

0- 792225

На правах рукописи



Сибгатуллин Камиль Эмерович

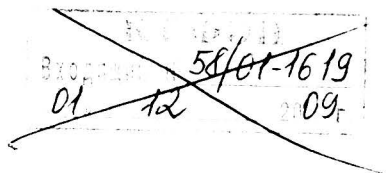
**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ
НЕСУЩИХ СИСТЕМ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ
С УЧЕТОМ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ**

**Специальность 05.05.03 – Колесные и гусеничные
машины**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Набережные Челны – 2009 г.



Диссертация выполнена в Камской государственной инженерно-экономической академии

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор
Шибakov Владимир Георгиевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Филькин Николай Михайлович

доктор технических наук, профессор
Шефер Леопольд Анатольевич

Ведущая организация: Научно-технический центр
открытого акционерного общества
«Камский автомобильный завод»
(НТЦ ОАО «КАМАЗ»)

Защита состоится **26 декабря 2009** года в **10⁰⁰** часов на заседании диссертационного совета Д 212.309.01 в Камской государственной инженерно-экономической академии по адресу: 423810, г. Набережные Челны, проспект Мира, 68/19, тел. (8552) 396629.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Камской государственной инженерно-экономической академии.

Автореферат разослан «25» ноября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор

Симонова Л. А.



0-792225

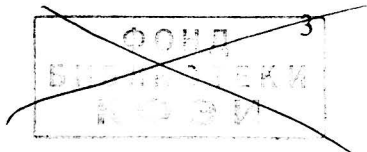
Общая характеристика работы

Актуальность исследований. Многие конструктивные элементы грузовых автомобилей (типа КАМАЗ-65115, КАМАЗ-6520 и т. д.) могут быть представлены как стержни и стержневые системы (рама с надрамником, рессора, карданный вал и т.п.). Необходимость дальнейшего совершенствования этих конструкций (повышение их ресурса, снижение массы изделия и т. д.) обуславливает необходимость развития методов их расчета и проектирования. Существующие в настоящее время программные комплексы для ЭВМ, предназначенные для расчетов стержневых систем на прочность, базируются, как правило, на упругой модели деформируемого твердого тела. С другой стороны, коммерческие программные комплексы используются, в основном, как «черные ящики», т. е. их применяют, не особо вникая в принципы, заложенные в их основу, и не имея возможности модернизировать их в соответствии с изменяющейся расчетной практикой. Поэтому **актуальными** являются решения следующих проблем: 1. Развитие новых методов расчета стержневых систем, позволяющих более реалистично оценивать их запас прочности, степень участия конструктивных элементов в работе, что является основой повышения экономичности изделий при обеспечении их надежности. 2. Создание алгоритмов и программ для ЭВМ, альтернативных существующим расчетным комплексам, позволяющих сопоставлять результаты расчетов одних и тех же изделий различными методами. При этом возможность понимания инженером-расчетчиком идеологической базы расчетных моделей имеет немаловажное значение.

Расчеты на прочность стержней и стержневых систем автомобилей (рамы с надрамником, рессоры, карданного вала и т. д.) с учетом пластических деформаций позволяют более реалистично оценивать их запас прочности и несущую способность изделия в целом, создавать равнопрочные конструкции, экономить металл, повышать показатели конкурентоспособности и экономичности продукции.

Объектом исследований является несущая рама с надрамником самосвала КАМАЗ-65115, а предметом исследований – новые методы определения прочности стержней и оценки несущей способности стержневых систем.

Цель исследований – исследование несущей способности рамы с надрамником самосвала КАМАЗ-65115; для решения этой проблемы – создание методов расчета на прочность стержней и стержневых систем с



учетом пластических деформаций, реализация этих методов в виде алгоритмов и комплекса программ для ЭВМ.

Задачи исследований. Сформулированная цель определила следующие задачи диссертационной работы:

- определить несущую способность и коэффициент запаса прочности рамы с надрамником самосвала КАМАЗ-65115, выяснить перспективу использования разработанных методов для создания рационального проекта исследуемого объекта.

Для решения этой основной задачи:

- разработать метод определения прочности стержней произвольного поперечного сечения (изотропных, анизотропных) в общем случае их сложного сопротивления;

- разработать метод оценки несущей способности стержневых систем (рам, ферм) при произвольной конфигурации этих систем и действующих на них нагрузок;

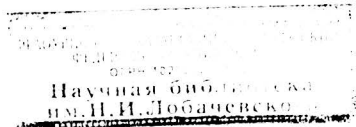
- создать и реализовать алгоритмы на базе вышеупомянутых методов (как вычислительный комплекс для ЭВМ).

Методы исследований: использованы теория пластичности (ассоциированный закон текучести, постулат Друккера), теория предельного равновесия (кинематический метод оценки несущей способности конструкций), вычислительная математика (аппарат линейного программирования), вычислительные эксперименты.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие результаты, имеющие научную новизну и которые выносятся на защиту:

- исследована несущая способность рамы с надрамником самосвала КАМАЗ-65115 при «симметричном» и кососимметричном статических нагружениях, определены соответствующие коэффициенты запаса, сформулированы рекомендации для получения рационального проекта исследуемого объекта. Все известные соответствующие результаты в этой области получены с использованием метода допускаемых напряжений; в диссертационной работе получены результаты, соответствующие методу расчета по разрушающим нагрузкам. Для решения этой основной задачи:

- разработан метод определения прочности изотропных, анизотропных стержней в общем случае их сложного сопротивления (когда в поперечных сечениях стержней действуют три силы и три момента). Формы стержней и их поперечных сечений – произвольные. Нагрузки – кратковременные статические и многоцикловые. В такой



общей постановке рассматриваемая задача до сих пор не была решена;

- разработан метод оценки несущей способности стержней и стержневых систем (рам, ферм), встречающихся, в частности, в расчетной схеме конструкции грузовых автомобилей. Конфигурации стержневых систем и активных внешних сил – произвольные. Предлагаемый метод является развитием известного кинематического метода теории предельного равновесия;

- созданы и реализованы оригинальные алгоритмы на базе вышеупомянутых методов (как вычислительный комплекс для ЭВМ);

- получены численные результаты и составлены графики, позволяющие оценивать прочности определенных стержней сложного поперечного сечения (в том числе – стержней рамы с надрамником автомобиля КАМАЗ-65115) при их сложном сопротивлении.

Достоверность и обоснованность. Достоверность результатов и их обоснованность обеспечена корректным использованием основных положений теории пластичности, теории предельного равновесия, вычислительной математики, проверкой работы комплекса разработанных алгоритмов и программ для ЭВМ путем решения множества тестовых задач с его использованием. Некоторые результаты расчетов по предлагаемым методам рамы с надрамником самосвала КАМАЗ-65115 сопоставлены с соответствующими экспериментальными и расчетными данными других авторов. Результаты, полученные с использованием предлагаемых методов, и соответствующие экспериментальные данные других исследователей, хорошо согласуются между собой.

Практическая ценность. Внедрение в практику проектирования разработанных методов, алгоритмов и программ для ЭВМ позволит реалистичнее оценивать коэффициент запаса несущих систем автомобиля, создавать более рациональные конструкции как с точки зрения обеспечения их надежной работы, так и по стоимостным показателям. Также ценность для практики проектирования имеет то, что предлагаемые методы позволяют получать соответствующие картины разрушения рамы с надрамником при варьировании как его геометрических параметров, так и действующих на конструкцию нагрузок (эксперименты, предусматривающие доведение рамы с надрамником грузового автомобиля до разрушения, являются высокотратными).

Реализация результатов работы. Разработанные методы расчетов переданы в НТЦ ОАО «КАМАЗ» для расчетов и проектирования

стержневых систем грузовых автомобилей (рамы с надрамником, рессоры, карданного вала и т.п.). Они также используются в учебном процессе при подготовке дипломированных инженеров в Камской государственной инженерно-экономической академии по специальности «Автомобиле- и тракторостроение».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены: на Межрегиональной научно-практической конференции «Студенческая наука в России на современном этапе» (г. Набережные Челны, 2008 г.); на Всероссийской научно-практической конференции «Наука и профессиональная деятельность» (г. Нижнекамск, 2008 г.); на Международной молодежной конференции «XVI Туполевские чтения» (г. Казань, 2008 г.); на 1-ой Межрегиональной научно-практической конференции «Камские чтения» (г. Набережные Челны, 2009 г.); они были доложены и обсуждены на заседаниях кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Камской государственной инженерно-экономической академии.

Личный вклад соискателя. Лично соискателем: 1) выполнены расчеты по определению несущей способности (коэффициента запаса прочности) при статическом нагружении рамы с надрамником самосвала КАМАЗ-65115, даны некоторые рекомендации по использованию разработанных методов для получения рационального проекта изделия. Для решения этой основной задачи: 2) освоены и эффективно применены новые методы решения актуальных научно-технических задач, основанные на синтезе таких областей знаний, как теория пластичности, теория предельного равновесия, математическое моделирование сложных прикладных задач с использованием современных методов вычислительной математики и средств вычислительной техники; 3) разработаны алгоритмы и созданы соответствующие программы для ЭВМ, позволяющие определять характеристики прочности стержней произвольного поперечного сечения в общем случае их сложного сопротивления (рассматриваются квазистатические и многоцикловые нагружения, изотропные и анизотропные материалы); 4) разработаны алгоритмы и созданы соответствующие программы для ЭВМ, позволяющие оценивать несущую способность стержней и стержневых систем на базе кинематического метода теории предельного равновесия.

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 13 научных трудах, в том числе 2 статьи в журналах из списка, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа

изложена на 151 страницах текста, в том числе 83 рисунок, 43 таблицы; состоит из введения, 4 главы, заключения и выводов, списка использованной литературы (119 наименований).

Содержание работы.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы научная проблема, цель, научная новизна, практическая значимость работы, основные результаты, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор литературы в тех областях науки, к которым имеют определенное отношение решаемые в диссертационной работе задачи.

Расчетом несущих элементов автомобильных конструкций на прочность при различных воздействиях внешних нагрузок занимались Е. А. Чудаков, В. Г. Шевченко, Т. В. Астахова, Н. Н. Фролов, А. Д. Фурсина, А. Л. Клейнерман, П. П. Капуста, Х. А. Фасхиев, Н. М. Филькин, Л. А. Шефер и др.

Расчетом на прочность рамы с надрамником самосвалов занимались Д. Б. Гельфгат, В. А. Ошноков, В. Б. Проскуряков, В. Н. Белокуров, М. Н. Закс, А. А. Захаров, С. К. Карцов, П. Д. Павленко, D. Fucha и др.

На основе анализа соответствующей научной литературы делается вывод о том, что задача определения несущей способности стержней и их систем (рам, ферм), в общем случае сложного сопротивления стержней, к настоящему времени, в общем виде, не решена. Это не позволяет, в частности, реально оценивать несущую способность (коэффициент запаса прочности) таких ответственных элементов конструкций, как рама с надрамником грузового автомобиля. Использование аппарата теории пластичности при расчете и проектировании высоконагруженных стержневых элементов автомобильных конструкций сдерживается, в основном, относительной сложностью этого аппарата. Поэтому развитие методов определения прочности стержней, в общем случае их сложного сопротивления, оценки несущей способности сложных стержневых систем, при произвольных конфигурациях их нагружения, разработка соответствующих алгоритмов расчета и программ для ЭВМ, иллюстрация их эффективности (с целью внедрения их в расчетную практику) является актуальной задачей.

Приведены также сведения из теории пластичности, теории предельного равновесия (понятие о поверхности нагружения, постулат Друккера, ассоциированный закон деформирования, статический и кинематический методы теории предельного равновесия и т. д.). На них

базируются оригинальные методы и алгоритмы, разрабатываемые соискателем и излагаемые в последующих главах диссертации. Отмечено, что из теории пластичности использованы результаты соответствующих работ Д. Друккера, М. И. Ерхова, А. А. Ильюшина, Л. М. Качанова, Р. Мизеса, Ю. Н. Работнова, Г. Треска, Ф. Г. Ходжа и др. Из теории предельного равновесия использованы соответствующие работы А. А. Гвоздева, Б. Г. Нила, А. Р. Ржаницина, В. И. Себекиной, Э. С. Сибгатуллина, И. Г. Терегулова и др.

Во второй главе диссертации изложен новый метод определения прочности брусьев (стержней) произвольной конфигурации в общем случае их сложного сопротивления. Рассмотрены анизотропные, изотропные брусья. Нагрузки – кратковременные статические, многоцикловые. В случае статического нагружения прочность анизотропных брусьев в пространстве напряжений σ_{ij} ($i, j = \overline{1,3}$)

определяется уравнением вида

$$A\sigma_{11}^2 + L\sigma_{12}^2 + K\sigma_{13}^2 + 2P\sigma_{11}\sigma_{12} + 2S\sigma_{12}\sigma_{13} + 2G\sigma_{13}\sigma_{11} + 2D\sigma_{11} + 2Q\sigma_{12} + 2T\sigma_{13} = 1. \quad (1)$$

Используя ассоциированный с (1) закон деформирования, гипотезу плоских сечений и суммируя элементарные внутренние силы и их моменты (относительно центра площади сечения) по площади поперечного сечения бруса, получены следующие параметрические уравнения предельной поверхности в пространстве внутренних силовых факторов (ВСФ):

$$T_1 = \frac{1}{2\Delta} [(\delta_{11}\dot{e}_{11} + 0,5\delta_{12}\dot{\gamma}_{21} + 0,5\delta_{13}\dot{\gamma}_{31})I_1 + (0,5\delta_{13}\dot{x}_{21} - \delta_{11}\dot{x}_{21})I_2 + (\delta_{11}\dot{x}_{31} - 0,5\delta_{12}\dot{x}_{11})I_3] - \frac{\Delta_1}{\Delta} A; \quad \dots; \quad (2)$$

$$M_3 = -\frac{1}{2\Delta} [(\delta_{11}\dot{e}_{11} + 0,5\delta_{12}\dot{\gamma}_{21} + 0,5\delta_{13}\dot{\gamma}_{31})I_2 + 0,5(I_4\delta_{13} - I_3\delta_{12})\dot{x}_{11} - I_4\delta_{11}\dot{x}_{21} + I_3\delta_{11}\dot{x}_{31}] - \frac{\Delta_1}{\Delta} S_3.$$

Здесь T_1 – осевая сила; T_2, T_3 – поперечные силы; M_1 – крутящий момент; M_2, M_3 – изгибающие моменты; $\dot{e}_{11}, \dots, \dot{x}_{21}$ – скорости обобщенных перемещений, соответствующие обобщенным силам T_1, \dots, M_3 ; $I_1, \dots, I_6, S_2, S_3$ – определенные интегралы по площади поперечного сечения бруса; Δ, Δ_1 – функции коэффициентов уравнения (1). Из (2)

следуют, как частные случаи, соответствующие уравнения для ортотропных, трансверсально изотропных и изотропных брусев. Например, для изотропных брусев уравнения (2) принимают следующий вид:

$$T_1 = \frac{1}{2}(\dot{\epsilon}_{11}I_1 - \dot{\epsilon}_{21}I_2 + \dot{\epsilon}_{31}I_3); \dots; M_3 = -\frac{1}{2}(\dot{\epsilon}_{11}I_2 - \dot{\epsilon}_{21}I_4 + \dot{\epsilon}_{31}I_5). \quad (3)$$

Построение сечений поверхностей (2) и (3) определенными плоскостями в пространстве ВСФ представляет собой нетривиальную задачу. Для решения этой задачи разработан алгоритм и реализована соответствующая программа для ЭВМ. Приведены сравнения результатов, полученных с использованием этой программы, с соответствующими решениями тестовых задач. Исследована проблема уточнения соответствующих численных решений. В качестве примеров приведены предельные кривые для анизотропного и изотропного брусев с относительно сложными поперечными сечениями. Например, исходя из критерия прочности (4)

$$0,2\sigma_{11}^2 + 30\sigma_{12}^2 + 60\sigma_{13}^2 - 0,1\sigma_{11}\sigma_{12} - \sigma_{12}\sigma_{13} - 0,2\sigma_{13}\sigma_{11} - 0,6\sigma_{11} + 14\sigma_{12} + 20\sigma_{13} = 1 \quad (4)$$

в пространстве напряжений для анизотропного бруса, сечение которого изображено на рис. 1, построены предельные кривые, некоторые из которых приведены на рис. 2.

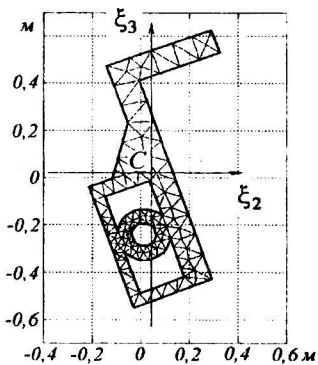


Рис. 1.

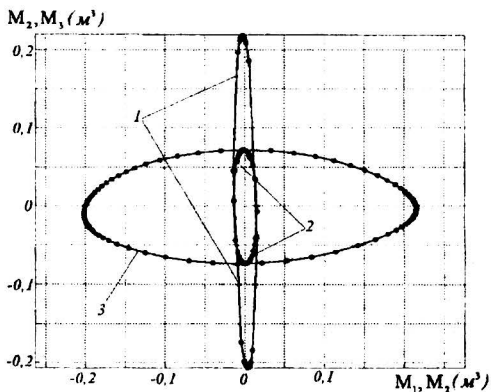


Рис. 2.

Здесь ξ_2, ξ_3 – главные центральные оси площади поперечного сечения; кривая 1 построена в осях M_1/σ_0 и M_2/σ_0 , кривая 2 – в осях M_1/σ_0 и M_3/σ_0 , кривая 3 – в осях M_2/σ_0 и M_3/σ_0 . Напряжения отнесены к

величине σ_0 , имеющей размерность МПа.

Предложен новый критерий выносливости для изотропных материалов и следующий его вариант для изотропных брусьев:

$$(a\sigma_{11}^2 + 3\sigma_{21}^2 + 3\sigma_{31}^2 + 2b\sigma_{11})_m + c(\sigma_{11}^2 + 3\sigma_{21}^2 + 3\sigma_{31}^2)_a = \sigma_0^2. \quad (5)$$

Здесь индексом m отмечены статические (средние) напряжения, индексом a – амплитуды переменных частей напряжений. По аналогии с уравнениями (2), (3) получены параметрические уравнения поверхностей выносливости для изотропных брусьев:

$$T_m^1 = \frac{1}{2a}(\dot{e}_{11}I_1 - \dot{x}_{21}I_2 + \dot{x}_{31}I_3)_m - \frac{bA}{a}; \dots; M_a^3 = \frac{1}{2c}(-\dot{e}_{11}I_2 + \dot{x}_{21}I_4 - \dot{x}_{31}I_5)_a. \quad (6)$$

Для слоистоволокнистых композиционных материалов структуры $[\pm\varphi]_c$ получено непараметрическое уравнение предельной поверхности в пространстве усредненных (по толщине композиции) напряжений, даны сравнения соответствующих предельных кривых, построенных с использованием этого уравнения и параметрических уравнений вида (2). Отмечены некоторые возможности использования полученных результатов при определении прочности стержней из гибридных композиционных материалов (например, композитной трубы карданной передачи автомобиля).

Ниже, в качестве иллюстрации, приведены некоторые результаты. На рис. 3а приведено сечение лонжерона надрамника с усилителем автомобиля КАМАЗ-65115. Материал – Сталь 09Г2С, $\sigma_T = 345$ МПа.

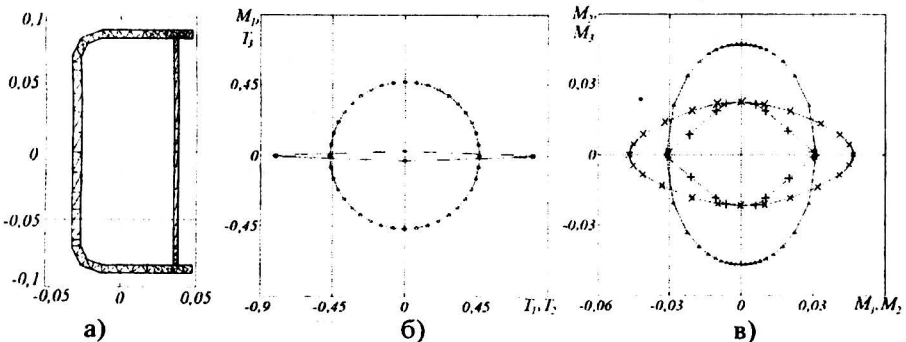


Рис. 3.

На рисунке 3б приведены соответствующие предельные кривые в плоскости T_1OM_1 (вытянутая кривая, маркеры «*») и кривая в плоскости

T_2OT_3 (маркеры « \circ »). На рисунке 3в приведена кривая в плоскости M_1OM_2 (маркеры « Δ »), кривая в плоскости M_1OM_3 (маркеры «+»), кривая в плоскости M_2OM_3 (маркеры «x»). Здесь силы имеют размерность в МН, моменты - МН·м.

В третьей главе изложен метод оценки несущей способности стержней и стержневых систем (рам, ферм). Использована жесткопластическая модель деформируемого твердого тела и кинематический метод теории предельного равновесия. Принято допущение, что процесс пластического разрушения протекает в точечных обобщенных шарнирах разрушения (ОШР), а стержни и их части между соседними ОШР приняты за абсолютно жесткие конечные элементы (АЖКЭ). Движение каждого из АЖКЭ в трехмерном пространстве определяется шестью обобщенными координатами, а в каждом ОШР учитывается работа шести внутренних силовых факторов (ВСФ) – трех сил и трех моментов.

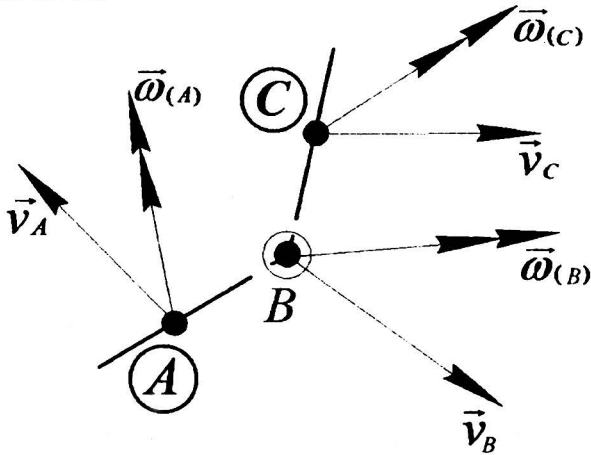


Рис. 4.

На рис. 4 изображены АЖКЭ и их скорости. В узлах стыковки линейных АЖКЭ введены «точечные» АЖКЭ, все точки которых совпадают с их собственным полюсом (узел B на рис. 4). Согласно принципу возможных перемещений имеем $N = \dot{A}$, где N – суммарная скорость диссипации внутренней энергии во всех ОШР, \dot{A} – мощность всех активных сил, действующих на стержневую систему. В локальной системе координат $(\xi_1, \xi_2, \xi_3)_j$, где ξ_{2j}, ξ_{3j} – главные центральные оси

поперечного сечения j -го стержня, ξ_{1j} – нормаль к поперечному сечению, имеем:

$$N_j = (T_1 \Delta v_1 + T_2 \Delta v_2 + T_3 \Delta v_3 + M_1 \Delta \omega_1 + M_2 \Delta \omega_2 + M_3 \Delta \omega_3)_j, \quad (7)$$

где, например, T_1 – нормальная сила, Δv_1 – скорость взаимного удаления двух соседних АЖКЭ в направлении оси ξ_1 и т. д.

Нелинейные поверхности прочности аппроксимируются вписанными в них многогранниками. С использованием постулата Друккера рассматриваемые задачи сведены к стандартной задаче линейного программирования (ЛП), которая решается симплекс-методом: найти $\min \mu^+$, где

$$\mu^+ = \sum_{j=1}^n N_j - \sum_{j=1}^{n_j} \left(\vec{F}_j v_j + \vec{M}_j \omega_j \right), \quad (8)$$

при условии

$$\sum_{j=1}^{n_j} \left(\vec{F}_j v_j + \vec{M}_j \omega_j \right) = 1 \quad (9)$$

и при ограничениях вида:

$$N_j \geq (-a_{1i} v_{AX} - a_{2i} v_{AY} - a_{3i} v_{AZ} - a_{4i}^A \omega_{AX} - a_{5i}^A \omega_{AY} - a_{6i}^A \omega_{AZ} + a_{1i} v_{BX} + a_{2i} v_{BY} + a_{3i} v_{BZ} + a_{4i}^B \omega_{BX} + a_{5i}^B \omega_{BY} + a_{6i}^B \omega_{BZ})_j, \quad j = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, k_j}. \quad (10)$$

Здесь μ^+ – верхняя оценка предельной нагрузки, N_j – скорость диссипации энергии в j -ом ОШР, \vec{F} – сила, \vec{M} – момент силы, \vec{v}_j – скорость поступательного перемещения полюса j -го АЖКЭ, $\vec{\omega}_j$ – скорость вращения этого АЖКЭ вокруг своего полюса. Коэффициенты a_1, \dots, a_6 содержат в себе и информацию о прочности стержней. Индексы А и В обозначают два соседних АЖКЭ, между которыми находится j -ый ОШР. Соотношения (8)-(10) записаны в глобальной системе координат ОХУZ, куда отнесена вся стержневая система, в частности, рама с надрамником автомобиля.

Метод разработан применительно к стержням произвольной формы, произвольным рамам и фермам. Конфигурация внешней нагрузки также является произвольной. Реализована соответствующая программа для ЭВМ. Большое внимание уделено проверке достоверности

результатов, получаемых с использованием этой программы (решено большое количество тестовых задач).

В четвертой главе диссертации приведены некоторые результаты расчетов, полученные с использованием разработанных и описанных в предыдущих главах теории, алгоритмов и соответствующих программ для ЭВМ, анализ этих результатов. Представлен расчет на прочность несущей системы автомобиля КАМАЗ-65115, рассмотрены два варианта нагружения («симметричный» и кососимметричный). Произведено сравнение результатов расчетов с аналогичными экспериментальными и расчетными результатами других авторов. Даны некоторые рекомендации, позволяющие добиться увеличения запаса прочности конструкции и равнопрочности несущей системы.

Общий вид рамы с надрамником показан на рис. 5. Схема разбиения рамы на АЖКЭ и их нумерация показаны на рис. 6. Точками обозначены сечения, где возможно образование ОШР. Выносками обозначены номера «точечных» АЖКЭ (числа в скобках – для случая «симметричного» нагружения, без скобок – для случая кососимметричного нагружения).

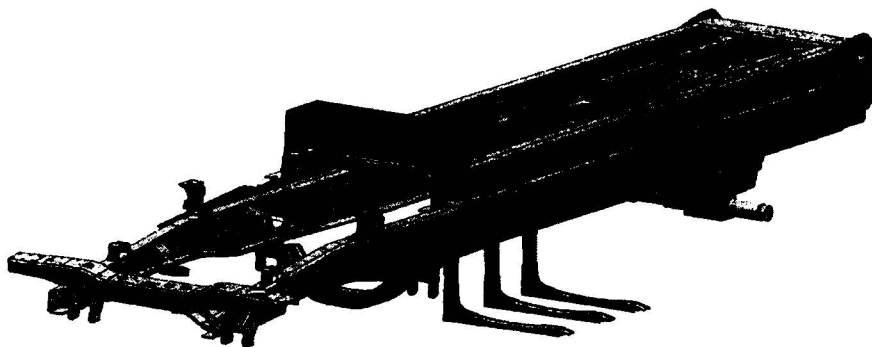


Рис. 5.

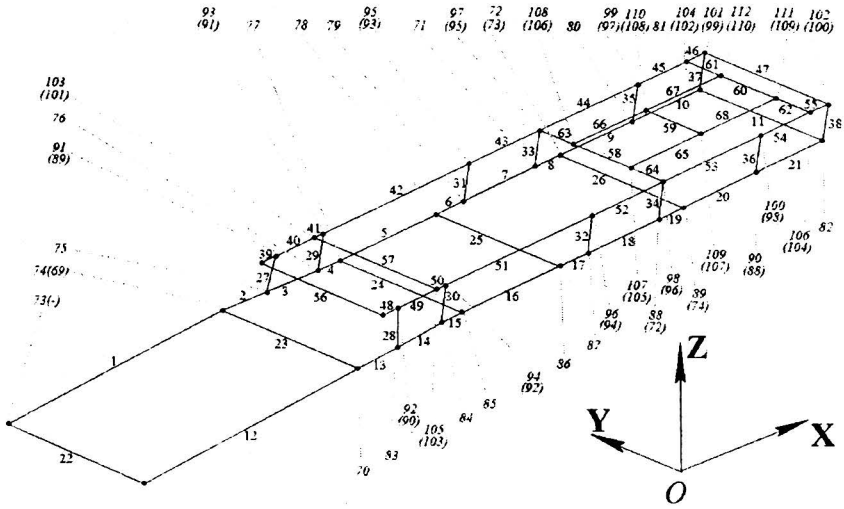


Рис. 6.

Ниже приведены результаты, полученные для случая кососимметричного нагружения несущей системы в предположении, что у полностью нагруженного автомобиля правое переднее колесо оказалось «вывешено» (рис. 7); картины скоростей перемещений АЖКЭ (толстая линия) и скорости диссипации энергии в ОШР (в виде гистограмм) приведены на этом же рисунке.

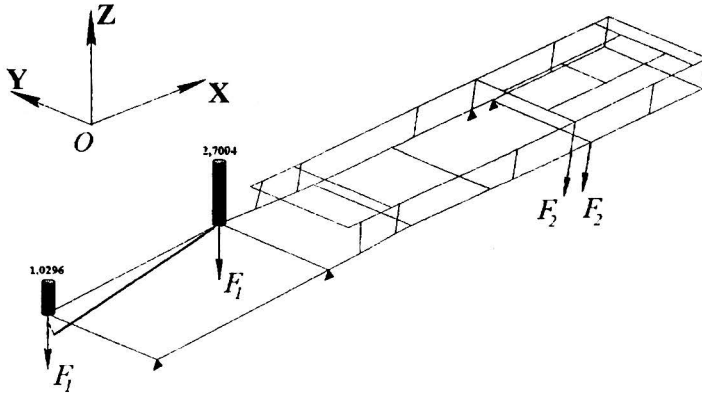


Рис. 7.

Разрушение в рассматриваемом случае происходит в месте сочленения второй поперечины и лонжерона (где скорость диссипации энергии наибольшая), а также в месте соединения лонжерона и первой поперечины. Коэффициент запаса прочности равен 4,1.

После двукратного увеличения прочностей сечений АЖКЭ №1, 2, 12, 13 (рис. 6), схема разрушения конструкции изменилась (рис. 8, показана лишь та часть рамы, входящие в которую АЖКЭ получают перемещения). При этом коэффициент запаса прочности увеличился до 4,2. Наибольшего значения скорость диссипации энергии в данном случае достигает в ОШР, возникающем между АЖКЭ №5 и №78.

Путем соответствующего уменьшения сечений стержней можно добиться, в принципе, ненулевых значений N во всех ОШР, то есть получить равнопрочную конструкцию. Это даст уменьшение веса, экономию металла и будет способствовать созданию рационального проекта изделия (известно, что, чем слабее на кручение конструкция автомобиля, тем он лучше приспосабливается к неровностям дороги и тем меньше возникает внешний крутящий момент).

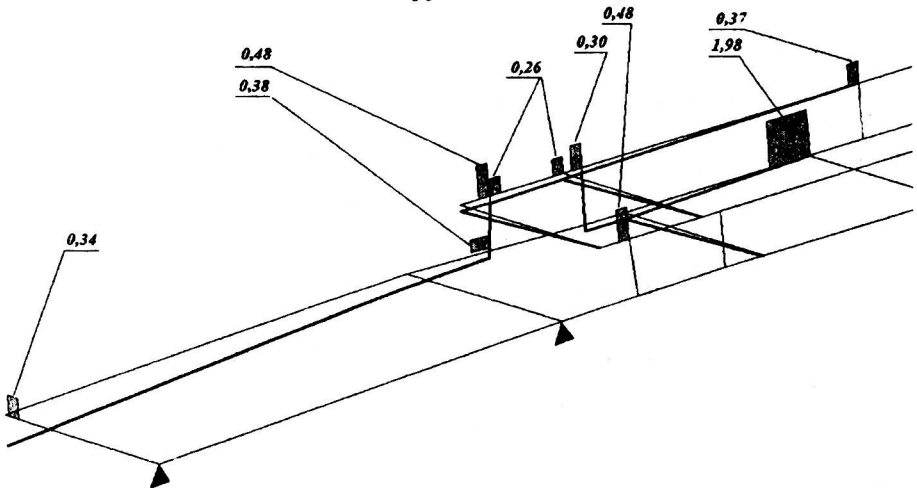


Рис. 8.

Отметим, что при «симметричном» нагружении коэффициент запаса равен 11.

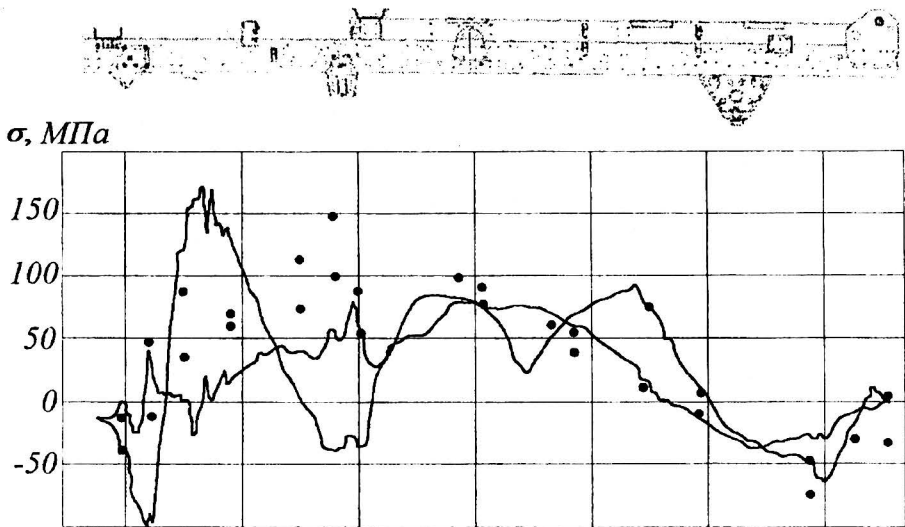


Рис. 9.

Рисунок 9 заимствован у П. Д. Павленко с его коллегами (НТЦ ОАО КАМАЗ). Результаты для нормальных напряжений в нижних полках лонжеронов соответствуют статическому нагружению самосвала КАМАЗ-6520 балластом весом 20 тонн, когда имеется перекося вправо на 250мм. Две кривые соответствуют двум лонжеронам, получены с использованием ANSYS. Точки соответствуют экспериментальным значениям напряжений в соответствующих точках несущей системы автомобиля. Картины разрушения и распределения скоростей диссипации находятся в хорошем согласии с соответствующими экспериментальными данными для наиболее нагруженных мест несущей системы (рис. 7, рис. 9). Для лонжеронов $\sigma_T = 440 \text{ МПа}$. Согласно ANSYS коэффициент запаса равен 2,5, согласно экспериментальным данным – 2,9 (рис. 9), согласно предлагаемым методам – 4,1 (рис. 7). Отметим также значительное расхождение расчетных данных, полученных с использованием ANSYS, с экспериментальными данными – для передней части несущей системы (рис. 9).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе получены следующие результаты:

- исследована несущая способность рамы с надрамником самосвала КАМАЗ-65115 при «симметричном» и кососимметричном статических нагружениях, определены соответствующие коэффициенты запаса, сформулированы некоторые рекомендации для получения рационального проекта исследуемого объекта. Приведены сравнения некоторых результатов расчетов с соответствующими экспериментальными и расчетными данными других исследователей. Показано, что численные результаты, получаемые по предлагаемым методам, находятся в лучшем соответствии с экспериментальными данными, чем результаты, получаемые с использованием ANSYS. Согласно ANSYS запас прочности несущей системы 2,5, согласно экспериментальным данным – 2,9, согласно предлагаемым методам – 4,1. Для решения этой основной задачи:

- разработан метод определения прочности изотропных и анизотропных стержней в общем случае их сложного сопротивления (когда в поперечных сечениях стержней действуют три силы и три момента). Формы стержней и их поперечных сечений – произвольные. Нагрузки – кратковременные статические и многоцикловые;

- разработан метод оценки несущей способности стержней и стержневых систем (рам, ферм), встречающихся, в частности, в расчетных схемах грузовых автомобилей. Конфигурации стержневых систем и активных внешних сил – произвольные;

- созданы и реализованы оригинальные алгоритмы на базе вышеупомянутых методов (как вычислительный комплекс для ЭВМ);

- получены численные результаты и составлены графики, позволяющие оценивать прочность определенных стержней сложного поперечного сечения (в том числе – стержней рамы с надрамником автомобиля КАМАЗ-65115) при их сложном сопротивлении;

Разработанные методы определения прочности стержней и оценки несущей способности стержневых систем, соответствующие алгоритмы и программный комплекс для ЭВМ являются эффективными инструментами при расчете и проектировании таких сложных конструктивных элементов, как рама с надрамником, а также рессоры, карданного вала и других стержневых элементов конструкции грузового автомобиля.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

Научные статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Сибгатуллин К. Э. Метод вычисления предельных сил и моментов для изотропных стержней произвольного поперечного сечения в общем случае их сложного сопротивления /Сибгатуллин К. Э., Сибгатуллин Э. С.//Известия вузов. Авиационная техника. – 2008. – С. 14-16.

2. Сибгатуллин К. Э. Оценка прочности слоистоволокнистых композиционных материалов структуры $[\pm\phi]_c$ /Сибгатуллин Э. С., Сибгатуллин К. Э.// Механика композиционных материалов и конструкций. – 2008. Т. 14, №4. – С. 572-582.

Научные статьи и материалы докладов:

3. Сибгатуллин К. Э. Поверхность статической прочности для изотропных брусьев при их сложном сопротивлении / Сибгатуллин Э. С., Сибгатуллин К. Э. // Социально-экономические и технические системы. – Онлайнновый электронный научно-технический журнал. Набережные Челны: ИНЭКА. – 2006. – 5 с (<http://sets.ru/index2.php?arhiv/17nomer.php>).

4. Сибгатуллин К. Э. Предельная поверхность многоциклового усталости для изотропных брусьев при их сложном сопротивлении. Часть I. Новый критерий выносливости для изотропных тел /Сибгатуллин Э. С., Сибгатуллин К. Э. // Социально-экономические и технические системы. – Онлайнновый электронный научно-технический журнал. Набережные Челны: ИНЭКА. – 2006. – 5 с (<http://sets.ru/index2.php?arhiv/17nomer.php>).

5. Сибгатуллин К. Э. Предельная поверхность многоциклового усталости для изотропных брусьев при их сложном сопротивлении. Часть II. Параметрические уравнения предельной поверхности / Сибгатуллин Э. С., Сибгатуллин К. Э. // Социально-экономические и технические системы. – Онлайнновый электронный научно-технический журнал. Набережные Челны: ИНЭКА. – 2006. – 5 с (<http://sets.ru/index2.php?arhiv/20nomer.php>).

6. Сибгатуллин К. Э. Поверхность статической прочности для анизотропных брусьев при их сложном сопротивлении / Сибгатуллин К. Э., Сибгатуллин Э. С. // Проектирование и исследование технических

систем: межвузовский научный сборник. Наб. Челны: Изд-во ИНЭКА. – 2006. – Вып. 8. – С. 15- 19.

7. Сибгатуллин К. Э. Прочность элементов конструкций. // «Студенческая наука в России на современном этапе». Сборник докладов межрегион. НПК. Наб. Челны: Изд-во ИНЭКА. – 2008. – С. 89-91.

8. Сибгатуллин К. Э. Прочность изотропных стержней произвольного поперечного сечения при косом изгибе и изгибе с кручением. / Сибгатуллин К. Э., Сибгатуллин Э. С., Шibaков В. Г. // «Наука и профессиональная деятельность». Материалы всероссийской НПК, Нижнекамск: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2008. – С. 255-258.

9. Сибгатуллин К. Э. Определение прочности стержней произвольной формы при их сложном сопротивлении. / Сибгатуллин Э. С., Сибгатуллин К. Э., Шibaков В. Г. // «XVI Туполевские чтения». Сборник докладов конференции. Т1. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2008. – С. 48-50.

10. Сибгатуллин К. Э. Кинематический метод определения несущей способности стержней и стержневых систем / Сибгатуллин Э. С., Сибгатуллин К. Э. // Проектирование и исследование технических систем: межвузовский научный сборник. Наб. Челны: Изд-во ИНЭКА. – 2008. – Вып. 12. – С. 5-13.

11. Сибгатуллин К. Э. О кинематическом методе оценки несущей способности стержневых систем. // «Камские чтения». Сборник материалов 1-ой межрегиональной НПК. Наб. Челны: Изд-во ИНЭКА. – 2009. – С. 127-131.

12. Сибгатуллин К. Э. Об оценке несущей способности сложных стержневых систем в общем случае их нагружения. / Сибгатуллин К. Э., Сибгатуллин Э. С., Шibaков В. Г. // «Камские чтения». Сборник материалов 1-ой межрегиональной НПК. Наб. Челны: Изд-во ИНЭКА. – 2009. – С. 131-136.

13. Сибгатуллин К. Э. О предельных поверхностях для стержней. // «Камские чтения». Сборник материалов 1-ой межрегиональной НПК. Наб. Челны: Изд-во ИНЭКА. – 2009. – С. 136-140.

10=

Сибгатуллин Камиль Эмерович

**Разработка методов расчета на прочность несущих систем грузовых
автомобилей с учетом пластических деформаций**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук