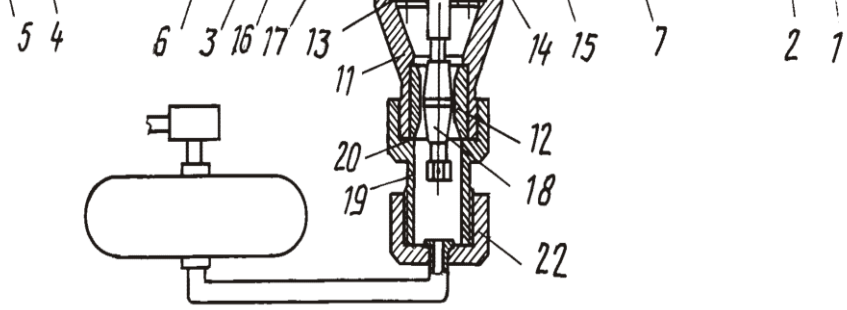


Рисунок 3.1. - Пневморессора (поперечный разрез)
предлагаемой нами конструкции

ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

1. Нами в данной диссертации предлагается новая конструкция пневморессоры для транспортного средства с улучшенной характеристикой динамического демпфирования и обеспечением автоматического регулирования амплитудно-частотными характеристиками. Пневматические резино-кордные упругие элементы послужили основой для создания новых типов регулируемых подвесок с автоматически управляемыми параметрами. Поэтому вопросы повышения надежности работы имеющихся в эксплуатации локомотивов и вагонов пневматических упругих элементов (типа рессор) путем модернизации отдельных конструктивных узлов при капитальном ремонте с продлением срока полезного использования, являются актуальными.

2. Разработана динамическая модель пневморессоры для исследования продольных колебаний системы упругой оболочки в виде пластинки с металлическим сетчатным каркасом. Методом Лагранжа и с методом Рунге – Кутты уравнения колебаний системы с 2-мя упругими оболочками, зажатыми ребрами жесткости (для упругой вкладной емкости пневморессоры с металлическим каркасом).

3. Составлен алгоритм для численных исследований по предлагаемой модели и проведены численные исследования продольных колебаний системы упругих цилиндрических оболочек с учетом влияния пульсирующих потоков рабочей среды для пневморессоры с продлением срока службы и улучшением упруго-диссипативных свойств подвески.

4. В результате построены графики по совместным колебаниям элемента упругой оболочки, армированной металлическими стержнями, типа пневматических рессор электровозов.

5. Созданную методику расчета по подбору рациональных параметров пневморессоры можно широко использовать при проектировании новых конструкций в транспортном машиностроении.

6. Разработана модернизированная конструкция пневморессоры электровоза с оформлением заявки на изобретение на Патент Республики Узбекистан (№ IAP 20120176, Дата подачи заявки на изобретение 11.05.2012 г.) []. Задачей предлагаемого нами изобретения является повышение эффективности работы пневморессоры, его надёжности и долговечности.

Поставленная задача будет решаться тем, что внутри упругодеформируемого элемента торообразной формы установлен полый кольцевой упругий элемент, в полости которого находится спиральная пружина трубчатого сечения, при этом внутри трубчатого сечения которой расположен упругий элемент, например, сырая резина или резиновый наполнитель, а с двух сторон на спиральной пружине установлены заглушки, причем одна заглушка находится в центре спиральной пружины, а другая расположена на её конце и жестко фиксирована к внутренней стенке полого кольцевого упругого элемента

Решение поставленной задачи позволит получить технический результат в виде повышения эффективности работы пневморессоры, за счет улучшения её демпфирующих характеристик, повышение плавности хода экипажа, продление срока службы и улучшение безопасной работы всего рессорного подвешивания локомотива и подвижного состава.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каримов И.А. Мировой финансово-экономический кризис, пути и меры по его преодолению в условиях Узбекистана. / И.А. Каримов.- Т.: Узбекистан, 2009.- 48 с.
2. Механическая часть подвижного состава. / Под ред. И.С. Бирюкова, А.Н. Савоськина и др. М.: Транспорт, 1992 . – 440 с.
3. Пневматический упругий элемент. Патент России № RU 2 428 602 С2, опубликован 10.09.2011 г., Бюл. № 25.
4. Рессора малого сопротивления. Патент России № RU 2 409 481 С1, опубликован 20.01.2011 г., Бюл. № 2.
5. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель – поездам. / Под ред. А.И. Тищенко, Т.1, М.: Транспорт, 1976. – 432 с.
- 6. Соколов М.М. , Варава В.И. , Левит Г.М. , Гасители колебаний подвижного состава. Справочник. М. : Транспорт, 1985. – 216 с.**
7. Хромов С.А. Новый гаситель колебаний с перераспределением энергии гашения и его математическая модель./ Журнал «Наука и образование Южного Казахстана», Республиканский научный журнал, серия «Механика и машиностроение», г. Шымкент, ЮКазГУ, 2006, № 7 (56), с. 125÷129.
8. Вольмир А.С. Оболочки в потоке жидкости и газа (задачи аэроупругости).- М: Наука, 1976. – 416 с.
9. Хромова Г.А. Динамика систем с гибкими рабочими звеньями и приводами с импульсным и пульсирующим потоком рабочей жидкости. Автореферат дисс. д.т.н. М.: МГСУ , 1994.- с.48.
10. Корн Г. , Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров . М.: Наука , 1978. - с.576 .
11. Херхагер М., Партолль Х. Mathcad 2000. Полное руководство. Перевод с немецкого под ред. К.Ю. Королькова. ВНУ, Киев, 2000.- 400 с.

12. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. - М.: Машиностроение, 1977.-232 с.

13. Дьяконов В.П. Энциклопедия Mathcad 2001i и Mathcad 11.- М.: Солон-Пресс, 2004. – 832 с.

14. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad. Учебный курс. – СПб.: Питер, 2003.- 448 с.

15. Упругий элемент. Предварительный Патент Республики Узбекистан на изобретение № 05219. Авторы: Хромова Г.А., Глущенко А.Д., Ибрагимов М.А., Худайкулиев Р.Р., Пулатов Ш.А., Оpubл. В БИ № 3, 30.05. 2002 г.

16. Хромова Г.А. Разработка метода расчета на динамическую прочность упругих криволинейных поверхностей сложной конфигурации.// Журнал «Вестник ЮКазГУ», серия «Машиностроение», 2007, № 2, С. 43-45.

17. Хромова Г.А., Ибрагимов М.А., Шаров В.Д. Основы инженерной и научной работы: Учебное пособие.-М.: РГОТУПС, 2007.- 115 с.

18. P. Eckwert, J. Frohn. Glasers Annalen, Упругие опорные элементы подвижного состава. Журнал «Железные дороги мира», 2004, № 1/2, S. 48

19. (Интернет - сайт: [ЖДМ-online • Информационная служба журнала, www. GDM-online.ru](http://www.GDM-online.ru)).

20. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. 8-е изд., М.: Наука, 1979. – 560 с.

21. Бабаков И.М. Теория колебаний .- М.: Наука , ГРФМЛ , 1965.- 559 с.

22. Основы моделирования динамики подвижного состава электрического транспорта. Методические указания по выполнению практических занятий для магистрантов-электромехаников. // Авторы: Хромова

Г.А., Соболев С.В., Салимжанов С.М. Препринт, ТашИИТ, 2008. – 42 с.

23. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка, 1975.- 704 с.

24. Васильев В.З. Краткий курс сопротивления материалов с основами теории упругости: Учебное пособие. – СПб.: Иван Федоров.2001.-256 с.

25. Пневморессора электровозов. Авторы: Хромова Г.А., Уринбаева Г.А., Хромов С.А. Заявка на Патент Республики Узбекистан на изобретение № IAP 20120176, подана 11.05.2012 г.

26. Уринбаева Г.А. Научный руководитель: проф. Г.А. Хромова. Техник йуналишдаги бакалавр талабалар талабалар учун математик моделлаштириш фанидан укитиш хусусиятлари. В сборнике VIII межвузовской научно-методической конференции студентов магистратуры, стажеров и соискателей Посвященной 80-летию ТашИИТ «Актуальные проблемы научно-педагогической работы», (25 ноября 2011 года, ТашИИТ).

27. Уринбаева Г.А. Научный руководитель: проф. Г.А. Хромова. Новая конструкция пневморессоры электроподвижного состава упругими демпфирующими элементами. В сборнике трудов X Межвузовской научно-практической конференции студентов, бакалавров и магистратуры, стажеров и соискателей «Молодой научный исследователь», (3-4 апреля 2012 года), ТашИИТ.

28. Уринбаева Г.А. Научный руководитель: проф. Г.А. Хромова. Применение виртуальных технологий при выполнении практических работ по предмету САПР в бакалавриате. IX межвузовской научно – методической конференции студентов магистратуры, стажеров-

исследователей-сосискателей «Актуальные проблемы научно-педагогической работы» (30 ноября 2012 года), ТашИИТ.

29. Уринбаева Г.А. Научный руководитель: проф. Г.А. Хромова. Исследование совместных колебаний прямоугольного элемента упругой оболочки пневморессоры в виде пластинки с сеточным каркасом. Научные труды республиканской научно-технической конференции с участием зарубежных учённых «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» (5-6 декабря 2012 года).

30. Уринбаева Г.А. Научный руководитель: проф. Г.А. Хромова. Исследования упругой оболочки пневморессоры в виде пластинки с сеточным каркасом. XI Межвузовская научно-практическая конференция студентов бакалавриата и магистратуры, стажеров-исследователей-сосискателей «Молодой научный исследователь» (2-3 апреля 2013 г).