



# ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ НАН БЕЛАРУСИ

УДК 629.3.018

М.С. ВЫСОЦКИЙ, акад. НАН Беларуси;  
С.В. ХАРИТОНЧИК, А.В. ШМЕЛЕВ, кандидаты техн. наук  
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

## НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ АВТОТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ

*В статье рассмотрены основные результаты развития компьютерных технологий проектирования и виртуальных испытаний, применяемых в Республиканском компьютерном центре машиностроительного профиля (РКЦМП) при разработке новых конструкций и автотранспортных средств. Приведены некоторые примеры проведения расчетных исследований, позволяющие оценить достоверность результатов. Подведены итоги применения современных технологий при разработке многозвенного автопоезда с активным приводом управляемых прицепных звеньев. Обозначены планы дальнейшей работы центра.*

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, модель, виртуальные испытания, дизайн, макет, проектирование, прочность, долговечность, усталость, безопасность, сертификация, многозвенный автопоезд, электромеханическая трансмиссия

Обеспечение высокого качества создаваемой машиностроительной продукции при сокращении сроков и материальных средств на процесс ее проектирования является одной из актуальных задач отечественного автомобилестроения. Наиболее эффективный способ ее решения — применение современных компьютерных технологий проектирования и инженерного анализа как отдельных узлов и конструкций, так и автомобиля в целом. Уже сегодня применение названных технологий позволяет воспроизвести в виртуальной среде практически любой комплекс инженерных задач, включая проведение виртуальных испытаний по оценке соответствия конструкции или машины действующим нормам и правилам безопасности. Необходимо также отметить, что достижение наилучшего результата возможно только при реализации комплексного подхода к процессу автоматизированной разработки новой машины. Для иллюстрации сказанного на рисунке 1 приведены направления работ, выполняемых в рамках системы виртуального проектирования, реализованной в РКЦМП, который входит в структуру Объединенного института машиностроения Национальной академии наук Беларуси.

Созданные в РКЦМП комплексные наработки образуют самостоятельную замкнутую цепочку компьютерного проектирования, базирующуюся на на-

укоемких технологиях. Как видно из рисунка 1, выполняемые в компьютерном центре работы включают основные стадии создания машины: начиная от разработки конструкторской документации и выбора дизайнерских решений до проведения виртуальных испытаний по оценке соответствия машин действующим нормам и завершая оценкой ресурса конструкций. В основе указанных технологий лежат последние достижения в области математического описания поверхностей сложной формы, моделирования механических многокомпонентных систем и, конечно же, применения численных методов для решения задач прикладной механики.

**Дизайн и проектирование.** Одно из перспективных направлений работ, развиваемых в компьютерном центре, — дизайн-проектирование. Несмотря на достаточно короткий период работы, который не превышает еще 10 лет, в направлении дизайна удалось достичь заметных результатов. Компьютерный центр регулярно выполняет заказы на данный вид работ от ОАО «МАЗ» и ОАО «Белкоммунмаш». Недавно получил свою практическую реализацию созданный фирменный стиль для ЗАО «МАЗ-МАН», показанный на рисунке 2.

Достижение высоких результатов в направлении дизайна является итогом реализации системного подхода, включающего основные стадии проработки новой машины:

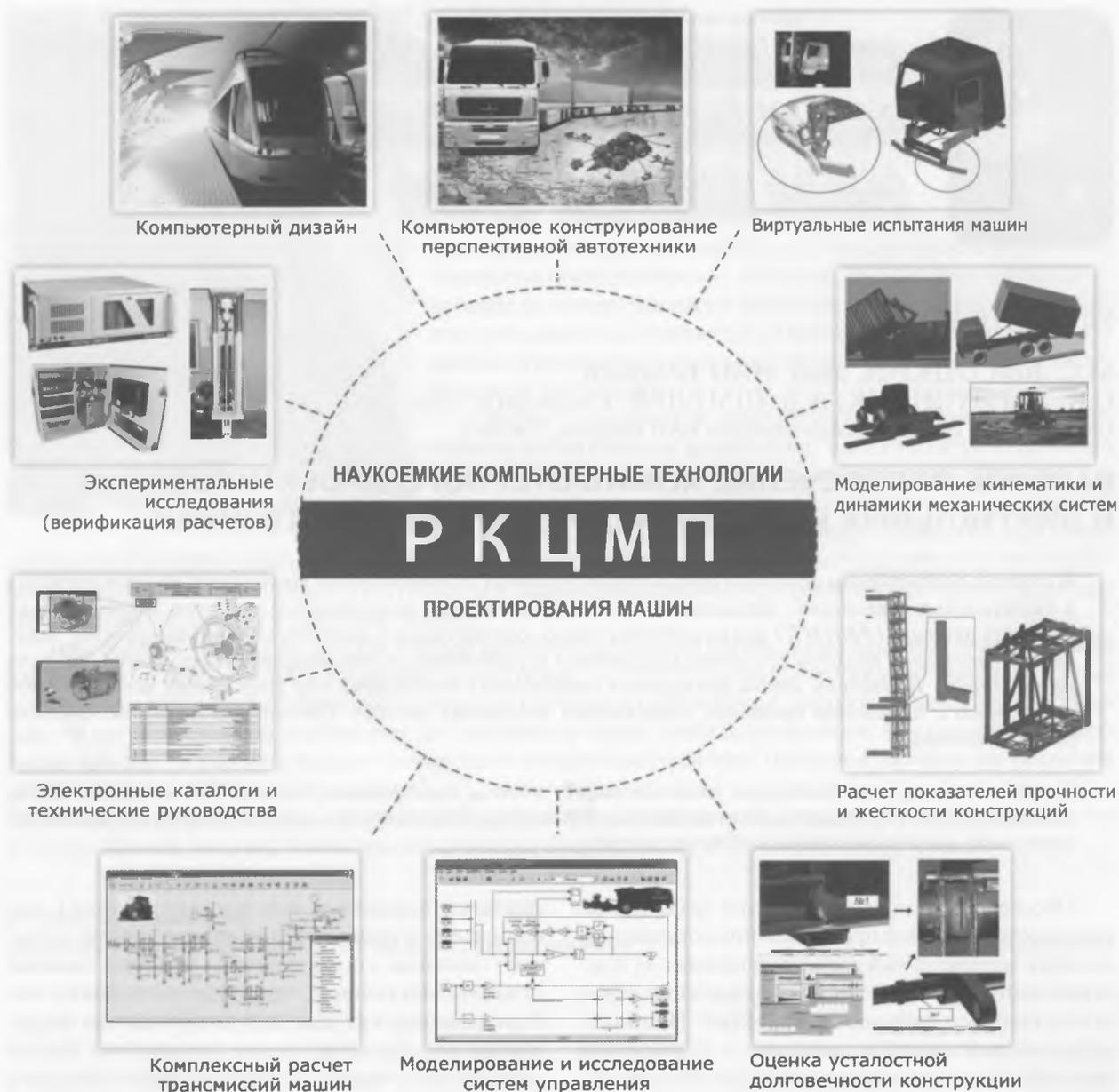


Рисунок 1 — Научные компьютерные технологии проектирования машин

- составление дизайн-предложения, содержащего анализ информации об объекте разработки, обоснование и концепцию реализации работы;
- разработку технического задания;
- концептуальный и эскизный дизайн-проект;
- технический дизайн-проект, содержащий детальную проработку геометрии конструкции и подготовку данных к производству на основе САМ-технологий;
- макетирование с использованием технологии быстрого прототипирования FDM, 3D-сканирования и оборудования с ЧПУ;
- разработку рабочей документации на изделие.

При этом системность реализованного подхода заключается не только в сочетании всех перечисленных этапов работ, а также в глубине их дизайнерской проработки. Учитывая, что речь идет в основном о транспортных средствах, то особое

внимание уделяется соблюдению существующих эргономических требований к рабочим местам водителей и операторов машин, для чего сформированы методики проектирования и средства автоматизации данного процесса. Это позволяет в краткие сроки выявить закономерности художественно-конструкторских и эргономических решений интерьера и экстерьера машин, а также обеспечить высокое качество формообразования поверхностей свободной формы при создании трехмерных моделей конструкций и деталей проектируемой техники с помощью программных средств 3D-моделирования.

С целью обеспечения наибольшей эффективности дизайнерских работ в центре была создана макетная мастерская. Ее специалистами, помимо выполнения отечественных заказов, в 2011 году был изготовлен масштабный презентационный



а



б

Рисунок 2 — Результаты разработки дизайна интерьера и экстерьера машин:  
а — сочлененный трамвай модели 843 производства «Белкоммунмаш»; б — кабина автомобиля ЗАО «МАЗ-МАН»

макет «Силовой модуль GTW+», показанного на рисунке 3, для одной из ведущих компаний по производству рельсового транспорта Stadler Bussnang AG, известной по поставке в республику новых электропоездов для пригородного и межрегионального сообщения. Макет был представлен на III Международном железнодорожном салоне «ЭКСПО 1520» в подмосковной Щербинке, в сентябре 2011 года.

**Виртуальное моделирование испытаний.** Из развешиваемых в Центре технологий компьютерного проектирования наиболее наукоемкими и востребованными являются виртуальные испытания, которые вносят существенный вклад в сокращение времени и материальных затрат на разработку новой машиностроительной продукции.

Одними из ключевых универсальных элементов в рассматриваемой системе методических и программных средств является структура и методология программно-аппаратного комплекса «Виртуальный полигон», в основу которого заложены модели и методики проведения виртуальных испытаний мобильных машин по критериям безопасности, надежности и экологичности. Среди основных наименований работ, относящихся к данной тематике, можно выделить:

- оценку показателей маневренности, плавности хода, управляемости и устойчивости автомобилей (нормативные документы: СТБ ГОСТ Р 52302-2006, СТБ 1877-2008, ЕЭК ООН №79, ГОСТ Р 12.1.012-2004, СанПиН № 11-08-94, СанПиН № 11-10-94);
- проверку выполнения Правил ЕЭК ООН, касающихся требований к прочности и жесткости элементов конструкций транспортных средств (Правила № 29, 52, 58, 66, 73, 93, 107), а также СТБ ИСО 3471-2001 и ГОСТ 12.2.002.2-91.

Успешной реализации и развитию приведенного комплекса работ послужило то, что наши специалисты одними из первых в СНГ приступи-

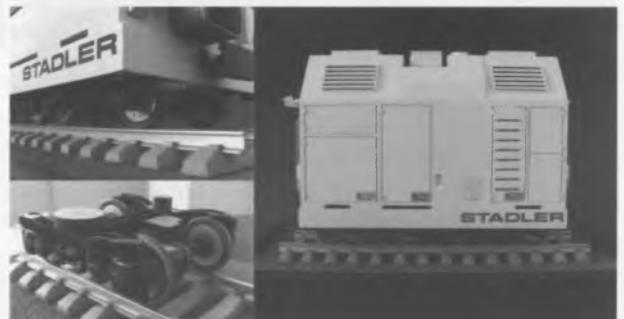


Рисунок 3 — Презентационный макет «Силовой модуль GTW+»

ли к освоению программного комплекса кинематико-динамического анализа MSC.ADAMS. За прошедшие с этого момента уже практически 15 лет накоплен значительный опыт в проведении расчетных исследований автомобилей и их узлов, который отражен в участии в разработках уже десятков единиц новой техники таких крупных производителей, как ОАО «МАЗ», ОАО «БелАЗ», РУП «МТЗ» и ОАО «МЗКТ».

Среди наиболее часто выполняемых работ в области анализа динамики и кинематики машин — проведение виртуальных испытаний по определению показателей маневренности, управляемости и устойчивости. На рисунке 4 приведены некоторые графические результаты таких работ. При этом сопоставление экспериментальных данных с расчетными показывает высокую степень соответствия. Например, относительная погрешность определения угла, при котором происходит опрокидывание автомобиля, составляет порядка 5 %.

Необходимо отметить сложность проведения таких исследований. Для реализации всего комплекса расчетов требуется разработка динамической модели автомобиля и воспроизводимых условий испытаний, включающей десятки наименований наиболее значимых узлов машины и еще большее число математически описываемых граничных условий и связей, различных характеристик, в том числе нелинейных, задающих взаимодействие компонентов всей модели.

Особое место в процессе инженерного анализа поведения автомобиля, конечно же, отводится моделированию взаимодействия колеса с дорогой. В этих целях нашим центром в рамках гранта БРФФИ проводились совместные исследования с МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результатом работы стало создание новой комплексной модели эластичного колеса, учитывающей трибологические характеристики подсистемы «шина — опорная поверхность», позволяющей проводить весь спектр виртуальных испытаний транспортных средств в процессе проектирования и получать предварительную оценку эксплуатационных свойств конструкции без изготовления натурального образца новой машины. Полученная модель шины дала возможность уточнить результаты виртуальных испытаний по оценке показателей управляемости и устойчивости на 7—15 % и сократить время разработки общей математической модели транспортного средства до двух раз.

Следующим востребованным комплексом работ, выполняемых РКЦМП в рамках виртуальных испытаний, является выполнение расчетной оценки параметров прочности и жесткости элементов конструкций транспортных средств. В данном контексте можно выделить два основных направления, получивших развитие. Первое — это исследование силовых систем и элементов конструкций машин на

соответствие требованиям пассивной безопасности, и второе — расчетное определение параметров нагруженности несущих конструкций машин с последующей оценкой их долговечности.

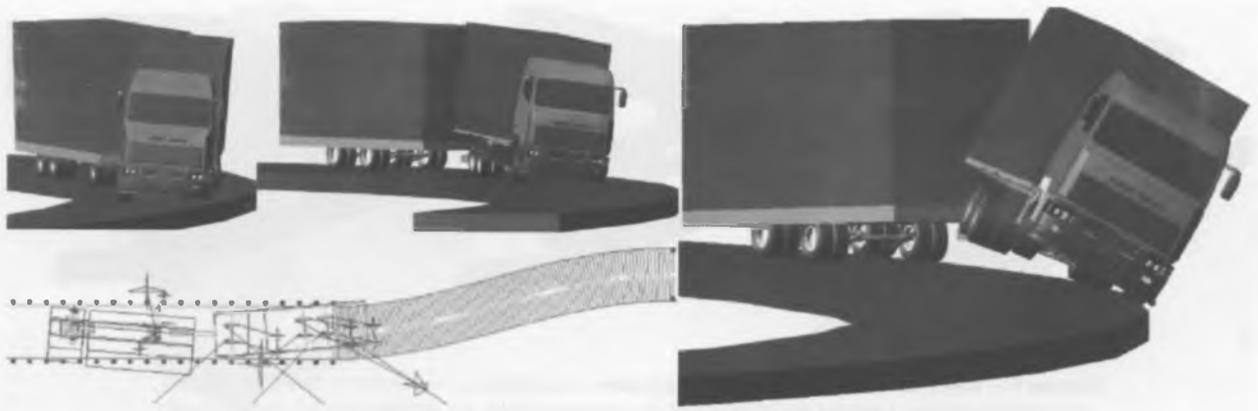
Развитию первого направления способствовало то, что Правила ЕЭК ООН уже сегодня допускают замену натуральных испытаний некоторых систем транспортных средств расчетными, что вызывает очевидную заинтересованность в таких работах у предприятий-изготовителей и продавцов автотехники. Условием проведения таких виртуальных испытаний, указанных в Правилах, конечно же, является их адекватность. Последнее достигается тщательной отработкой методик моделирования путем анализа и сопоставления результатов натуральных и виртуальных испытаний, в итоге которого выделяются наиболее значимые параметры компьютерных моделей, способы описания и задания граничных условий и свойств материалов.

Одним из наиболее важных достижений в области развития методологии оценки прочностных параметров конструкций можно назвать разработку Методической инструкции по расчетным испытаниям передних противоподкатных защитных устройств (ППЗУ) согласно требованиям Правил ЕЭК ООН № 93. Эта инструкция согласована нами с официальным органом по стандартизации — Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь. Такое событие произошло впервые на территории СНГ. В результате чего был сделан значительный шаг к признанию достоверности работ в области математического и компьютерного моделирования.

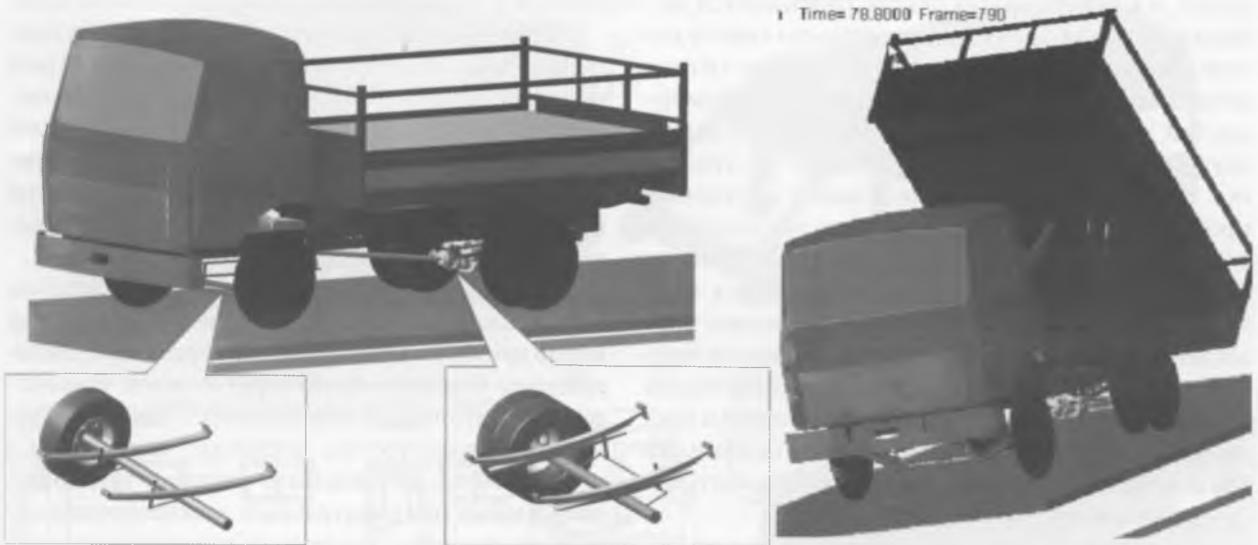
Отметим, что отработка методики виртуальных испытаний ППЗУ на соответствие требованиям Правилам ЕЭК ООН № 93 выполнялась сразу в нескольких программных пакетах (LS-DYNA, MSC.Patran/Nastran и ANSYS) для возможности выработки единых рекомендаций. Некоторые результаты данных исследований приведены на рисунке 5. Сопоставление результатов моделирования с данными натуральных испытаний показали, что их отличие находится в пределах 10 %. При этом виртуальная модель ведет себя несколько более податливой, чем натуральный образец ППЗУ, что исключает риск завышения жесткости конструкции.

На рисунке 6 приведены результаты моделирования испытаний по оценке соответствия показателей жесткости автомобильных конструкций требованиям Правил ЕЭК ООН.

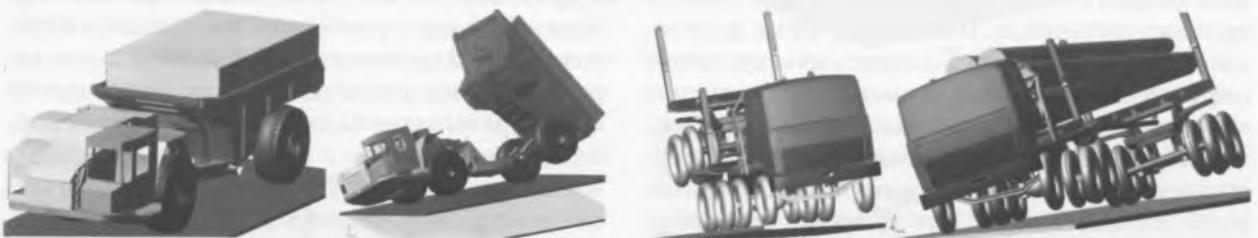
Приложением к расчетному прочностному анализу автотранспортных конструкций является оценка их долговечности, так как каждого производителя непосредственно интересует вопрос, обеспечит ли разрабатываемая конструкция предъявляемые к ней требования по ресурсу и на какой пробег можно гарантировать отсутствие ее отказов. Учитывая, что одной из основных причин выхода из строя несущих конструкций явля-



*a*

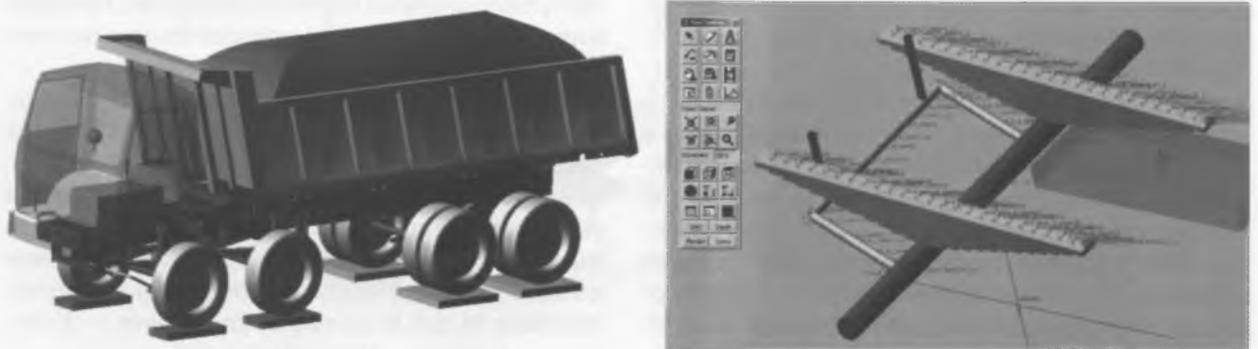


*б*



*в*

*г*



*д*

Рисунок 4 — Виртуальные испытания автомобильной техники. Расчетное определение показателей:  
*a* — управляемости; *б, в, г* — устойчивости; *д* — плавности хода

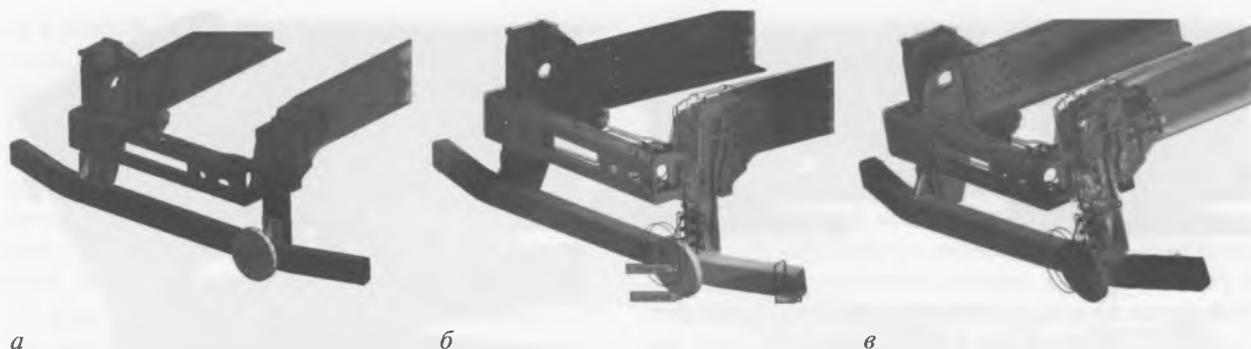


Рисунок 5 — Виртуальные испытания ШЗУ грузового автомобиля: а — конечно-элементная модель; результаты расчета, картина распределения: б — перемещений; в — эквивалентных напряжений

ется накопление и развитие усталостных повреждений, в компьютерном центре развиваются методы расчетной оценки долговечности конструкций. На основе наработанных в Институте результатов в области исследования закономерностей накопления усталостных повреждений специалистами Центра разработано программное обеспечение для схематизации случайных процессов нагружения и расчета усталостной долговечности несущих конструкций машин по результатам как натурных испытаний, так и их виртуального моделирования. В последнее время акцент делается на развитии применения численных методов расчета в оценке долговечности сварных соединений конструкций, которые в преобладающем числе случаев являются причинами преждевременного достижения предельного состояния машин.

На рисунке 7 приведены результаты расчетного анализа причин разрушения экспериментальной конструкции штампованной опоры с осью прицепа грузового автомобиля. Полученные в ходе исследований данные позволили определить конструктивные решения, позволяющие повысить долговечность конструкции до уровня требований завода-изготовителя. При этом расчетная оценка числа циклов до наступления предельного состояния оси составила порядка 110 тыс. циклов, в то время как результаты стеновых испытаний трех конструкций показали среднюю наработку в 255 тыс. циклов. Учитывая, что полученные расчетные значения соответствуют достаточно высокой вероятности неразрушения — 97,6 %, то полученный результат является вполне приемлемым для инженерной практики.

**Разработка перспективной техники.** К важным достижениям РКЦМП в области теоретических исследований следует отнести обоснование и разработку концепции и принципов модульного проектирования многозвенных автопоездов, а также принципов создания математических и компьютерных моделей для исследования эксплуатационных свойств при реализации комплекса виртуальных испытаний. Это позволило исследовать ранее не рассмотренные в теории автомобиля случаи криволинейного движения транспортных средств и

сформировать подходы к созданию алгоритмов управления движением многозвенных автопоездов.

Примером реализации сквозного цикла проектирования новой техники с автоматизацией всех основных этапов работ, т. е. от проработки дизайна машины до оценки ресурса, когда все работы выполняются с применением современных компьютерных технологий, является инновационный проект по разработке отечественных многозвенных автопоездов.

Многозвенные автопоезда — принципиально новый класс техники для перевозки различных видов грузов по магистральным артериям, соединяющим Европу и Азию через Россию. В конструкции автопоезда используются самые современные технические решения, материалы и компоненты, разнесенная силовая установка, встроенный индивидуальный электропривод колес, электронные системы согласованного автоматического управления силовыми установками и приводом звеньев, электронные системы автоматизированного управления согласованным криволинейным движением звеньев, автоматическое регулирование длины сцепки и др. Специалистами центра выполнены дизайнерские и общие компоновочные работы с принципиально новыми подходами к интерьеру и экстерьеру, конструктивными нетрадиционными решениями трансмиссий, рулевого управления, тормозной системы, подвески и др., в том числе с возможностью использования альтернативных источников энергии, применение которых позволит устанавливать силовые агрегаты значительно меньшей мощности.

К 80-летию НАН Беларуси совместно с Минским автомобильным заводом впервые публично был представлен первый экспериментальный образец многозвенного автопоезда, показанный на рисунке 8, который успешно прошел как полигонные испытания, так и подтвердил все заявленные показатели во время опытного пробега по автомагистрали М-1/Е30 по маршруту: Минск — Колоново — Крупки — Минск (всего 354 км).

Результатом продолжения совместных работ в тесном контакте с МАЗом и при участии таких крупнейших зарубежных компаний, как ZF Passau GmbH



Рисунок 6 — Результаты виртуальных испытаний автомобильных конструкций. Правила ЕЭК ООН:

а — № 29, моделирование испытаний кабины автомобиля МАЗ; б — № 52, Шасси Ситроен Джампер и картина деформированного состояния крыши автобуса под действием статической нагрузки; в — № 29 (02), чертеж автомобиля-фургона марки «Любава» и картина деформирования фургона под действием плиты массой 10 т; з — № 80 и п. 4.3.12 СТБ 2025-2009, схема нагружения и деформированное состояние сидений школьного автобуса Неман 420233-20

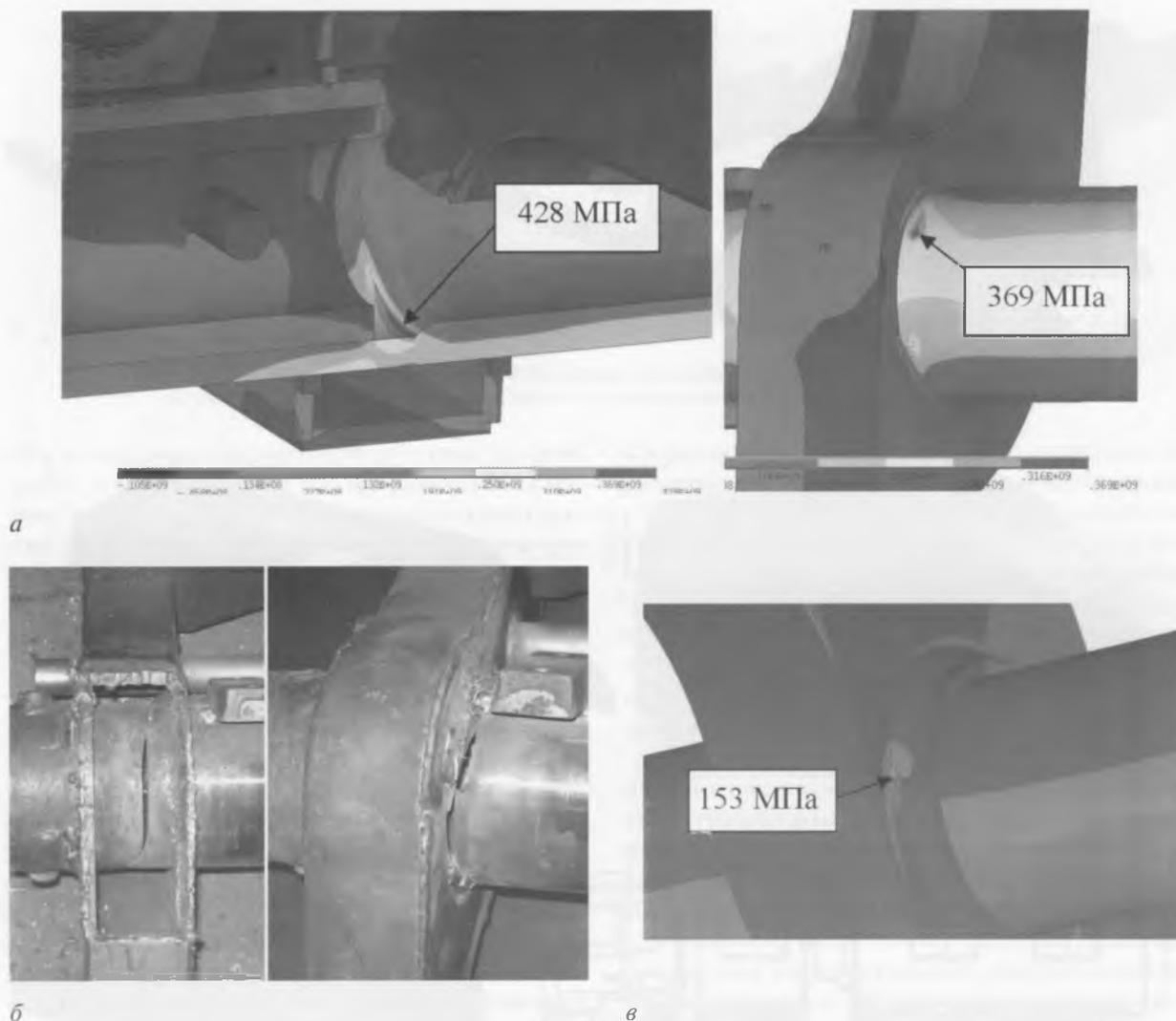


Рисунок 7 — Расчетный анализ причин разрушения экспериментальной конструкции штампованной опоры с осью:  
*а* — растягивающие напряжения (расчет); *б* — разрушение в эксперименте (вид снизу); *в* — вариант конструкции, удовлетворяющий требованиям долговечности

(Германия) стала разработка второго экспериментального образца многозвенного автопоезда с электромеханической трансмиссией и управляемыми ко-

лесами грузовых звеньев, показанного на рисунке 9. Впервые новинка была представлена широкой публике на выставке «БАМАП — 2012», за что Институт



Рисунок 8 — Испытания первого экспериментального образца многозвенного автопоезда:  
*а* — полигонные; *б* — пробеговые в реальных условиях эксплуатации



Рисунок 9 — Второй экспериментальный образец многозвенного автопоезда

получил Почетный диплом за совместную с ОАО «МАЗ» инновационную разработку. На текущий момент завершаются работы по подготовке данного экспериментального образца к натурным испытаниям.

В автопоезде каждый тяговый модуль оснащен автономной дизель-генераторной силовой установкой, состоящей из двигателя внутреннего сгорания и агрегированного с ним мотор-генератора, вырабатывающего электрическую энергию, передаваемую через силовую электронику системой управления трансмиссией на ведущий мост с установленными тяговыми мотор-колесами. Разработка конструкторской документации на этот образец была полностью выполнена сотрудниками РКЦМП.

Помимо разработки грузовых автомобилей, Центр принимает активное участие в создании пассажирской техники. При участии наших специалистов разработаны и поставлены на производство супернизкопольные городские автобусы второго поколения МАЗ-203; низкопольные городские автобусы второго поколения средней пассажироместности МАЗ-206; супернизкопольный сочлененный городской автобус второго поколения МАЗ-205 с улучшенным пассажирообменом (рисунок 10). Все они соответствуют нормам по экологии Евро-5.

Предлагаемые нами решения и научные результаты получают высокие международные

оценки. На масштабном международном конгрессе, организованном FISITA (Международная федерация национальных автомобильных обществ), проходившем в 2010 году в г. Будапеште, доклад, посвященный вопросам исследования и моделирования многозвенных автопоездов, был отмечен дипломом. Стилевые решения по экстерьеру кабины грузового автомобиля, разработанные дизайнерами центра, получили 1-е место в номинации «За лучший дизайн-проект» на VIII Международном автомобильном научном форуме, проходившем в Москве.

Республиканский компьютерный центр машиностроительного профиля для целого ряда выпускников Белорусских вузов и, в частности, кафедры «Большегрузные автомобили» БНТУ, стал своего рода дорогой в жизнь от студенческой скамьи к академической науке и производству. Самое важное, что на их глазах и именно с их помощью происходит инновационное развитие базовой отрасли нашей экономики — автомобилестроения. И нам действительно есть что предложить поколению вчерашних и сегодняшних студентов.

Компьютерный центр машиностроительного профиля является одним из самых молодых подразделений института. Количество сотрудников в возрасте до 30 лет составляет более 40%! Молодежь с достоинством несет груз ответственности



Рисунок 10 — Супернизкопольный сочлененный городской автобус второго поколения МАЗ-205

за освоение и развитие новых научных направлений исследований, реализацию результатов на практике при разработке инновационной и экспортоориентированной продукции. Начиная с 2006 года, уже 9 наших молодых специалистов были удостоены Президентских стипендий талантливым молодым ученым! Это достаточно большое число, учитывая, что в год присуждается до 100 стипендий представителям всех видов научных и исследовательских организаций. Данная цифра также говорит о значимости для республики работ, выполняемых в институте молодежью, но и не следует забывать, что определенная часть этого успеха была заложена трудами не одного предшествующего поколения ученых.

**Планы.** Новые задачи на перспективу по амбициозности не уступают реализованным за последние годы. В планах — исследование и разработка системных подходов и методов проектирования рабочих мест и кабин мобильных машин на основе современных технических требований, перспективных систем, узлов, агрегатов и материалов с учетом эргономики и технической эстетики для повышения их безопасности и комфортабельности, уменьшения материалоемкости и аэродинамического сопротивления.

РКЦМП планирует дальнейшее развитие научного обеспечения виртуальных испытаний и расширение их применения в промышленной практике. С этой целью подготовлены и направлены в Госстандарт организационно-методические документы Центра виртуальных испытаний мобильных машин «АКАДЕМ-ТЕСТ», на что уже получено принципиальное решение о возможности аккредитации в Республике Беларусь Центра виртуальных испытаний мобильных машин. Белорусский государственный центр аккредитации (БГЦА) уже провел предварительную оцен-

ку Центра виртуальных испытаний мобильных машин и предоставил отчет, содержащий положительную оценку заявленных материалов. После окончания данных мероприятий в БГЦА будет направлена заявка на проведение аккредитации «АКАДЕМ-ТЕСТ» в качестве испытательной лаборатории по Правилам ЕЭК ООН № 29, 52, 58, 66, 73, 93, 107.

Значительные работы предстоят по отработке конструкций и систем грузовых автомобилей, многозвенных автопоездов, автобусов и другой техники для внедрения в производство. При этом одной из наиболее значимых задач является локализация изготовления наукоемких компонентов, которые, учитывая развиваемые принципы модульности автоконструкций, будет возможно применять на автомобилях и автобусах традиционных компоновочных схем. С этой целью в рамках заданий ГНТП «Машиностроение» начата разработка ведущих мостов порталного типа для супернизкопольного пассажирского транспорта. Портальный мост имеет более сложную конструкцию (рисунок 11) и для его изготовления требуется высокотехнологичное точное оборудование.

Решение поставленной задачи будет обеспечено применением современных компьютерных технологий проектирования и производства, в т.ч. с применением интегрированной системы CAD—CAE—CAM, позволяющей быстро перейти от трехмерных компьютерных моделей к расчетной оценке эксплуатационных показателей конструкций и завершить этот процесс разработкой программ для станков с ЧПУ для изготовления модельной и штамповой оснастки.

Реализация задания позволит полностью обеспечить потребность отечественных автосборочных предприятий в мостах указанного типа, а также усилить экспортный потенциал отечественной продукции. Импортозамещающий эффект только от выпуска этой продукции в ближайшее время составит до 10 млн долларов США.

Среди планов на ближайшее будущее разработка концепции семейства многосекционных автобусов с гибридным приводом пассажироместимостью до 200 человек для массовых регулярных



Рисунок 11 — Ведущий мост порталного типа

перевозок по выделенным полосам движения для обеспечения связи с городами-спутниками, крупными промышленными и социальными объектами. Создание многосекционного автобуса с гибридным приводом позволит сократить расход энергии при перевозке одного пассажира на 1 км на 25–30 %, ускорить создание высокоэффективных и мобильных систем транспортной связи.

Наша республика хоть и считается относительно небольшой, но обладает достаточной емкостью рынка для обеспечения эффективного внедрения многих инноваций внутри страны. Мы уверены, что многие перспективные проекты потянут за собой также станкостроение, оптику,

электронику, химию и другие отрасли. Дальнейшее инновационное развитие отечественного машиностроительного комплекса заключается в практической реализации научно-технических разработок в частности, более активном внедрении современных методов проектирования и подготовки к производству машиностроительной продукции. Реализация этой задачи возможна только при условии эффективного взаимодействия специалистов науки, образования и промышленности. Именно такая консолидация усилий научно-технического потенциала способна обеспечить интенсивное развитие машиностроения в XXI веке.

---

Vysotski M.S., Kharytonchyk S.V., Shmeliiov A.V.

**Scientific support of computer-aided design and virtual testing of automotive and tractor machinery**

Basic results representing the extension of engineering computer technology for design and virtual testing used in Republic computer centre of mechanical engineering for the development of new vehicles and machinery are presented. Outlined some representative examples of computational research showing their results accuracy. Made a conclusion of the engineering technologies use for the development of multilink truck equipped with the links having steering control and active drive. Future research and development plans of the centre are indicated.

*Поступила в редакцию 20.07.2012.*