

Сложные условия работы кузова заставляют увеличивать его металлоемкость до 20% веса автомобиля. Несмотря на значительную толщину проката и его высокую прочность работа деталей, происходит с упругопластическими деформациями материала. Его равнопрочность при снижении веса достигается снижением концентрации нагрузки в зонах упругопластического изгиба обшивки на подкрепляющих ребрах.

В работе впервые показано, что для кузовов наиболее приемлемы армированные квазимонолитные стали (АКМ), в которых помимо традиционных методов термоупрочнения имеются дополнительные ресурсы повышения свойств за счет конструкции листа и формирования однородной структуры его металла путем введения в изложницу специальных макрохолодильников (пластин толщиной до 18 мм) [2, 3].

Проведенные исследования и разработанные предложения позволили установить и оптимизировать основные конструкционные параметры кузова, характеристики кузовных материалов и основные способы их достижения, что впервые позволило выдать гарантии на прочность кузова, а также максимально увеличить его износостойкость, как за счет повышения твердости металла, так и изменения локальной жесткости в местах максимального износа.

Разработанная и реализованная концепция структурной однородности и равнопрочности сталей и деталей отличается управлением пиковыми нагрузками и напряжениями, а также увеличением сопротивления локальному пластическому деформированию и разрушению наиболее напряженных объемов материалов в деталях. Основные положения разработанной технической идеологии равнопрочности деталей использованы в качестве составной части создания конкурентоспособного производства карьерных самосвалов.

**Литература.** 1. Дриц М.Е., Бочвар Н.Р., Грузей Л.С. и др. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: Справочник.- М.: Наука. -1979.-248 с. 2. Мариев П.Л. Повышение конструкционной равнопрочности крупногабаритных деталей и сварных узлов карьерных самосвалов.—Минск: Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 2001.-180 с. 3. Моисеенко В.И., Мариев П.Л. Основы структурной равнопрочности стали и элементов крупногабаритных деталей машин.—Минск: Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 1999.-200 с.

УДК 621.811.00415+6211.70

**В.В. Корсаков, А.Г. Выгонный**

## **ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ CAD/CAM/CAE/PDM ПРИ СОЗДАНИИ НОВОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ МАЗ**

*Белорусский национальный технический университет*

Технология создания и организации производства автомобиля является сложным, трудоемким и длительным процессом, включающим стадии маркетинга, конструирования, изготовления, испытаний, технологической подготовки производства, материальное снабжение, сбыт и др.

Для ускорения прохождения этих стадий существуют различные методы интенсификации работы. Одним из наиболее прогрессивных методов является замена последовательного выполнения этапов на параллельное, когда одновременно в процессе ра-

боты еще до завершения конструирования вовлекаются технологические, планирующие, снабженческие и др. службы.

Применение параллельных методов стало возможным с появлением компьютерных технологий. В процессе внедрения таких технологий на предприятиях типа МАЗ было выявлено, что каждое подразделение завода при оснащении компьютерными технологиями должно учитывать интеграцию этих технологий в рамках всего предприятия. В противном случае появляются рассогласования при обмене информацией между подразделениями, что резко снижает общую эффективность компьютеризации.

Основываясь на интеграции компьютерных технологий всего предприятия и с учетом изучения опыта предприятий СНГ и стран дальнего зарубежья, Управление главного конструктора (УГК) МАЗ разрабатывает и внедряет конкретные компьютерные технологии. Принципы организации использования компьютерных технологий УГК приведены на структурной схеме локальной сети для автоматизированного проектирования, рис. 1. Как видно из схемы, на верхнем уровне находятся серверы для баз данных, архивирования, приложений и расчетов. Используются два вида серверов: сервер с операционной системой Windows NT для баз данных, архивов, приложений и сервер с операционной системой UNIX для приложений и расчетов.

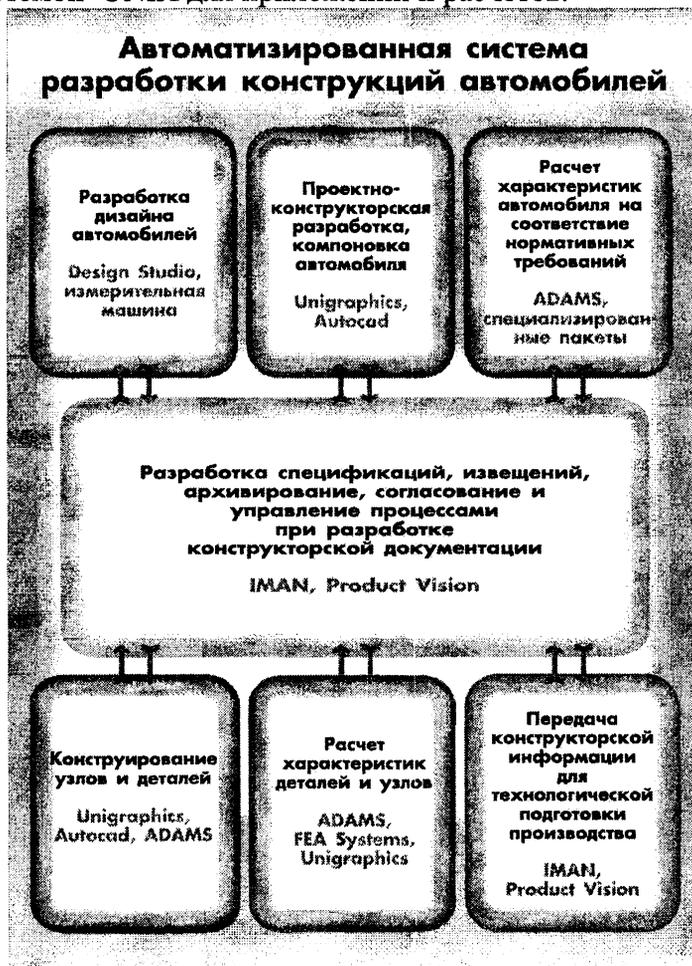


Рис. 1. Идеология автоматизированной системы разработки конструкций автомобилей и используемые программные продукты

На серверах находится вся электронная документация, разработанная в УГК. К этой документации с определенными правами имеют доступ конструкторы УГК. К серверам также могут иметь доступ через локальную информационную сеть предприятия все подразделения завода, имеющие функциональные связи с УГК.

На втором уровне локальной сети УГК показаны конструкторские отделы (2), разрабатывающие документацию на рабочих станциях и персональных компьютерах с помощью систем UNIGRAPHICS, AUTOCAD, IMAN и универсальных текстовых редакторов. Система UNIGRAPHICS используется для трехмерного моделирования в первую очередь для деталей, требующих разработки и изготовления сложной оснастки: панели кабины, пластмассовые детали (рулевое колесо и др.), литые детали и др.

Трехмерные электронные модели используются в следующих целях:

- получение разнообразных проекций и видов;
- использование в компоновках для оценки собираемости, зазоров, устранения вредных контактов;
- изготовление деталей методом стереолитографии и другими подобными методами;
- разработка программ для станков с ЧПУ;
- разработка конечно-элементных моделей для расчетов прочности методом конечных элементов;
- контроль качества изготовления детали путем сопоставления размеров электронной модели и реальной детали.

УГК в течение нескольких лет в сотрудничестве с Управлением главного технолога (УГТ) и Инструментально штамповым производством (ИШП) использует трехмерное моделирование для разработки и изготовления оснастки для автомобилей и автобусов. На базе этих работ разработана система автоматизированного проектирования и производства кабин.

Следующий уровень (3), показанный на схеме, включает рабочие станции и персональные компьютеры для расчетов методом конечных элементов (МКЭ). На этих станциях установлены пакеты UNIGRAPHICS, MSC/PATRAN, MSC/FEA SYSTEM, DYTRAN, ADAMS и др. Применение метода конечных элементов стало возможным с появлением мощной вычислительной техники. Наибольшая эффективность применения этого метода выявилась при расчете таких сложных конструкций как рама, кабина, балки осей и др. Если раньше до испытаний на стенде мы не могли оценивать прочность рамы, то сейчас метод конечных элементов позволяет еще до изготовления рамы оптимизировать ряд параметров.

Выбор этих программ был обоснован следующими основными положениями:

- интегрированность программ FEA Systems и ADAMS как между собой, так и с программой трехмерного моделирования Unigraphics;
- соответствие стандартам ISO;
- быстрое освоение программ специалистами с автомобильным образованием;
- возможность использования на персональных компьютерах и сетевой режим работы;
- удобные интерфейсы для анализа и визуализации результатов;
- оперативная помощь фирмы при решении практических проблем;
- динамичное совершенствование программ для расширения области их использования.

Предпосылкой для внедрения программ MSC было внедрение программы трехмерного моделирования Unigraphics. Затем были внедрены PATRAN и NASTRAN для конечно-элементного анализа конструкций.

При использовании NASTRAN обеспечивается высокая точность расчетов для заданных нагрузочных режимов. Однако, сами нагрузочные режимы, при отсутствии экспериментальных данных, задаются с большой погрешностью.

Поэтому, в первую очередь, для более точного определения нагрузок и для сокращения объема трудоемких и длительных экспериментальных измерений нагрузок был внедрен пакет ADAMS.

Первые результаты использования пакета ADAMS показали его широкие возможности не только для определения нагрузок, но также для кинематического и динамического анализа, как узлов, так и автомобилей в целом.

Ниже показаны основные примеры задач, решаемых с помощью программ FEA Systems (PATRAN + NASTRAN) и ADAMS.

Программное обеспечение FEA System используется в подразделении УГК МАЗ для прочностных расчетов узлов и деталей несущих и ходовых систем грузовых автомобилей и прицепной техники МАЗ. Проведение расчета такого узла, как рама в сборе (рис. 2), предъявляет повышенные требования к пре/постпроцессору и собственно к решателю. В среднем конечноэлементная модель рамы содержит около 100-150 тыс. элементов, из них 25-50 тыс. контактных элементов, количество степеней свободы превышает 1 млн. В раме моделируются все болтовые и заклепочные соединения, а по поверхностям прилегания деталей устанавливаются контактные элементы, соответственно расчет ведется в нелинейной постановке, что позволяет повысить точность. Гибкие средства моделирования препроцессора позволяют достаточно легко вносить изменения в расчетную модель, что дает возможность за относительно короткое время просчитать несколько вариантов конструкции и выбрать лучший на стадии проектирования машины, до изготовления опытного образца.

Крупные детали ходовой части, трансмиссии, например, картер моста (рис. 3), раздаточной коробки, имеют сложную пространственную геометрию, поэтому расчетные модели выполняются объемными конечными элементами. Для получения адекватных результатов необходимо использовать либо 8-узловые элементы первого порядка, либо 10-узловые элементы второго порядка. В этом случае можно использовать автоматическую генерацию сетки, в то время как создание сетки из элементов типа Hex8 требует значительной ручной работы. Однако модель из элементов 2-го порядка, например, картера моста в сборе, содержит 1 млн. 250 тыс. степеней свободы и требует для расчета 25 GB дискового пространства, в то время как модель из элементов 1-го порядка требует в несколько раз меньших ресурсов, но и времени на создание модели требуется в десятки раз больше.

Другой класс задач представляют собой сертификационные расчеты на прочность противоположных брусьев и буксирных приборов. При решении таких задач напряжения в деталях превышают предел текучести, поэтому приходится использовать нелинейные законы поведения материалов с переходом в пластическое деформирование конструкции (рис. 4).

Еще одна задача, решаемая с помощью системы конечно-элементного анализа – это определение собственных частот и форм колебаний таких узлов, как рамы (рис. 5) и мосты, с последующей генерацией файлов для передачи в пакет динамического анализа ADAMS, где проводится расчет автомобиля с учетом жесткости этих узлов, что значительно повышает адекватность расчетной модели, а также позволяет оценивать напряженно-деформированное состояние в реальном времени при движении по виртуальной дороге.

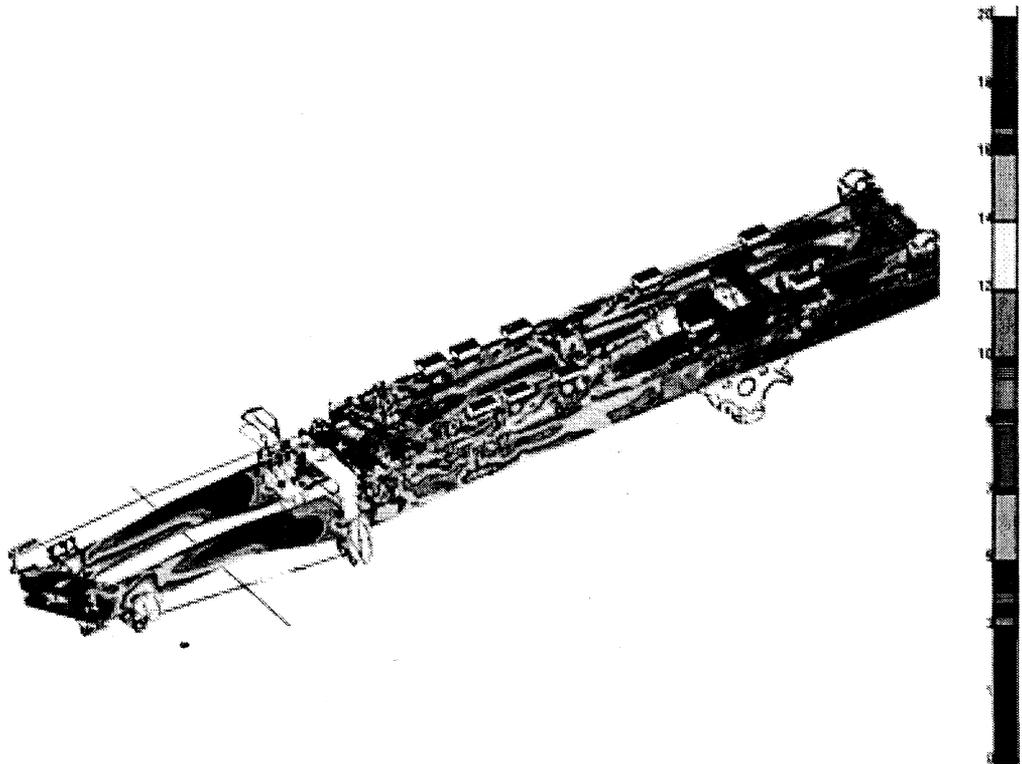


Рис. 2. Прочностной расчет рамы самосвала с надрамником в сборе

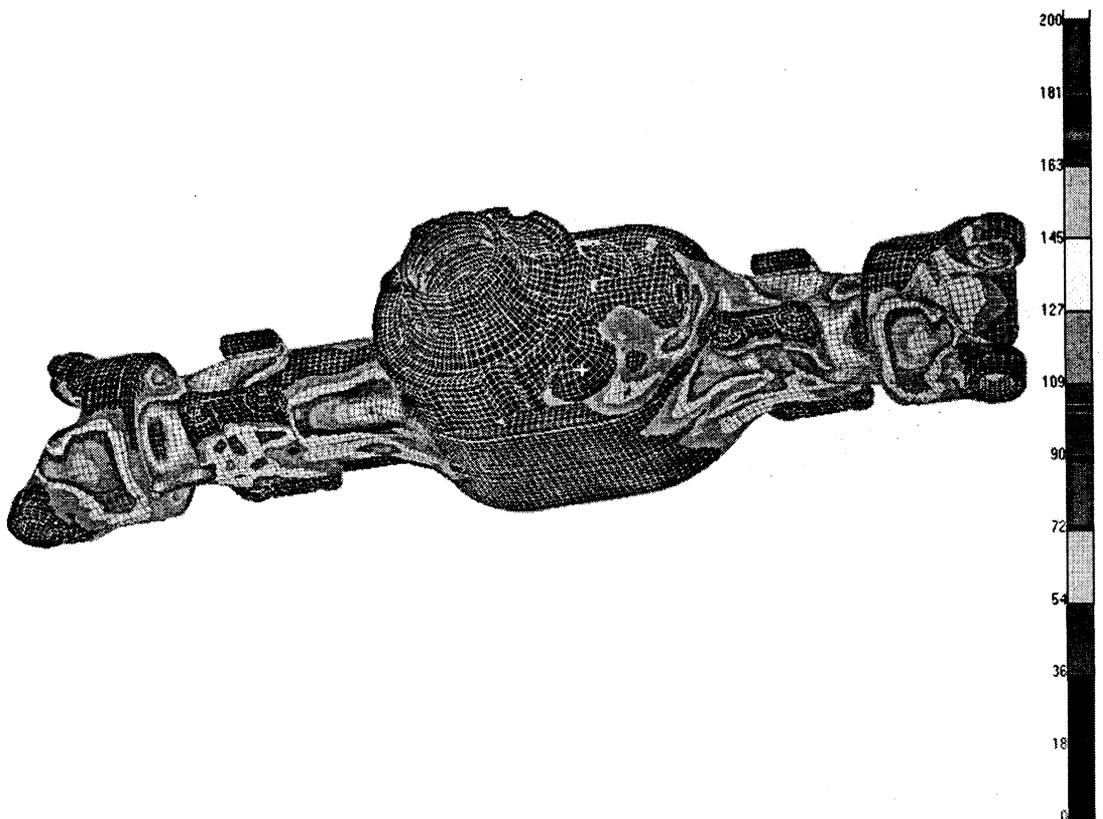


Рис. 3. Прочностной расчет картера переднего ведущего моста в сборе

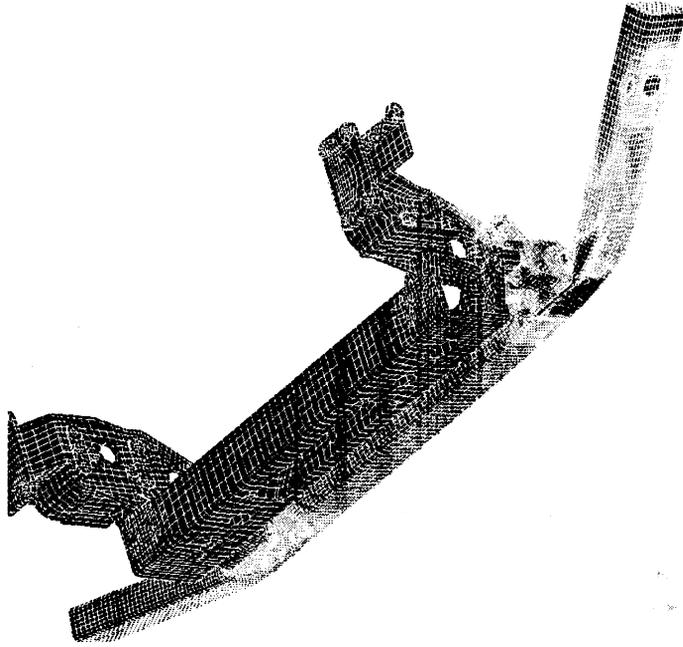


Рис. 4. Прочностной расчет передней противоподкатной защиты

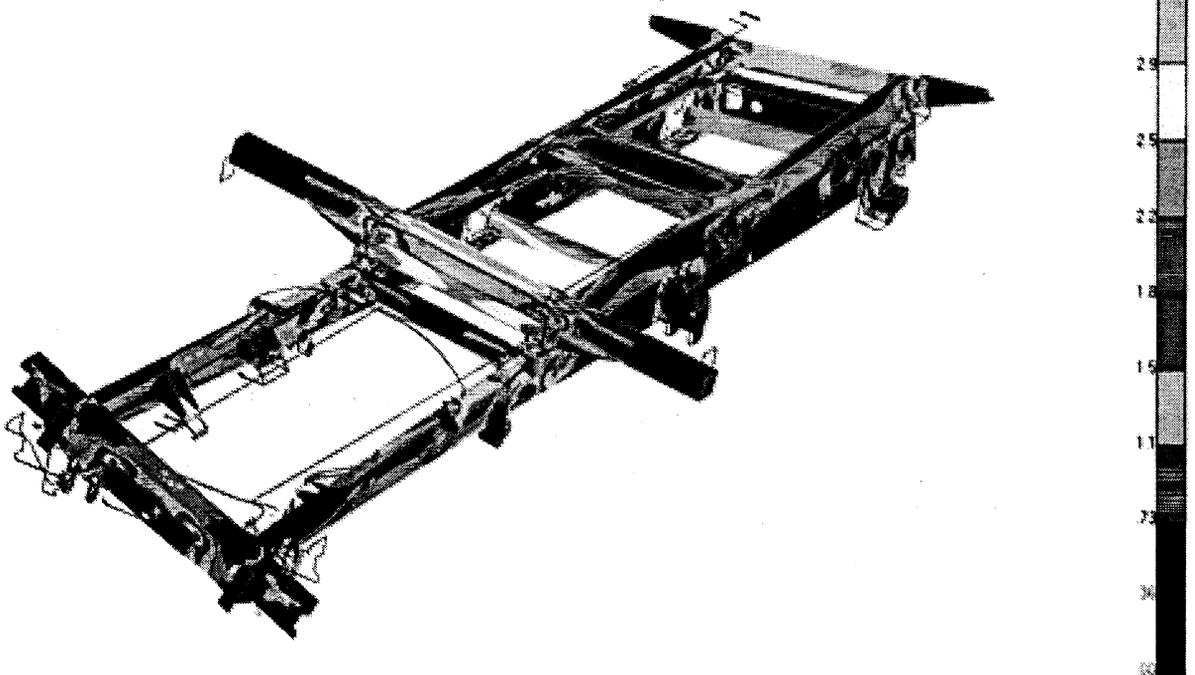


Рис. 5. Расчет собственных частот и форм колебаний рамы с определением напряжений

Пакет ADAMS используется на РУП “МАЗ” при разработке перспективных автомобилей с 1999 года. Минский автомобильный завод стал первенцем при использовании пакетов динамического анализа АТС на территории Республики Беларусь и продолжает занимать лидирующие позиции в этом направлении.

В настоящий момент разработаны и внедрены методики, позволяющие решать следующие задачи:

- определять статические и динамические характеристики упругих элементов подвески (используются модули ADAMS/View и ADAMS/Pre);
- проводить оптимизацию кинематического согласования рулевого управления и подвески (ADAMS/View);
- производить оценку статической устойчивости одиночных автомобилей и автопоездов при опрокидывании на стенде (ADAMS/View);
- оценивать устойчивость и управляемость АТС при выполнении различных маневров (ADAMS/Car и ADAMS/Pre);
- определять характеристики маневренности автопоездов (ADAMS/View);
- анализировать плавность хода;
- определять динамические характеристики нагруженности несущих систем;
- определять напряжённо-деформированное состояние отдельных деталей.

Одним из направлений использования пакета ADAMS являются задачи связанные с проектированием подвески. Основной упор сделан на моделирование рессор (рис. 6). Эта задача реализована в модуле ADAMS/Pre, где задаются характеристики профиля каждого листа рессоры, материала, параметры межлистового трения и др.

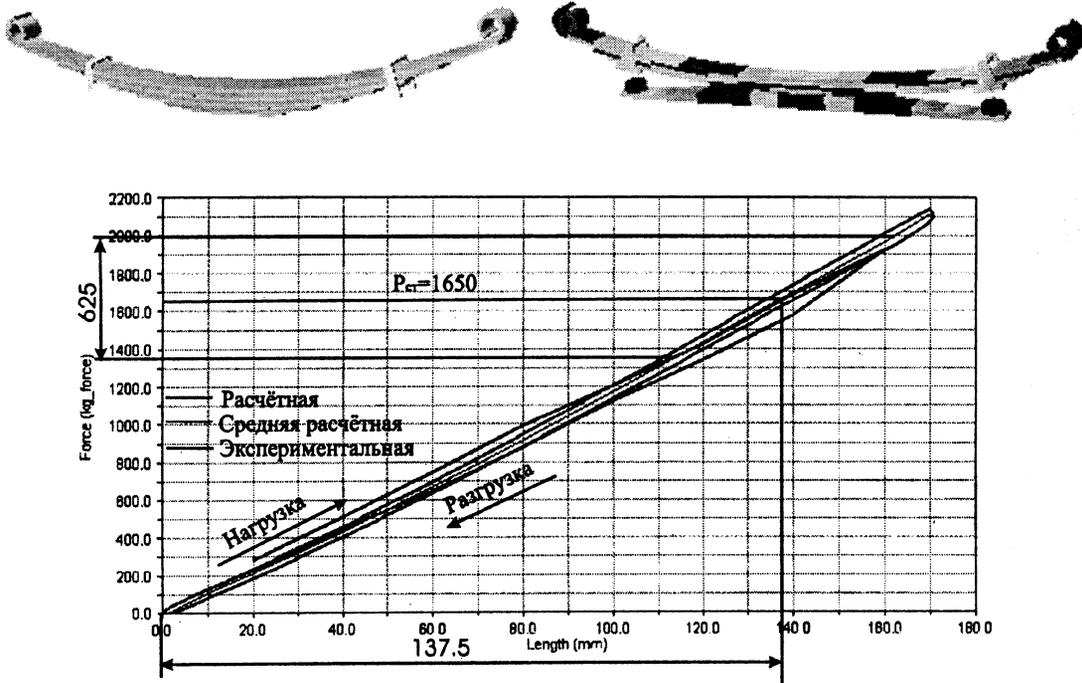


Рис. 6. Моделирование рессор

После создания моделей рессор создаются модели балок мостов, рулевой трапеции, амортизаторов, конечноэлементные модели стабилизаторов поперечной устойчивости и всё это соединяется в моделях подвесок (рис. 7).

Проведена оптимизация согласования кинематики подвески и рулевого управления. В частности, с помощью встроенного в пакет алгоритма оптимизации найдено оптимальное расположение шарового шарнира продольной рулевой тяги из условия минимизации углов схождения управляемых колес при вертикальном перемещении оси автомобиля (рис.8). На рисунке показана зависимость угла поворота колеса относительно оси шкворня при вертикальном нагружении колес до оптимизации и после оптимизации.

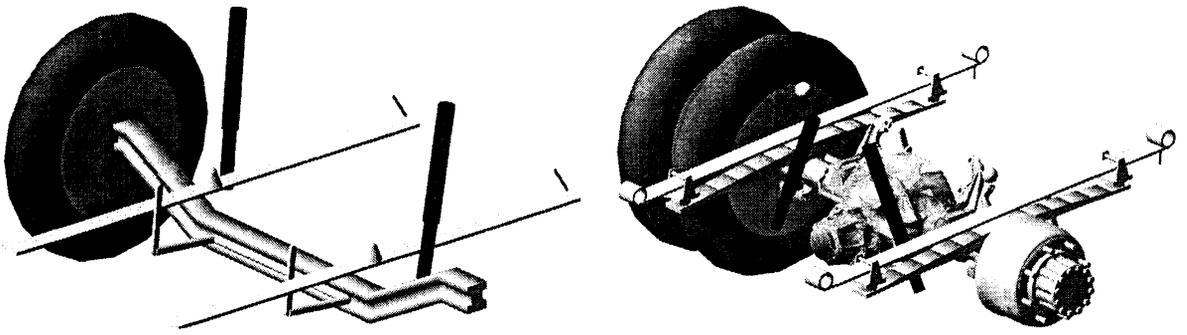


Рис. 7. Моделирование подвесок

Проведен цикл работ по оптимизации различных механических систем. Оптимизации усилия гидроцилиндра от местоположения шарниров рычажного механизма подъема кабины (рис. 9).

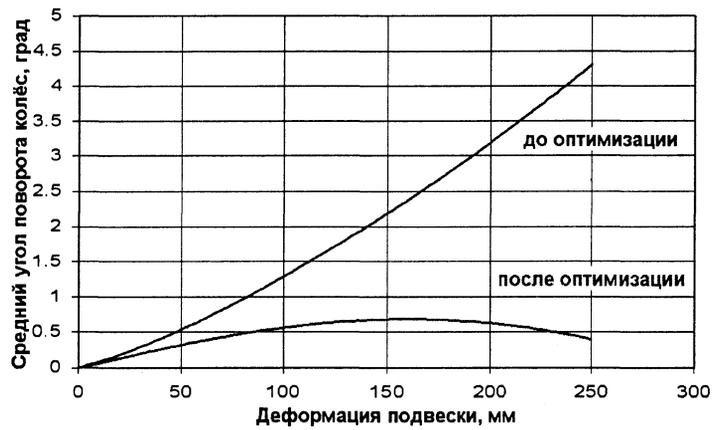
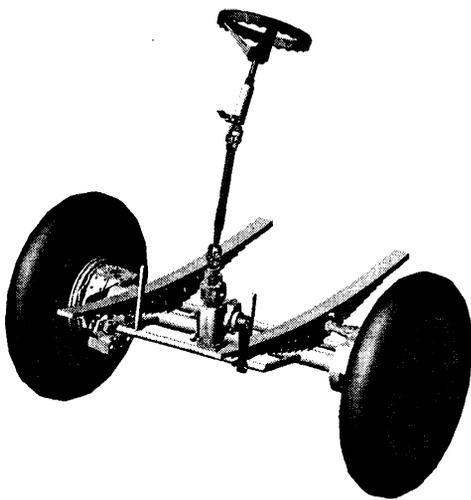


Рис. 8. Оптимизация согласования кинематики подвески и рулевого управления

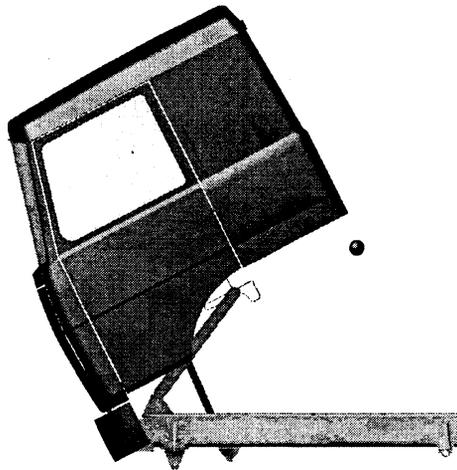


Рис. 9. Механизм подъёма кабины

Оптимизации усилия развиваемого гидроцилиндром среднетонажного автомобиля-самосвала МАЗ-4570 при разгрузке назад от местоположения шарниров механизма подъема платформы (рис. 10). На графике показана зависимость усилия развиваемого гидроцилиндром от угла подъема платформы.

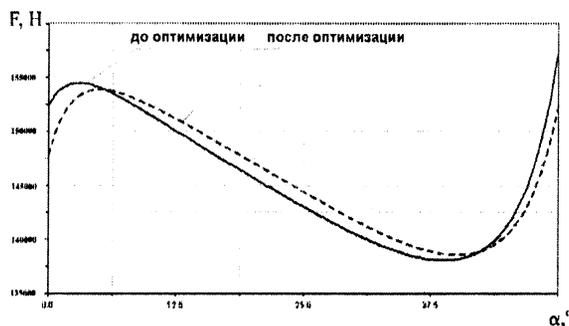
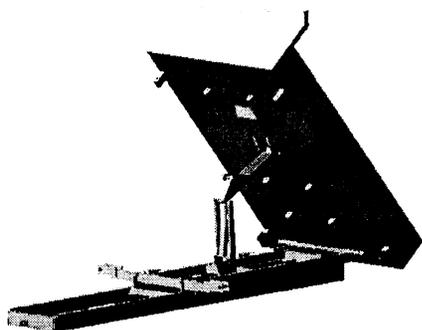


Рис. 10. Механизм подъёма платформы

Разработана и проведена оптимизация системы подъема контейнеров на автомобиль (рис. 11).

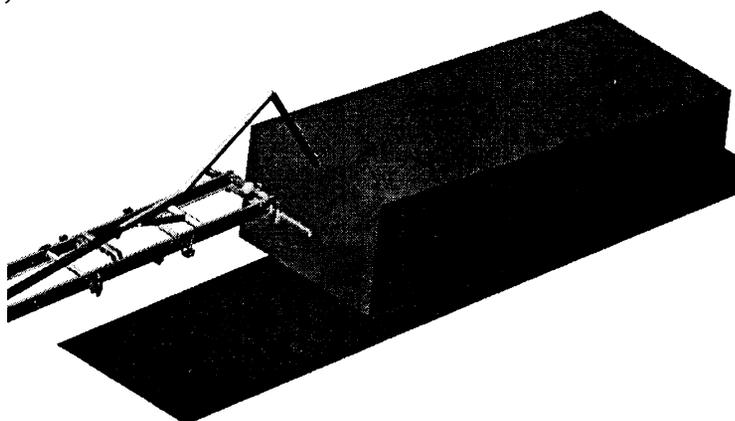


Рис. 11. Механизм подъёма контейнеров

Создана модель рядного четырехцилиндрового двигателя с учетом колебаний крутящего момента, сил инерции второго порядка, и неуравновешенности в плоскости опор коленвала и выходного вала коробки передач (рис. 12).

Проведена работа по поиску наиболее опасных режимов работы силового агрегата.

Проведена оптимизация расположения опор силового агрегата по амплитуде колебания силы в них на холостом ходу. Предложено несколько вариантов.

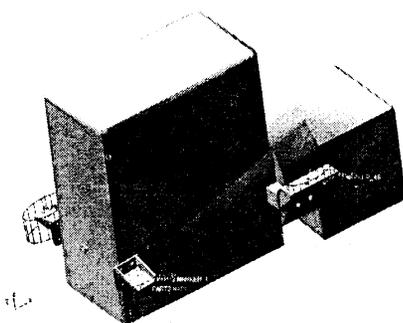


Рис. 12. Модель двигателя ММЗ

Разработана методика исследования статической устойчивости против опрокидывания автотранспортных средств, как одиночных, так и в составе автопоезда (рис.13). При выполнении данного расчёта используются модели передней и задней подвесок, гибкой рамы, переданной из пакета конечноэлементного моделирования

PATRAN, колёс, основных узлов и агрегатов, импортированных из CAD Unigraphics с реальными массово-инерционными характеристиками.

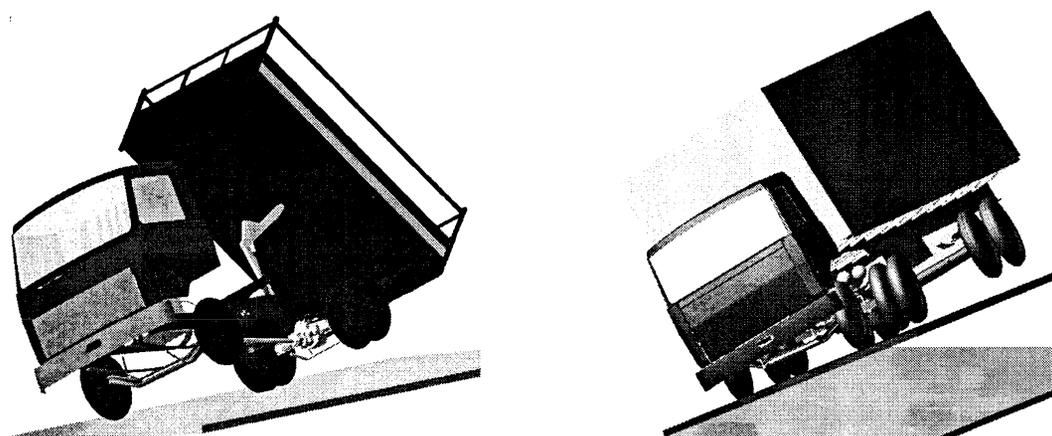


Рис. 13. Исследование статической устойчивости

Оценка управляемости и динамической устойчивости автомобилей производится в модуле ADAMS/Car с использованием моделей шаблонов (сменных узлов). Это позволяет исследовать влияние особенностей конструкции систем поддрессоривания на характеристики управляемости и устойчивости. На рис. 14 показана модель среднетонажного автомобиля-самосвала, реализованная в ADAMS/Car. Модель состоит из сменных узлов, каждый из которых (модели передней и задней подвесок, колеса, силовой агрегат, карданная передача, рулевое управление) прорабатывался отдельно.

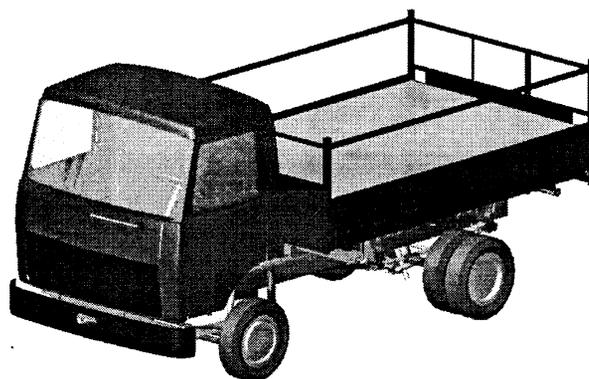


Рис. 14. Модель автомобиля в ADAMS/Car

Расчет кинематических параметров качения колеса и нагрузки на шину в пятне контакта был реализован в модуле ADAMS/Tire.

Использование модуля ADAMS/Driver позволило с помощью модели самообучающегося водителя смоделировать движение автомобиля по заданной траектории. Были проведены виртуальные испытания модели автомобиля на устойчивость и управляемость на соответствие нормативным требованиям ISO и Республики Беларусь (рис.15, 16).

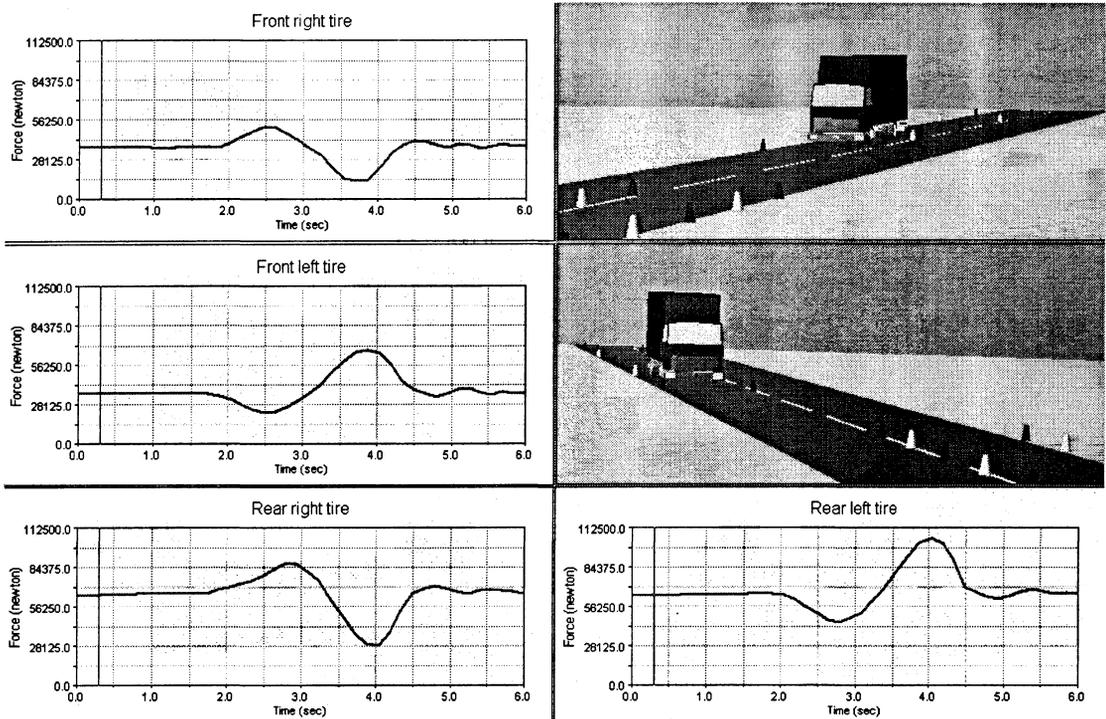


Рис. 15. Исследование динамической устойчивости

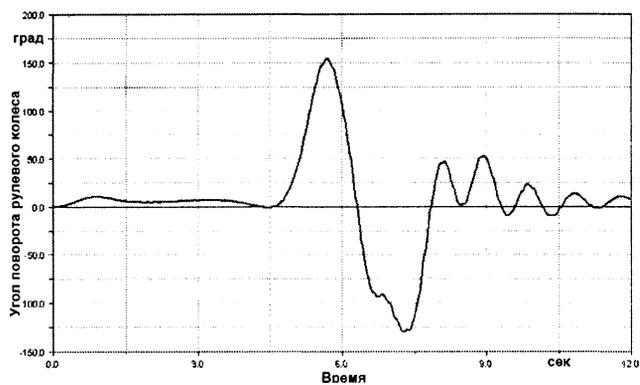
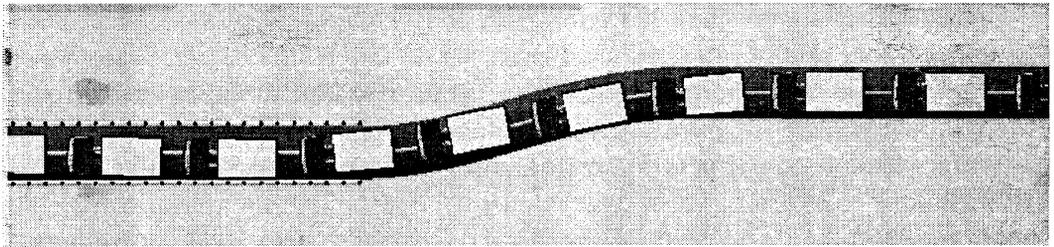


Рис.16. Исследование управляемости

Разработана методика определения манёвренности автомобилей (рис.17) и автопоездов. Особенность данной методики заключается в том, что параметры манёвренности определяются с учётом углов установки управляемых колёс, кинематики рулевой трапеции и увода шин. Помимо этого, методика позволяет оптимизировать конструктивные параметры автопоезда исходя из обеспечения требуемых показателей манёвренности.

Для удобства использования методики разработан пользовательский интерфейс (см. рис. 17), который позволяет автоматизировать ввод исходных данных и варьирование меняющихся параметров. Это даёт возможность значительно упростить и ускорить процесс определения параметров манёвренности автотранспортных средств.

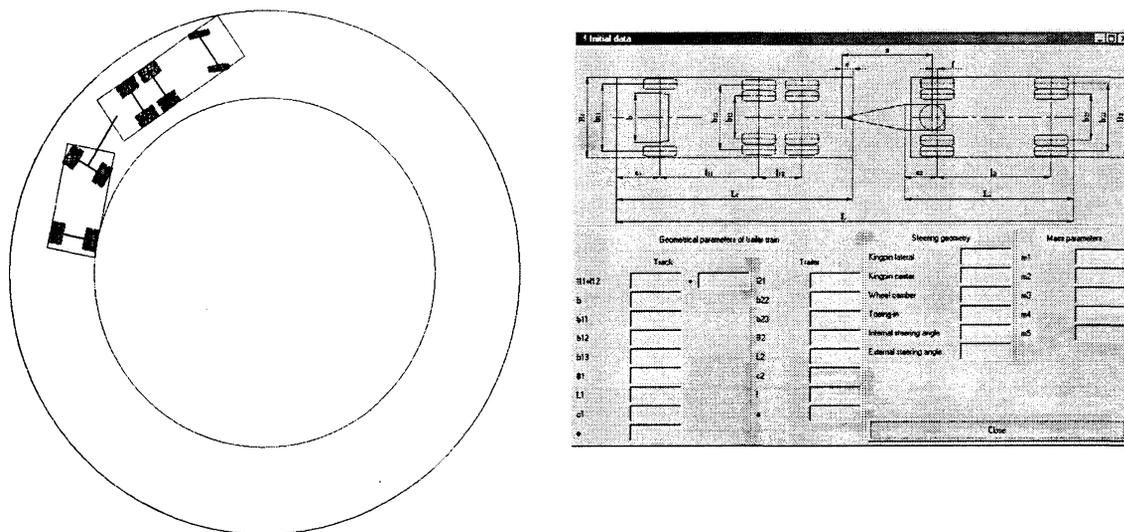


Рис. 17. Исследование манёвренности

Разработана методика оценки плавности хода автотранспортных средств при движении по различным дорогам (рис. 18). Создана модель вибростенда для анализа вибронегруженности автомобиля и пользовательский интерфейс к нему (см. рис. 18).

Разработана методика исследования нагруженности рамы при различных условиях движения. Данная методика обеспечивает моделирование различных режимов движения автомобиля и определение сил, действующих на раму при этих режимах, с последующей передачей их в качестве исходных данных для расчета рам на прочность методом конечных элементов. На рис. 19 показана модель автомобиля-самосвала МАЗ-4570 с гибкой рамой в момент диагонального вывешивания колёс и при движении по дороге “вспаханное поле”, а также графики изменения угла закручивания рамы для каждого режима.

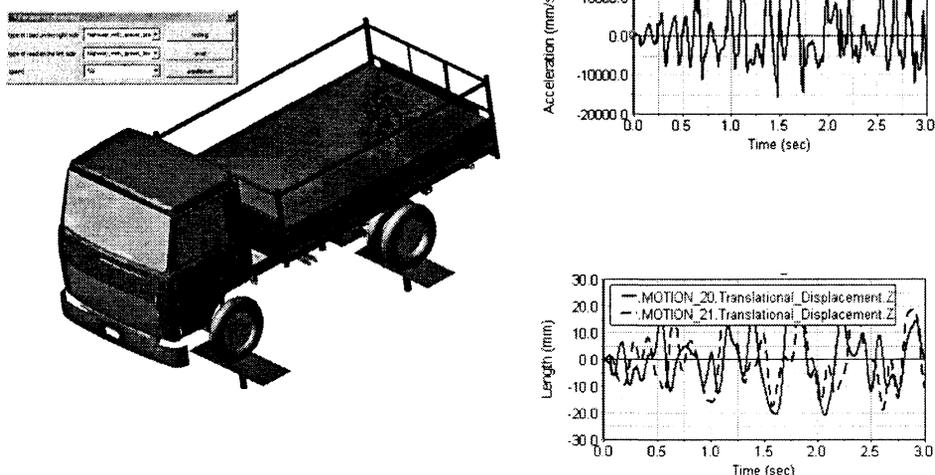


Рис. 18. Исследование плавности хода

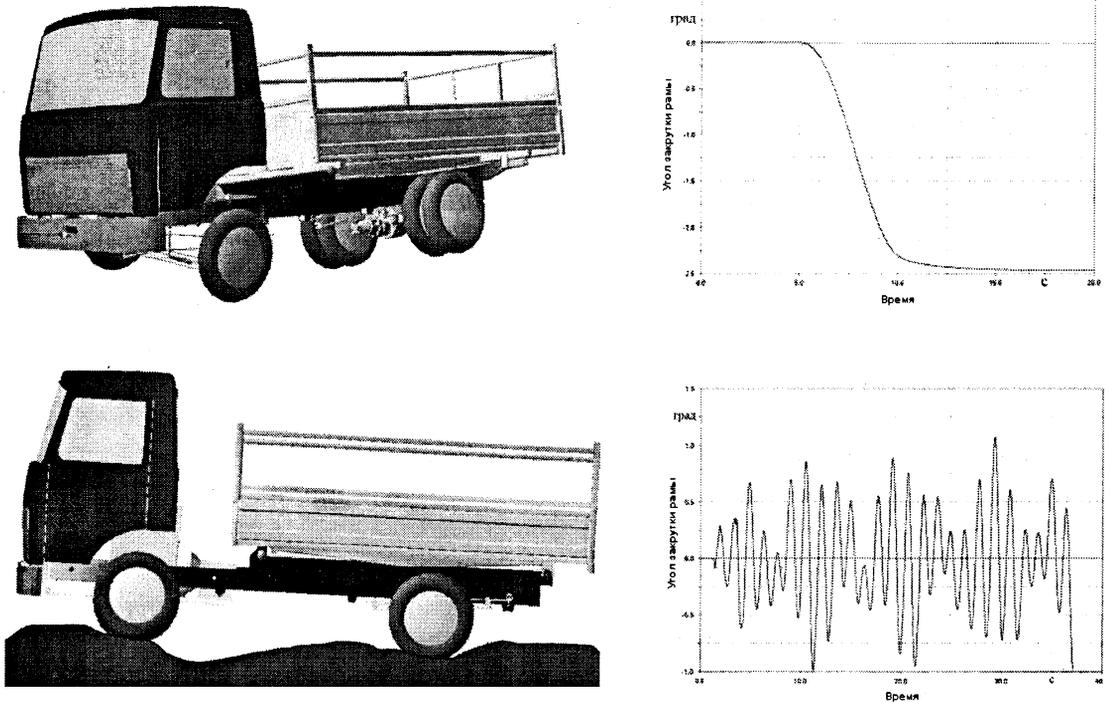


Рис. 19. Исследование нагруженности рамы

Разработана методика определения напряжённно-деформированного состояния отдельных деталей при различных условиях нагружения. На рис.20 показано напряженно-деформированное состояние балки заднего моста при движении по дороге “вспаханное поле”, и график изменения напряжений в опасном сечении при этом режиме. Результаты расчёта могут служить исходными данными при определении долговечности.

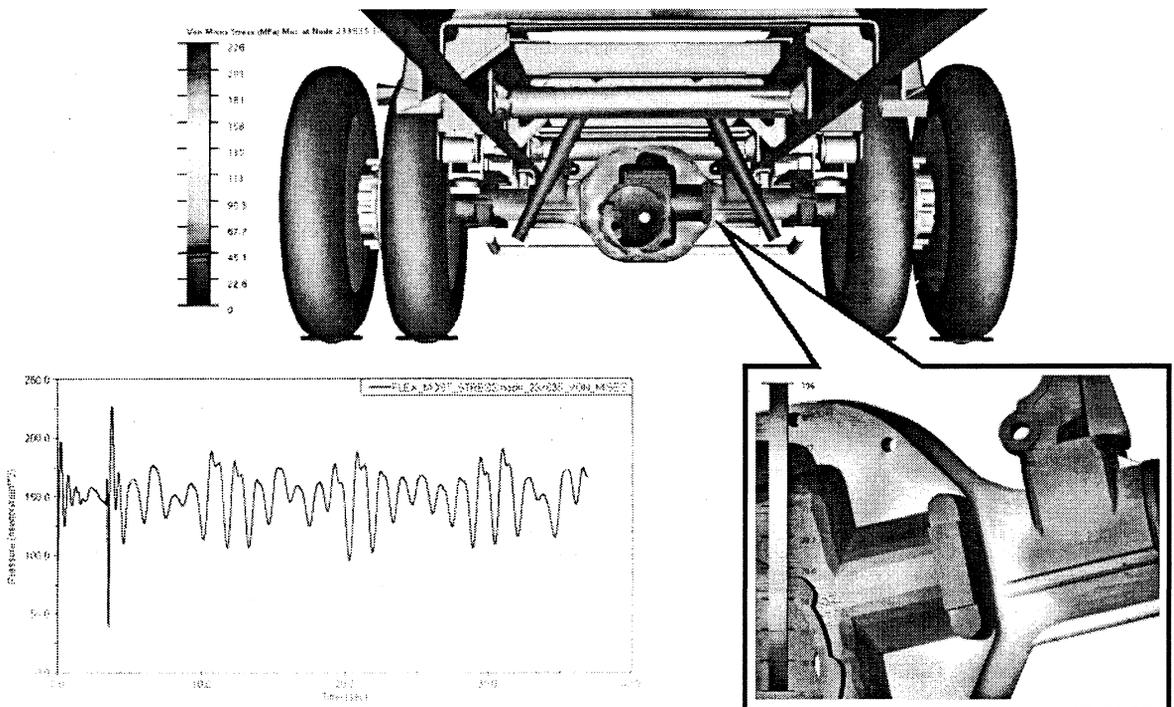


Рис. 20. Напряжённно-деформированное состояние балки заднего моста

Ближайшее наше намерение расширить применение компьютерных технологий MSC в первую очередь для решения задач анализа долговечности конструкций.

В целом можно отметить, что компьютерные технологии MSC позволяют за счет ускорения процессов и сокращения их трудозатрат создавать современную и конкурентоспособную автомобильную технику.

Расширение применения расчетных методов актуально особенно сейчас в связи с требованиями заказчиков поставки новой автомобильной техники в сокращенные сроки. Кроме того, расширение применения расчетных методов уменьшает объем необходимых испытаний. Поэтому УГК увеличивает применение расчетных методов для ускорения выпуска новой техники.

Конкуренция на автомобильном рынке заставляет больше внимания уделять дизайну автомобилей.

С этой целью внедряется дизайнерский пакет фирмы Alias/ Wavefront, который имеет интерфейс с нашей центральной CAD/CAM системой UNIGRAPHICS.

С ростом объема электронной документации остро возникает потребность в системе управления данными о продукте производства и относящемся к этому процессами (PDM). Для Управления главного конструктора такой системой выбрана система IMAN (Information Manager).

Следует отметить, что внедрение зарубежных систем PDM требует значительно больших усилий для их настройки к условиям стран СНГ, чем систем CAD/CAM/CAE. Это объясняется тем, что система документации, стандартов и процессов, связанных с PDM, имеет серьезные отличия от принятых в СНГ.

Система IMAN имеет интерфейс с системами управления предприятиями (SAP R/3, Baan, Oracle Manufacturing и др.), что позволяет оперативно использовать конструкторскую электронную документацию в рамках всего предприятия.

Одним из развивающихся направлений является использование сети Internet для взаимодействия с поставщиками. Так, например, мы взаимодействуем с итальянскими, германскими и американскими фирмами по передаче трехмерных моделей по двигателям, деталям кабин, оснастке.

Для эффективного использования указанных систем необходима подготовка высококвалифицированных специалистов. Таких специалистов мы готовим через кафедру Белорусского национального технического университета на Минском автозаводе в процессе прохождения длительной специализированной практики, выполнения курсовых и дипломных проектов.

С использованных приведенных выше технологий срок создания новых автомобилей сокращен до 1,5 года.

УДК 620.178.3

**Е.К. Почтенный**

## **СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

*Институт механики машин Национальной академии наук Беларуси*

Результаты испытаний при регулярном нагружении в области многоциклового усталости с использованием экспериментально – аналитического метода позволяют вести вероятностные расчеты циклической долговечности. Планирование и анализ результатов испытаний проводятся с использованием уравнений кривой усталости [1-3]: