

М 355979

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

НА
ПОДА
ЕТСЯ

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

Черный Анатолий Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ РАМ МЕТОДОМ
КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

(Специальность 05.05.03 – Автомобили и тракторы)

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

Черный Анатолий Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ РАМ МЕТОДОМ
КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

(Специальность 05.05.03 - Автомобили и тракторы)

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Центральном ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательском автомобильном и автомоторном институте.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Н.Ф.Бочаров.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Г.Г.Баловнев,
кандидат технических наук, с.и.с. М.И.Курбатский.

Ведущее предприятие - ордена Трудового Красного Знамени им. В.И.Ленина Ульяновский автомобильный завод.

Защита диссертации состоится " " 1979г. на заседании специализированного совета К 053.15.10 "Транспортное машиностроение" МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу:

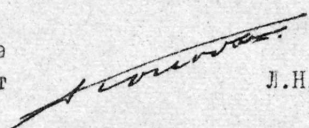
107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская ул., 5, кафедра К-3.

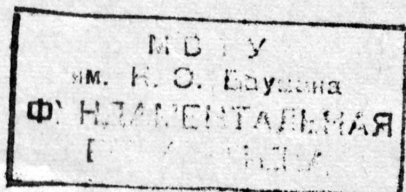
Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им.Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
специализированного совета
канд. техн. наук, доцент


Л.Н.Колобов



АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. Одним из основных направлений по созданию высокопрочных рам со сроком службы до списания автомобиля является разработка и совершенствование методов расчета рам с реализацией на ЭВМ.

Анализ показывает, что существующие методы расчета с использованием в расчетной схеме рамы только элементов стержневого типа возможны для определенных конструкций узлов автомобильной рамы, что ограничивает применение этих методов. Преимущество метода конечных элементов в исследовании напряженно-деформированного состояния автомобильных рам проявляется в его универсальности техники вычислений при использовании различных конечных элементов в модели рамы, т.е. в возможности образования плоских и пространственных расчетных схем.

Внедрение в практику проектирования автомобильных рам методов расчета на ЭВМ, позволяющих на стадии проектирования выбирать рациональные конструкции, значительно сократит сроки разработки и доводки рам.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ. Разработка и совершенствование методов расчета автомобильной рамы при статическом нагружении. Оценка точности результатов расчета. Практическое применение методов расчета при исследовании и проектировании автомобильных несущих систем.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. Исследования проводятся на основе метода конечных элементов с использованием дискретных расчетных схем и ЭВМ.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. Разработаны методы расчета автомобильной рамы на основе дискретных расчетных схем. При этом усовершенствован метод расчета рам с использованием в расчетной схеме элементов стержневого типа. Разработан метод совместного использования треугольных конечных элементов и тонкостенных стержневых для образования пространственной расчетной схемы рамы с выделением подконструкций. Рассмотрен вопрос применения АВМ в исследовании рам.

ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ. Основные положения методов расчета и полученные результаты проверены на решении контрольных задач и экспериментальными тензометрическими исследованиями.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ. Разработаны алгоритмы и программы, реализующие метод конечных элементов в расчетах автомобильных рам, которые могут быть использованы при исследовании напряженно-деформированного состояния и при проектировании несущих систем транспортных средств.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ. Разработанная методика исследования внедрена на Волжском, Камском, Ульяновском автомобильных заводах и Орском заводе тракторных прицепов. В соответствии с темой 25 научно-исследова-

тельских работ Министерства автомобильной промышленности предлагаемые методы расчета использованы в комплексе исследований при доводке рам автомобилей УАЗ-452Д и КамАЗ-5511, а также при проектировании рамы автомобиля НАМИ-0215 и рамы разбрасывателя Р25-3. Экономическая эффективность от внедрения рекомендаций составила 1,2 млн.руб.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Материалы работы доложены на секции НТС НАМИ, на кафедре "Колесные машины" МИТУ им. Баумана, на ежегодных научно-технических конференциях Ульяновского политехнического института в 1972-76 гг., Кулибшевского сельскохозяйственного института в 1973 г., Ульяновского сельскохозяйственного института в 1973, 1974 гг., на конференции молодых ученых и специалистов НАМИ в 1979 г.

ПУБЛИКАЦИИ. По теме диссертации опубликовано 5 статей.

ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из 4 глав, введения, заключения, списка литературы, включающего 103 наименования, приложения, 134 страниц машинописного текста, 49 рисунков и 12 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ. Наиболее важные вопросы проектирования, теоретических и экспериментальных исследований автомобильных рам разработаны в работах Н.Ф.Бочарова, В.Н.Белокурова, Г.Г.Баловнева, М.Н.Закса, Л.Б.Гельфгата, С.С.Дмитриченко, А.А.Захарова, А.А.Иванова, Н.И.Яценко, М.И.Курбатского, Л.Г.Ласевича, В.А.Ошнокова, В.Б.Проскурякова, Р.В.Ходжавы, А.Л.Эйцельмана и др. При этом в работах, посвященных расчетам рам, рама рассматривается как тонкостенная стержневая система, а в основе методов расчета лежит теория В.З.Власова. Однако моделирование разнообразных конструкций узлов рамы элементами стержневого типа с одинаковыми граничными условиями приводит к определенным допущениям и поэтому результаты расчета рамы весьма приближенно описывают ее напряженно-деформированное состояние.

Развитие вычислительной техники и широкое ее распространение в последние годы дают возможность развитию более точных и высокопроизводительных численных методов расчета и проектирования автомобильных рам.

Наиболее приспособленными к использованию ЭВМ являются современные методы анализа, основанные на образовании дискретной модели конструкции с помощью элементов конечных размеров. При этом матричный аппарат метода конечных элементов носит стандартный характер для элементов различной формы и предусматривает применение ЭВМ для всего процесса анализа, т.е. от ввода в машину сведений о геометрии конструкции, ее физических свойствах и нагрузках до получения окончательных результатов расчета.

ПЕРВАЯ ГЛАВА посвящена состоянию вопроса исследований на прочность автомобильных рам, а также содержит анализ матричных ме-

тоцов расчета рам.

Современному развитию теории автомобильных рам положили начало работы Н.Ф.Бочарова, Д.Б.Гельфгата, В.А.Ошнокова, в которых разработаны методы расчета автомобильной рамы на изгиб в вертикальной плоскости и кручение. При разработке теории авторами принято, что автомобильная рама, подверженная кручению, представляет собой плоскую стержневую тонкостенную конструкцию. При этом деформацией изгиба лонжерона пренебрегается, а деформация сечения лонжерона в точке-узле расчетной схемы рамы приравнивается нулю. Наличие экспериментальных данных жесткости поперечин при кручении позволяет выполнить расчет рамы как статически определимой системы без больших математических вычислений. Применение более совершенных гипотез о соотношении элементов и деформаций в узлах автомобильной рамы требует использование ЭВМ, ввиду значительного количества вычислений. При этом наиболее приемлемыми являются методы расчета в матричной форме.

Матричным формам расчета и, в частности, методу конечных элементов посвящено значительное число работ советских ученых: Л.К.Нареца, А.В.Александрова, В.В.Болотина, В.А.Постнова, Л.А.Розина, А.П.Филиппа, Р.А.Резникова, А.Ф.Смирнова, Н.Н.Шапошников и др. Широко известны труды Дж. Аргириса, О.Зенкевича, Р.Мелона, И.Прижмаллицкого, Г.Стрэнга и многих других зарубежных авторов.

В работах А.А.Иванова предложен алгоритм расчета автомобильных рам методом конечных элементов в форме метода перемещений. При этом за конечный элемент для исследования напряженно-деформированного состояния рам автомобилей и полуприцепов принят тонкостенный стержень. Разработанная методика расчета реализована на ЭВМ "Минск-22". Выполненные расчеты показали эффективность исследования автомобильных рам, состоящих из элементов с соизмеримыми размерами.

Метод расчета автомобильной рамы "лестничного" типа на основе пространственного взаимодействия ее элементов разработан А.А.Захаровым. При этом расчетная схема строится путем моделирования заклепочных, болтовых или сварных соединений между деталями рамы, которые, в свою очередь, моделируются тонкостенными стержневыми элементами. Однако образование расчетной схемы рамы элементами стержневого типа приведет к определенным упрощениям и допущениям при моделировании сложных узловых соединений поперечин с лонжеронами. К тому же сложность алгоритма, реализованного на ЭВМ "Минск-32" приводит к значительному ограничению по количеству элементов, используемых в расчетной схеме.

В ряде работ зарубежных авторов имеются сведения о применении в исследовательских центрах крупных автомобильных фирм метода конечных

элементов для расчета рам на основе образования плоских и пространственных расчетных схем. Для этих целей используется ряд программ: фирмой *Ford* – программы *SAMIS, NASTRAN*, фирмой *GMS* – *SPEED, FORMAT*, фирмой *Daimler-Benz* – *ESEM, NASTRAN, ASKA, TPS-10* и др. Отмечается, что используемые программы требовали некоторых изменений для решения ряда конкретных задач. Для наиболее эффективного использования метода конечных элементов применяется вспомогательное оборудование с программным обеспечением: планшетный стол для кодирования чертежей и получения координат узловых точек, графический дисплей, графопостроитель и др.

Большое внимание уделяется совершенствованию расчетных схем автомобильной рамы, с использованием однотипных конечных элементов и комбинированных систем, состоящих из различных элементов. При этом разработан метод совместного использования в модели рамы балочных и плоских конечных элементов. Однако использование балочного конечного элемента в комбинированной системе накладывает определенные ограничения, т.е. возможно моделирование участков рамы только трубчатого и коробчатого сечений.

Исходя из изложенного, при выполнении работы были поставлены следующие основные задачи:

1. Выполнить исследование нагруженности рамы в горизонтальной плоскости при перекосе автомобиля.
2. Провести исследования по применению метода конечных элементов для расчета автомобильных рам в статике:
 - а) разработать расчетные схемы автомобильных рам для различных вариантов нагружения;
 - б) разработать метод совместного использования плоских элементов и тонкостенных стержневых в модели рамы для расчета методом конечных элементов с выделением подконструкций.
3. Разработать алгоритмы и программы для ЭВМ, реализующие метод конечных элементов в исследовании автомобильных рам.
4. Выполнить оценку точности результатов расчета автомобильных рам на основе сравнения их с данными экспериментальных исследований.
5. Разработать методику исследования автомобильных рам методом конечных элементов.
6. Выполнить исследования по применению электронно-моделирующей машины ЭМСС-8 (Альфа) к расчету рам.
7. Провести расчетно-экспериментальные исследования рам автомобилей УАЗ-452Д, КамАЗ-5511 и разработать рекомендации по совершенствованию конструкций.
8. Использовать предлагаемый метод при проектировании рамы авто-

мобилия НАМИ-0215 и рамы разбрасывателя Р25-3.

ВТОРАЯ ГЛАВА отведена вопросам идеализации автомобильной рамы для расчета методом конечных элементов в форме метода перемещений.

Рассмотрены особенности конструкций автомобильных рам и выполнен их анализ, а также выделены силовые расчетные схемы рамы для расчета на изгиб в вертикальной и горизонтальной плоскостях и кручение. При этом в работах Д.Б.Гельфгата получены зависимости нагруженности рамы при перекосе автомобиля без учета действия горизонтальной силы. Однако исследования последних лет показывают, что проектирование рам необходимо выполнять с учетом их изгиба в горизонтальной плоскости. В связи с этим при перекосе автомобиля на угол α уравнения равновесия сил с учетом действия горизонтальной силы Y будут иметь следующий вид

$$\begin{cases} M_k + Y(d - h + 0,5\alpha B_1) - Z_1 B_1 = 0, \\ M_k + Yh - R_1 B_{n1}, \end{cases} \quad (1)$$

где M_k, R_1, Z_1 — соответственно крутящий момент, действующий на раму, сила в упругих элементах передней подвески и нормальное усилие между дорогой и шинами колес, а h, d, B_{n1}, B_1 — смещение оси кручения рамы в системе автомобиля, расстояние от поверхности дороги до кронштейнов рессор в передней подвеске, рессорная колея и колея колес. Используя следующие условия совместности линейных δ и угловых φ, α деформаций подвески, рамы и шин

$$\begin{cases} \delta_{rp} + \delta_{rw1} + \delta_{rw2} = d(\alpha_{w1} + \alpha_{w2}), \\ \delta_{rp} = h \sin \varphi_p, \\ \alpha_{w1} + \alpha_{w2} = \alpha - 2 \frac{\delta_{w1}}{B_1} - 2 \frac{\delta_{w2}}{B_2}, \\ \alpha = \varphi_p + 2 \frac{\delta_{w1}}{B_1} + 2 \frac{\delta_{w2}}{B_2} + 2 \frac{\delta_{n1}}{B_{n1}} + 2 \frac{\delta_{n2}}{B_{n2}}, \end{cases} \quad (2)$$

в решении системы (1), получены выражения для сил, действующих на раму и автомобиль в целом. Сравнение расчетных данных с экспериментальными для некоторых автомобилей показало их удовлетворительную сопоставимость. Разница значений составила не более 30%.

Приведен пример дискретизации лонжерона рамы автомобиля НАМИ-0215 по его весовой характеристике с использованием 38 балочных конечных элементов, что приводит к 78 уравнениям равновесия. Рассмотрены и особенности образования расчетной схемы лонжерона при пневматической задней подвеске автомобиля.

На примере рамы длиннобазного автомобиля ЗИЛ-169Г рассмотрены принципы образования расчетных схем с использованием балочных конечных элементов и тонкостенных стержневых. При этом расчетная схема рамы образована 109 конечными элементами стержневого типа. Порядок системы уравнений равновесия при расчете на горизонтальный изгиб равен 618, а при расчете на кручение — 412. Приведены кинематические ус-

ловия закрепления расчетных схем с учетом симметрии конструкции и без. Использование симметрии рамы позволяет вдвое уменьшить количество исходных данных, время на их подготовку и выполнение расчетов, а также уменьшается ошибка округления вычислений на ЭЕМ.

Варианты образования пространственных расчетных схем рассмотрены на примере рамы автомобиля типа КамАЗ. При этом использованы треугольные конечные элементы и тонкостенные стержневые. При моделировании рамы треугольными конечными элементами обращалось внимание на то, чтобы узлы сопряжения элементов совпадали с заклепочными и болтовыми соединениями рамы. Соотношение сторон треугольных конечных элементов выбиралось так, чтобы образуемые ими три угла были примерно равными. Размеры этих сторон выбирались из условия, чтобы по размеру каждой части детали рамы (например, высоте стенки лонжерона, поперечины, косынки, усилителя и т.д.) размещалось не менее двух рядов конечных элементов, а непосредственно в зоне узла — до пяти рядов. Тонкостенные стержневые конечные элементы использовались для моделирования стержневого типа частей рамы в удалении от мест соединения поперечин с лонжеронами. Анализ показывает, что образование пространственной расчетной схемы рамы приводит к необходимости решения системы уравнений равновесия большого порядка, что вызывает известные трудности. В связи с этим рассмотрен вопрос выделения подконструкций в расчете рам (суперэлементов), что позволяет решать несколько систем уравнений значительно меньшего порядка вместо одной системы уравнений большого порядка. Так, для расчетной схемы рамы, состоящей из 14 подконструкций и образованной треугольными конечными элементами и тонкостенными стержневыми, вместо обращения матрицы порядка 4369 необходимо обращать 14 матриц с наибольшим порядком 376 и одну матрицу граничных узлов с порядком 306. При этом за границы подконструкций выбирались сечения сопряжения треугольных элементов с тонкостенными стержневыми.

Применению метода конечных элементов к расчету рам посвящена ТРЕТЬЯ ГЛАВА.

Для определения усилий в общей системе координат $\bar{S}^0$ в узлах расчетных схем рам, образованных с использованием элементов стержневого типа, использована следующая матричная зависимость

$$\bar{S}^0 = \bar{K}^0 A (A' \bar{K}^0 A)^{-1} \rho^0 = \bar{K}^0 A q^0, \quad (3)$$

где $\bar{K}^0$ — квазидиагональная матрица жесткости конструкции, A — матрица соответствий, ρ^0 — вектор внешней узловой нагрузки, q^0 — вектор-столбец узловых перемещений. Для обеспечения возможности обращения матрицы жесткости конструкции $K^0 = A' \bar{K}^0 A$ необходимо исключить из системы уравнений зависимые уравнения, определяющие зависимость внеш-

ней нагрузки и реакций опор. Такой подход использован в работе А.А.Иванова, который нерационален при реализации на ЭМ. Возможен другой способ аналогичный преобразованию при решении задачи, для которой заданы перемещения. Т.е., при известном перемещении, положим q_i^o , соответствующие элементы строки и столбца матрицы жесткости становятся нулевыми, а элемент главной диагонали — единичным. При этом элементы вектора нагрузки становятся равными

$$P_i^o = q_i^o, \quad P_i^o = P_i^o - K_{i,i} q_i^o, \quad (i = 2, 3, \dots, n). \quad (4)$$

При кинематическом закреплении $q_i^o = 0$, то $P_i^o = 0$, а остальные элементы вектора нагрузки остаются неизменными. Этот способ и использован в алгоритме для расчета рам при введении кинематических закреплений и при одновременном учете внешних силовых и деформационных воздействий.

Обычное понятие метода перемещений — "жесткий" узел используется при расчете лонжерона на изгиб и рамы на изгиб в горизонтальной плоскости. При расчете рамы на кручение рассмотрены вопросы введения в матрицу жесткости величин, характеризующих кинематическое взаимодействие элементов в узле, а также реализации обратной кинематической связи $\varphi_n' = -\varphi_1'$ для "мягких" узлов соединения поперечин с лонжеронами, которые при этом находятся в условиях чистого кручения. "Мягкие" узлы применяются в конструкциях надрамников, рам прицепов и полуприцепов. Рассмотрен вопрос и совместного использования в расчетной схеме рамы балочных конечных элементов и тонкостенных стержневых. Это расширяет возможности метода в исследовании рам на основе использования в расчетных схемах элементов стержневого типа.

Анализ рассмотренных пространственных расчетных схем автомобильной рамы показал, что наиболее приемлемыми являются варианты, построенные с использованием комбинированных систем — тонкостенный стержень и треугольный элемент. Во-первых, эти расчетные схемы отражают стержневой характер конструкции автомобильной рамы и являются более общими. Например, позволяют выполнить расчет рамы, в конструкции которой применяются тросчатые поперечины. Во-вторых, значительно уменьшается количество конечных элементов в расчетной схеме и порядок системы уравнений равновесия, что приводит к уменьшению ошибок округления при вычислениях на ЭМ. К тому же уменьшается и количество исходных данных для выполнения расчетов.

На рис. I приведена комбинированная система — тонкостенный стержень и треугольный элемент, в основу зависимостей которой положены условия совместности деформаций граничных узлов i треугольных элементов и граничного узла A тонкостенного стержня.

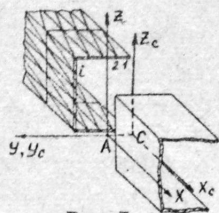


Рис. I

$$\begin{cases} u_i = u_A + \varphi_{z_c}(y_i^0 - y_c^0) - \varphi_{y_c}(z_i^0 - z_c^0) - \varphi_{x_A}' u_{A_i}, \\ v_i = v_A + \varphi_{x_A}(z_i^0 - z_A^0) - \varphi_{z_c}(x_i^0 - x_c^0), \\ w_i = w_A + \varphi_{y_c}(x_i^0 - x_c^0) - \varphi_{x_A}(y_i^0 - y_A^0), \\ \varphi_{x_i} = \varphi_{x_A}, \\ \varphi_{y_i} = \varphi_{y_A}, \\ \varphi_{z_i} = \varphi_{z_A}. \end{cases} \quad (5)$$

Реализация этих условий совместности деформаций предложена в матричной форме. При этом преобразование матрицы жесткости граничного треугольного элемента может быть выполнено в стандартной для конечн-элементной процедуры форме, т.е.

$$K_{r_z}^0 = A_z^T K_z^0 A_z, \quad (6)$$

где A_z — матрица соответствий перемещений граничного треугольного элемента перемещениями тонкостенного стержня. Процесс формирования матрицы жесткости конструкции остается прежним, хотя и несколько усложнен.

Применение комбинированной системы — тонкостенный стержень и треугольный элемент наиболее эффективно при исследовании рамы методом конечных элементов с выделением подконструкций. В связи с этим рассмотрены особенности алгоритма, в основу которого положены следующие матричные преобразования системы уравнений равновесия

$$\left\| \begin{array}{cc} \frac{K_{\delta\delta}^0}{K_{r\delta}^0} & \frac{K_{\delta r}^0}{K_{rr}^0} \end{array} \right\| \left\| \begin{array}{c} q_{\delta}^0 \\ q_r^0 \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{c} P_{\delta}^0 \\ P_r^0 \end{array} \right\|, \quad (7)$$

где выделены подматрицы в соответствии с выбранными q_{δ}^0 — внутренними узловыми перемещениями конструкции и q_r^0 — граничными узловыми перемещениями. Вектор граничных узловых перемещений определяется из решения системы уравнений

$$\bar{K}_r^0 q_r^0 = P_r^0, \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{K}_r^0 &= K_{rr}^0 - K_{\delta r}^0 K_{\delta\delta}^{0-1} K_{\delta r}^0, \\ \bar{P}_r^0 &= P_r^0 - K_{\delta r}^0 K_{\delta\delta}^{0-1} P_{\delta}^0, \end{aligned} \quad (9)$$

что позволяет определить и вектор внутренних узловых перемещений

$$q_{\delta}^0 = K_{\delta\delta}^{0-1} P_{\delta}^0 - K_{\delta\delta}^{0-1} K_{\delta r}^0 q_r^0. \quad (10)$$

За границы подконструкций выбираются сечения сопряжения треугольных элементов с тонкостенными стержневыми, что обуславливает минимальный порядок матрицы жесткости граничных узлов конструкции $\bar{K}_r^0$. При этом необходимый объем памяти машины для расчета рамы определяется объемом, необходимым для расчета одной подконструкции. К тому же выделение подконструкций позволяет значительно сократить трудоемкость

подготовки исходных данных при проведении вычислительных экспериментов. Так, при изменении конструкции одной из поперечин рамы, выделенной в подконструкцию, достаточно изменить только исходные данные этой поперечины, а при расчете без выделения подконструкций какие-либо незначительные изменения в раме требуют практически подготовки заново всех исходных данных.

Программы, реализующие метод конечных элементов в исследовании автомобильных рам, написаны на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV и предназначены для ЕС ЭМ. Цель составления программ для решения конкретной задачи — расчета рам — позволила значительно упростить систему кодирования исходной информации и ее количество, что особенно важно для внедрения метода в практику проектирования и исследования автомобильных рам. Однако стандартный характер матричного аппарата метода позволяет программировать многие операции в общей форме и в связи с этим разработанные программы обладают достаточной общностью и пригодны для решения других типичных задач.

Программа "Анализ прочности автомобильных рам-I" (АПАР-I) реализует метод конечных элементов в исследовании напряженно-деформированного состояния автомобильных рам на основе образования расчетных схем с использованием элементов стержневого типа. АПАР-I состоит из подпрограмм, выполняющих основные этапы алгоритма, и подпрограмм "ГРАФОР", связь которых отражена в блок-схеме программы. При этом расчет лонжерона выделен в самостоятельную задачу, что позволило уменьшить количество исходных данных и выполнить их подготовку в соответствии с весовой характеристикой автомобиля, составление которой широко применяется в практике заводов отрасли. Формирование матрицы жесткости конструкции K^0 выполнено с помощью матрицы индексов (представляет собой номера узлов соответствующих конечных элементов). При этом используется симметрия матрицы K^0 , что позволяет формировать половину ширины ее ленты и располагать в памяти ЭМ в виде прямоугольного массива. Решение системы уравнений равновесия выполняется методом Гаусса. В программе предусмотрен вывод результатов расчета в графической форме на графопостроителе рулонного типа "BENSON-121". Расчет автомобильной рамы по программе может быть выполнен для нескольких вариантов загрузки одновременно. Внешняя нагрузка может задаваться в виде произвольных эквивалентных узловых сил или в виде заданных узловых перемещений.

Программа АПАР-2 реализует метод конечных элементов с выделением подконструкций на основе образования пространственной расчетной схемы рам автомобиля. В основу программы положено совместное использо-

вание в модели рамы треугольных элементов и тонкостенных стержневых. При этом формирование матриц жесткости подконструкций и реализация кинематических закреплений расчетной схемы выполняется так же, как и в программе АИАР-I. Табулирование матриц жесткости подконструкций и векторов нагрузки выполняется с помощью подпрограмм. Формирование матриц жесткости граничных узлов и векторов граничной узловой нагрузки подконструкций выполняется с помощью прямого хода исключения метода Гаусса внутренних уравнений матриц жесткости подконструкций. Образование матрицы жесткости граничных узлов K_r^0 и вектора граничной узловой нагрузки подконструкции P_r^0 предложено выполнять с помощью векторов формирования, что значительно экономит память ЭЭМ. Вектора внутренних узловых перемещений определяются решением следующей системы уравнений для каждой подконструкции

$$K_{\alpha\beta} q_{\alpha}^0 = P_{\alpha}^0 - K_{\alpha r} q_r^0. \quad (II)$$

Вывод результатов расчета на АППУ выполняется в табличной форме для каждой подконструкции расчетной схемы.

Одним из этапов подготовки исходных данных при выполнении расчетов по приведенным программам является вычисление геометрических характеристик сечений. В связи с этим предлагается программа определения геометрических характеристик произвольного тонкостенного сечения открытого профиля - ТХС. В основу программы положены разработанные В.Н.Белокуровым и А.А.Захаровым алгоритм метода интегрирования произвольных эпюр в матричной форме и программа для "Минск-32", реализованные с некоторыми изменениями, связанными со спецификой ЕС ЭМ.

ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА посвящена практическому применению метода конечных элементов при исследовании и проектировании автомобильных рам.

Отладка программ выполнялась по подпрограммам с последующим их объединением и выполнением вычислений на ряде контрольных задач, имеющих решения в литературе, что позволило проверить программы. При этом приведены результаты расчета различных вариантов моделирования контрольных задач, а также ошибки округления вычислений на ЭЭМ. На основе образования плоских расчетных схем выполнены расчеты рамы автомобиля ЗИЛ-169Д и рамы длиннобазного автомобиля ЗИЛ-169Г. Подробно описаны расчетные схемы рамы, условия их закрепления и нагружения, реализованные согласно экспериментальным испытаниям. Для всех вариантов расчета приведены выводы результатов в графической форме. Сравнение результатов расчета изгиба рам в вертикальной и горизонтальной плоскостях с данными испытаний показало их удовлетворительную сопоставимость. Разница значений составила не более 16%. При этом изменение жесткости поперечки практически не влияет на напряженно-деформированное состояние рамы в горизонтальной плоскости. Результаты рас-

чета рамы автомобиля ЗИЛ-169Д на действие кососимметричных сил и моментов потребовали выполнения коррекции по значениям эксцентриситетов осей элементов, образующих узлы рамы. Учет эксцентриситетов геометрических осей сечений элементов, образующих узел, выполнялся по следующим формулам, предложенным А.А.Ивановым

$$\begin{aligned} M_y &= M_{0y} (-\chi_y + \chi_{yz} - \chi_{zw}), \\ M_z &= M_{0z} (-\chi_z + \chi_{zy} + \chi_{wy}), \\ B &= B_0 (-\chi_w + \chi_{yw} - \chi_{zw}), \end{aligned} \quad (12)$$

где M_{0y} , M_{0z} , B_0 — внутренние силовые факторы, определенные расчетом, а χ — коэффициенты, представляющие отношения приведенных моментов инерций относительно заданных главных полюсов узла, к главным центральным моментам инерции эксцентрично смещенных сечений. Разница значений нормальных напряжений стесненного кручения составила до 30%, а расчетная угловая жесткость рамы превысила экспериментальное на 21%.

Именно узлы соединений поперечин с лонжеронами оказывают значительное влияние на напряженно-деформированное состояние рамы. При этом эксцентриситеты геометрических осей сечений элементов, образующих узел рамы, в меньшей мере влияют при горизонтальном изгибе рамы. Так, согласно экспериментальным исследованиям рамы автомобиля ЗИЛ-169Г на действие только горизонтальной силы нормальные напряжения стесненного кручения составили 8-12% от напряжений горизонтального изгиба. При кручении рамы наличие эксцентриситетов в узлах вызывает значительные напряжения в горизонтальной плоскости и влияет на угловую жесткость рамы. В связи с этим в программе АПАР-1 предусмотрено введение в матрицу жесткости тонкостенного стержневого конечного элемента коэффициентов, характеризующих кинематическое взаимодействие в реальном узле рамы, а силовое взаимодействие в узле может быть учтено в векторе нагрузки. Как показали расчеты изменение жесткости элементов, образующих узел рамы, оказывает влияние на напряженное состояние непосредственно в узле и практически не влияет на другие участки рамы. Сравнительные расчеты некоторых узлов рамы автомобиля УАЗ-452Д на основе образования плоских и пространственных расчетных схем дали приемлемые результаты при использовании плоской расчетной схемы для узла, образованного стержневыми элементами с соизмеримыми размерами. Для сложных соединений со значительными эксцентриситетами осей элементов (более половины высоты стенки сечения лонжерона) требуются соотношения кинематического взаимодействия поперечин с лонжероном или выполнение расчетов на основе образования пространственных расчетных схем. Хорошая сопоставимость результатов

расчета на основе пространственных расчетных схем (8-10%) объясняется качественным изменением расчетной схемы, что достигается путем введения узлов сопряжения треугольных конечных элементов в заклепочные или болтовые соединения. При этом треугольные элементы использовались в моделировании непосредственно мест соединения поперечин с лонжероном, выделенных в подконструкцию. Согласно результатам расчета контрольных задач использовалось от трех до пяти рядов треугольных элементов в моделировании деталей узла.

С целью совершенствования конструкций проведены расчетно-экспериментальные исследования рам автомобилей УАЗ-452Д и КамАЗ-5511. При исследовании рамы автомобиля УАЗ-452Д выполнена оценка влияния на напряженное состояние рамы основных агрегатов автомобиля и полезной нагрузки при симметричном и кососимметричном нагружении, а также проведены исследования рамы на электронно-моделирующей машине ЭМСС-8 (Альфа) и ЭМ. При этом показана возможность применения машины ЭМСС-8 (Альфа) для расчета тонкостенных рам, на основе разработанной схемы-аналога тонкостенного стержневого элемента.

Исследования влияния надрамника, самосвальной платформы и полезной нагрузки на угловую жесткость и напряженное состояние несущей системы автомобиля КамАЗ-5511, а также многовариантные расчеты надрамника на ЭМ дали возможность разработать рекомендации по благоприятному формированию напряженного состояния несущей системы автомобиля.

В работе показана возможность применения предлагаемого метода исследования рам при проектировании. В процессе проектирования рамы автомобиля НАИМ-0215, в результате сравнительных многовариантных расчетов на ЭМ, предложены сечения основных элементов рамы. Также выполнен анализ напряженно-деформированного состояния опытной конструкции рамы разбрасывателя Р25-3, особенностью которой является пространственный характер расположения элементов в конструкции. Комплект сборочных чертежей рамы Р25-3 передан заводу-изготовителю и ВИСХОМу как головному разработчику всего комплекса машины.

В приложении приведены матрицы жесткости и матрицы ортогонального преобразования координат элементов, используемые в работе, а также некоторые примеры вывода результатов расчета на ЭМ по разработанным программам.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В работе предлагается исследование автомобильных рам методом конечных элементов, преимущество которого проявляется в его универсальности техники вычислений при образовании плоских и пространственных расчетных схем.

2. Положение оси кручения рамы в системе автомобиля можно определить в функции от упругих характеристик рамы, подвески и шин, что позволяет определить значения сил, действующих на раму в горизонтальной плоскости при перекосе автомобиля и необходимых для выполнения прочностных расчетов.

3. Анализ пространственных расчетных схем рамы показал эффективность выделения подконструкций при расчете методом конечных элементов. При этом наиболее приемлемой является расчетная схема, образованная моделированием узлов рамы треугольными элементами, а частей рамы стержневого типа в удалении от узлов — тонкостенными стержневыми.

4. В работе разработан алгоритм комбинированной системы — тонкостенный стержень и треугольный элемент, предлагаемый для образования пространственной расчетной схемы рамы с выделением подконструкций.

5. На базе теории метода конечных элементов разработаны алгоритмы и программа АПАР-1, реализующая метод в расчетах рам с использованием в расчетной схеме конечных элементов стержневого типа. При этом предусмотрена реализация "жесткого" и "мягкого" узла рамы, совместное использование балочных элементов и тонкостенных стержневых, а также можно учесть размеры узла или его упругость.

6. Комбинированная система — тонкостенный стержень и треугольный элемент реализована в программе АПАР-2. Использование треугольных элементов в моделировании узлов рамы наиболее точно отражает их конструктивные особенности при действительном соединении и взаимодействии деталей узла.

7. Оценка точности результатов расчета, выполненная на решении ряда контрольных задач, а также на сравнении с данными испытаний, позволяет сделать вывод, что результаты расчета достаточно точные в пределах теории тонкостенного стержня и хорошо согласуются с экспериментом. При этом моделирование узлов со значительными эксцентриситетами осей элементов необходимо выполнять треугольными элементами или стержневыми с введением в матрицу жесткости величин, характеризующих взаимодействие в узле.

8. Предлагаемый метод исследований рамы дает возможность полнее учитывать характерные особенности конструкции и получить достаточно точную информацию о напряженно-деформированном состоянии широко-го класса несущих систем транспортных средств.

9. В работе показана возможность применения машины ЭМСС-8 (Альфа) в исследовании автомобильных рам. При этом предложена схема-аналог

тонкостенного стержня, что позволяет моделировать тонкостенные стержневые системы.

10. Используя возможности метода в работе на конкретных примерах показано, что, выполняя многовариантные расчеты на ЭМ, т.е. решая задачи машинного проектирования, можно создать рациональные конструкции.

По содержанию диссертации опубликованы работы:

1. Синяговский И.С., Барышенков Л.А., Николотов Б.Д., Зотов Г.В., Черный А.Н. Принципы применения моделирующей машины ЭМСС-8 (Альфа) к расчету тонкостенных рам. Сб. Ульяновского СХИ. Куйбышев, 1973.
2. Синяговский И.С., Барышенков Л.А., Николотов Б.Д., Зотов Г.В., Черный А.Н. Применение моделирующей машины ЭМСС-8 (Альфа) к расчету рам. Сб. Ульяновского СХИ. Куйбышев, 1973.
3. Синяговский И.С., Барышенков Л.А., Николотов Б.Д., Черный А.Н., Зотов Г.В. Расчет несущих элементов рамы автомобиля "УАЗ" с помощью машины ЭМСС-8 (Альфа). Сб. Ульяновского СХИ. Ульяновск, 1976.
4. Синяговский И.С., Барышенков Л.А., Черный А.Н., Николотов Б.Д., Зотов Г.В. К расчету рамы автомобиля УАЗ-452Д. Сб. Ульяновского СХИ, вып.2, Ульяновск, 1975.
5. Черный А.Н. Численная реализация метода конечных элементов в исследовании автомобильных рам. ИИИНавтопром, Д 365, 1979.

Зек. 1153 Тип. МВТУ Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз.
Подписано к печати "22" октября 1979 года, Л-73976.

М В Т У
им. Н. Э. Баумана
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА