

Рябов Денис Михайлович

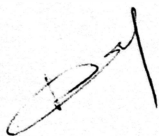
**МЕТОД РАСЧЕТА СИДЕНИЙ ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩИХ
КОНСТРУКЦИЙ БРОНИРОВАННЫХ КОЛЕСНЫХ МАШИН**

Специальность 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва 2012

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: Смирнов Александр Анатольевич

К. Т. Н.

Официальные оппоненты: Бекетов Сергей Анатольевич

Д. Т. Н.,

Севастьянов Виктор Борисович

К. Т. Н.

Ведущая организация: Московский государственный машино-
строительный университет (МАМИ)

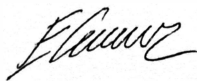
Защита диссертации состоится «17» декабря 2012 г. в 14³⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.141.07 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5., зал Ученого совета.

Ваши отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан « » ноября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2011396

Рябов Д.М. Метод расчета си

Сарач Е.Б.

064

Актуальность темы. Недавние военные конфликты в Ираке, Афганистане и на Северном Кавказе показали, что тактика ведения боевых действий носит партизанский характер и требует быстрой и частой передислокации войск. Это требует интенсивного перемещения военной техники по дорогам.

Во время передислокации военная техника становится наиболее уязвимой для противника. Транспортные колонны подвергаются нападению из засад. Для остановки колонн и поражения экипажа со стороны противника стали активно использоваться мины и самодельные взрывные устройства. В связи с этим сильно возросли потери в войсках.

В связи с постоянной угрозой нападения каждая машина колонны должна иметь определенный уровень защиты, а экипаж возможность самообороны. Одним из важнейших средств защиты войск в такой ситуации явилось использование мобильных машин с защитой от внезапного нападения из засад и подрыва – MRAP (англ. Mine Resistant Ambush Protected – защищенные от подрыва и атак из засад).

Задача такой техники – сохранить жизнь экипажа при подрыве и позволить ему вести оборону. Для сохранения жизни экипажа при подрыве необходимо снизить основной поражающий фактор – высокие ускорения, передающиеся от сиденья и пола. Решение этой задачи достигается различными мерами: применением V-образного днища; использованием открытых колесных арок; капсулированием обитаемого отсека; использованием энергопоглощающих материалов. Однако при мощных зарядах взрывчатого вещества данных мер бывает недостаточно для полной защиты экипажа бронированной колесной машины (БКМ).

Перспективной мерой по снижению высоких ускорений, действующих на экипаж при подрыве, является применение сидений энергопоглощающей конструкции (СЭК). Принцип работы таких сидений заключается в преобразовании энергии взрыва в энергию пластической деформации энергопоглощающего элемента (ЭПЭ), устанавливаемого в конструкции сиденья.

Российская колесная бронетехника впервые стала оснащаться такими сиденьями только в 2011 году. Однако в основном были использованы авиационные сиденья и сиденья зарубежного производства. Одной из причин является отсутствие метода расчета таких сидений.

Таким образом, тема данной научной работы, посвященной разработке метода расчета СЭК, является актуальной.

Целью работы является обеспечение живучести экипажа бронированных колесных машин при подрыве путем применения сидений энергопоглощающих конструкций.

Для достижения цели в работе поставлены и последовательно решены следующие основные задачи:

- проведен подробный анализ и сформирован набор критериев для оценки повреждений, получаемых экипажем бронированных колесных машин;

- проведены исследования различных факторов, влияющих на живучесть членов экипажа при подрыве: размещение и закрепление сидений энергопоглощающей конструкции в корпусе бронированных колесных машин; расположение ног членов экипажа; использование ремней безопасности.

- разработан метод расчета сидений энергопоглощающей конструкции на основе численного моделирования;

- проведена оптимизация параметров нагрузочной характеристики энергопоглощающего элемента;

- проведены экспериментальные исследования с целью оценки адекватности расчетных моделей и применимости метода.

Методы исследований. Исследования проводились с использованием численных методов, реализованных в программе LS-DYNA. Оценка точности математических моделей проводилась в сравнении с натурными испытаниями проволочного энергопоглощающего элемента. Для оценки эффективности рассчитанного в работе сиденья энергопоглощающей конструкции были проведены испытания бронированной колесной машины, оборудованной сиденьем, на подрыв.

Научная новизна результатов выполненных исследований, выносимых на защиту, заключается:

- в формировании набора критериев, которые позволяют произвести оценку степени тяжести повреждений, получаемых экипажем при подрыве, на этапе компьютерного моделирования и учитывают специфику приложения нагрузки при подрыве;

- в разработке математической модели сиденья энергопоглощающей конструкции, которая позволяет произвести расчет и оптимизацию основных параметров сиденья для существующей или находящейся на стадии проектирования бронированной колесной машины и проверить эффективность разрабатываемого сиденья с использованием конечно-элементной модели антропоморфного манекена;

- в разработке метода расчета сидений энергопоглощающей конструкции для вновь разрабатываемых и серийных образцов бронированных колесных машин, особенностью которого является поиск оптимальной характеристики ЭПЭ путем проведения параметрической оптимизации.

Практическая значимость работы состоит в комплексе организационно-методических мероприятий и программном комплексе для расчетов, направленных на выбор оптимальных параметров энергопоглощающего элемента сиденья энергопоглощающей конструкции, и рекомендациях способов установки и закрепления сидений в корпусе бронированных колесных машин.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены в ЗАО Корпорация «Защита», ФКУ НПО «СТиС», НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана и используются в процессе выполнения опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ на кафедре колесных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Достоверность научных положений выводов и рекомендаций обоснована и подтверждена сопоставлением результатов расчета с данными экспериментальных исследований.

Личное участие автора заключается в разработке метода расчета сидений энергопоглощающих конструкций бронированных колесных машин, в создании математической модели сиденья энергопоглощающей конструкции, в формировании набора критериев для оценки повреждений, получаемых экипажем при подрыве, в исследовании различных подходов к повышению безопасности экипажа бронированных колесных машин при подрыве.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались:

- на XV всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности» в 2012 году (г. Санкт-Петербург);
- на научно-технической конференции, посвященной 75-летию кафедры колесных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2012 году (г. Москва);
- на научно-технических семинарах кафедры колесных машин МГТУ им. Н. Э. Баумана в 2010 – 2012 гг. (г. Москва);

По материалам диссертации опубликовано 5 научных работ, из них по перечню ВАК РФ - 3.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих результатов и выводов, списка литературы. Работа изложена на 165 листах машинописного текста, содержит 104 рисунка, 8 таблиц. Библиография работы содержит 95 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования: разработка метода расчета СЭК для БКМ, находящихся на стадии проектирования, и для существующих образцов.

Приведено краткое содержание выполненных исследований, сформулирована цель работы и отражены основные положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе диссертации приведен анализ состояния проблемы повышения живучести экипажа БКМ при подрыве.

На данный момент применение СЭК является одним из перспективных направлений снижения высоких ускорений, действующих на экипаж во время подрыва. Однако широкое применение СЭК сдерживается отсутствием методики их проектирования и расчета.

Выполненный анализ российской колесной техники класса MRAP показывает, что применение СЭК практически началось только в 2011 году. При этом следует отметить, что в большинстве случаев использовались СЭК зарубежного производства. Этот факт является подтверждением актуальности данной работы.

На сегодняшний день работу в этой области ведут ряд компаний, занимающихся разработкой бронетехники, а также научные организации. Однако необходимо отметить, что разработка СЭК ведется на основе проведения многочисленных испытаний без привлечения компьютерного моделирования. Научной литературы, посвященной данной теме в России практически нет.

За рубежом СЭК стали применяться на БКМ типа MRAP в конце 90-х годов 20-го века. За это время было проведено большое количество исследований и создано работ, посвященных данной теме. Анализ работ позволяет сделать вывод, что проектирование СЭК за рубежом ведется с активным использованием компьютерного моделирования. Существует ряд работ, посвященных математическому моделированию СЭК, описанию различных конструкций СЭК и ЭПЭ. Большое количество работ посвящены критериям оценки повреждений, получаемых экипажем при подрыве.

Большинство СЭК имеют схожую структуру. Основные составные части СЭК – каркас сиденья, мягкое кресло, энергопоглощающий элемент, направляющие элементы.

Исполнительной частью СЭК является ЭПЭ. Способность ЭПЭ к поглощению энергии определяется его характеристикой – зависимостью силы от хода (рис. 1).

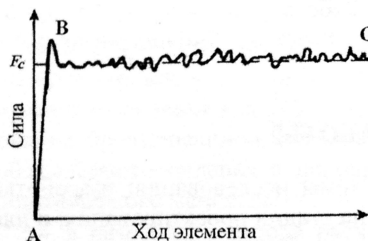


Рис. 1. Характеристика ЭПЭ в общем случае

Во время движения БКМ в штатном режиме (до подрыва) ЭПЭ нагружается по участку AB . Следует отметить, что при проектировании ЭПЭ необходимо, чтобы сила его срабатывания F_c была гарантированно больше силы, возникающей в нем при езде в экстремальных режимах. Если это условие не выполняется, то возникает вероятность срабатывания элемента во время движения БКМ (до подрыва).

Начало действия ЭПЭ характеризуется точкой B .

На участке BC элемент поглощает энергию взрыва. В большинстве существующих на сегодняшний день ЭПЭ энергия взрыва превращается во внутреннюю энергию пластической деформации металла.

Впервые, сиденья, оснащенные ЭПЭ, стали использоваться в авиации для снижения ударных нагрузок, действующих на экипаж и пассажиров вер-

толета в результате аварийной посадки или падения. Работы в этой области ведутся с 70-х годов прошлого века.

Позже принцип действия многих ЭПЭ, применяемых в авиационных креслах, был применен в сиденьях БКМ с целью защиты экипажа от действия высоких ускорений в случае подрыва на mine.

Существующие образцы СЭК можно классифицировать по различным параметрам: тип ЭПЭ, конструкция направляющего устройства (НУ), конструкция и материал кресла, наличие ремней безопасности, наличие подножек.

Основной задачей при проектировании СЭК является нахождение оптимальной характеристики ЭПЭ. Определение оптимальных параметров ЭПЭ и оценка эффективности СЭК может проводиться различными способами: натурные испытания, аналитическое решение, решение численным методом.

Проведение натурных испытаний сопровождается большими финансовыми и временными затратами.

Аналитическое решение – очень сложная задача, так как процесс работы ЭПЭ имеет высокую нелинейность.

В последнее время в связи с ростом быстродействия вычислительной техники, численный метод можно считать одним из наиболее эффективных способов оценки прочности и оптимизации конструкций, подверженных ударно-волновому воздействию (УВВ). Одной из наиболее эффективных систем автоматизированного инженерного анализа является программа LS-DYNA.

Также преимуществом программы LS-DYNA является наличие целого семейства КЭМ манекенов, используемых для оценки повреждений, получаемых экипажем при подрыве.

При создании метода расчета СЭК необходимо решить две задачи: моделирование УВВ на корпус БКМ и моделирование высоконелинейных процессов деформации ЭПЭ.

Для решения первой задачи в LS-DYNA применяется специальная функция CONWER, позволяющая определить и задать давление, действующее на элемент, зная массу заряда в тротиловом эквиваленте (ТЭ), расстояние, а также ориентацию элемента в пространстве.

Для решения второй задачи в работе проводится выбор и обоснование метода численного интегрирования. Так как задача деформации ЭПЭ является высоконелинейной и протекает за короткий промежуток времени для ее решения целесообразно использовать явный метод интегрирования, реализуемый в программе LS-DYNA.

Решение задачи оптимизации характеристики ЭПЭ целесообразно проводить, используя метод условной оптимизации нулевого порядка. Данный метод обладает необходимой для данной задачи точностью и производительностью.

Во второй главе описаны критерии оценки повреждений, получаемых экипажем при подрыве.

Взрывозащищенность БКМ можно рассматривать в двух аспектах: в техническом и медицинском.

Технический аспект рассматривает способность БКМ противостоять подрыву с точки зрения получения конструктивных повреждений, вызывающих нарушение работоспособности БКМ, в частности, потерю подвижности.

Медицинский аспект связан с рассмотрением степени тяжести травм, получаемых экипажем и десантом БКМ при подрыве.

В России в открытом доступе не существует нормативного документа, который описывал бы критерии для оценки повреждений, возникающих в результате подрыва на mine и методику их расчета.

За рубежом для оценки повреждений в результате подрыва на mine в 2007 году был принят документ: RTO-TR-HFM-090 «Test methodology for protection of vehicle occupants against anti-vehicular landmine effects» (в переводе с англ. «Методика испытаний на защищенность членов экипажа транспортных средств от минного подрыва»), который является дополнением к стандарту STANAG 4569.

Согласно документу RTO-TR-HFM-090 производить оценку повреждений головы при подрыве не целесообразно по следующим причинам:

1. При подрыве автомобиля на mine предполагается, что в случае вылета человека из сиденья и удара головой, в первую очередь, допустимый уровень превысят нагрузки, возникшие в шее.

2. В случае, когда поражающим фактором в результате наезда автомобиля на мину будет действие высоких ускорений, предполагается, что допустимый уровень нагрузок будет достигнут в шее или позвоночнике, а не в голове.

Для оценки повреждений шеи, возникающих под действием осевой нагрузки целесообразно использовать критерий Axial Compression Injury Criterion, а для оценки при изгибной нагрузке критерий *Flexion/Extension Injury Criteria*. При этом повреждение шеи сжимающей силой следует оценивать по кривой вероятности повреждений, полученной на основе экспериментальных данных. Для оценки повреждения шеи в результате ее изгиба рекомендуется

использовать пороговые значения момента 190 Н·м и 57 Н·м для кивка головой вперед и назад, соответственно.

Так как подрыв БКМ на mine приводит к ударному воздействию на позвоночник со стороны сиденья, для оценки повреждений необходимо использовать критерий DRI, учитывающий динамику приложения силы. Значение критерия DRI не должно превышать значения 17,7. Критерий DRI основывается на одномассовой модели, описывающей поведение позвоночника человека под действием ударных нагрузок (рис. 2).

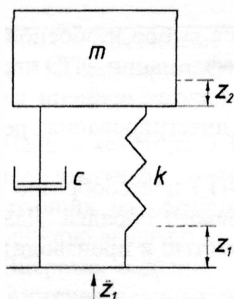


Рис. 2. Модель DRI

Уравнение движения такой системы имеет вид:

$$\ddot{z}_1(t) = \ddot{\delta} + 2\xi\omega_n\dot{\delta} + \omega_n^2\delta,$$

где $\ddot{z}_1(t)$ – ускорение, действующее на позвоночник в вертикальном направлении; δ – относительное перемещение системы $\delta = z_1 - z_2$, если $\delta > 0$ – происходит сжатие; ξ – коэффициент демпфирования, $\xi = \frac{c}{2m\omega_n}$; ω_n – собст-

венная частота колебаний позвоночника, $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$; k – жесткость позвоночника; c – коэффициент вязкого трения позвоночника; m – масса тела человека.

Также при подрыве БКМ уязвимым местом являются нижние конечности. Критерием оценки повреждений в данном случае является осевая сжимающая сила, возникающая в голени. При этом предельно допустимое значение силы должно составлять 5,4 кН, что соответствует вероятности перелома голени около 10%. Повреждения бедра члена экипажа БКМ при подрыве на mine маловероятно.

Повреждение внутренних органов экипажа при воздействии избыточного давления происходит в случае разрушения корпуса БКМ и затекания внутрь ударной волны. Этот случай следует считать крайним, так как необходимым условием при разработке корпуса БКМ является его стойкость к разрушению. Поэтому критерии оценки повреждения внутренних органов действием избыточного давления скорее следует отнести к рекомендуемым, а не обязательным.

Далее в главе приводится описание, используемых в программе LS-DYNA конечно-элементных моделей манекенов и последовательность вычисления с их помощью критериев повреждения шеи, ног и позвоночника.

В третьей главе приведены исследования подходов к повышению живучести экипажа БКМ.

Существенное влияние на безопасность экипажа БКМ во время подрыва оказывает не только выбор ЭПЭ СЭК, но также способ закрепления СЭК в корпусе, оснащение его ремнями безопасности, подставками для ног.

В современных и перспективных конструкциях БКМ производители отказались от крепления сидений к полу и крепят их к крыше либо борту корпуса. Для определения, какой из этих способов наиболее безопасен для экипажа, во время подрыва проведена сравнительная оценка при помощи численного метода в программе LS-DYNA.

Исследование проводилось на основе модели корпуса БКМ СПМ-3 «Медведь» опытного образца.

Для моделирования взрывного воздействия на корпус БКМ была использована встроенная в LS-DYNA функция CONWEP. В проведенных рас-

четах заряд располагался в продольной плоскости бронекорпуса; под днищем, на расстоянии 0,5 м от него; масса заряда составляла 6 кг в ТЭ.

Для оценки степени передачи ударного импульса от сиденья к сидящему на нем десантнику, при моделировании использовалась модель манекена Hybrid III первого поколения. Для оценки повреждений был выбран критерий DRI.

Проведенный расчет показал, что значения показателя DRI при закреплении сиденья к борту равно 14, при закреплении на крыше – 13,5. Таким образом, вероятность получения легких повреждений позвоночником в обоих случаях составляет менее 10% , это говорит о том, что оба способа закрепления идентичны с точки зрения безопасности экипажа БКМ.

Оценка влияния ремней безопасности на живучесть экипажа проводилась при помощи доработанных моделей, описанных выше.

Для моделирования поясного ремня безопасности использовался двух-узловой конечный элемент *ELEMENT_SEATBELT. Ремень не имеет преднатяжения и расположен таким образом, что между ним и телом человека имеется зазор величиной около 10 мм. Такое расположение соответствует ситуации, часто встречающейся в действительности, а также учитывает толщину одежды на человеке.

Влияние ремня безопасности на нагруженность манекена оценивалось по ускорениям, возникающим в голове манекена.

Анализ графиков ускорений, возникающих в голове манекена, позволил сделать следующий вывод: применение поясного ремня безопасности, без предварительного натяжения и расположенного с зазором относительно тела манекена приводит к увеличению перегрузок, но может предотвратить удар манекена головой об элементы бронекорпуса. Таким образом, применение ремня безопасности является обязательным.

Для определения эффективности применения подножек для защиты ног экипажа была проведена сравнительная оценка двух вариантов: первый – член экипажа сидит на сидении и стопы ног полностью опираются на пол, второй – член экипажа сидит на сидении и стопы ног опираются на подставку. В обоих расчетных случаях ступни манекена находятся на одном уровне от днища БКМ.

Конечно-элементная модель представляла собой проработанную модель БКМ СПМ-3 «Медведь» опытного образца. При расчете использовались те же граничные условия, которые описаны выше.

Для оценки степени передачи ударного импульса от пола или подставки к ступням сидящего десантника при моделировании использовалась модель манекена Hybrid III второго поколения.

В качестве критерия оценки была выбрана осевая сжимающая сила, возникающая в голени манекена. Контрольной точкой измерения силы является коленный сустав или, применительно к испытательным антропометрическим манекенам, шарнир.

Проведенные расчеты показывают, что применение подставок для ног является эффективным способом снижения ударной нагрузки на ноги членов экипажа при подрыве БКМ. В случае расположения ног на подставке вероятность перелома голени составила 0,2%, аналогичное значение для случая расположения ног на полу – 20,8%.

В четвертой главе сформулирован метод расчета сидений энергопоглощающей конструкции.

Разработанный метод базируется на компьютерном имитационном моделировании процессов УВВ на корпус БКМ и деформации ЭПЭ с последующей оценкой критериев повреждения при помощи КЭМ манекенов. Оценка проводится по критериям, изложенным выше. Сформулированный в данной главе метод позволяет произвести синтез и анализ СЭК для конкретного существующего образца БКМ или для находящегося на стадии проектирования.

К особенностям метода следует отнести использование двух расчетных моделей. Первая - модель корпуса БКМ, рассчитывается с целью определения нагрузочного режима, действующего на сиденье, в случае отсутствия экспериментальных данных. Вторая - модель СЭК, к местам крепления которого приложена зависимость ускорения от времени, найденная в результате решения первой модели или проведения натурных испытаний.

Одним из основных шагов метода является поиск оптимальной характеристики ЭПЭ СЭК. Найденная оптимальная характеристика дает возможность производить подбор элементов различной конструкции из ряда существующих.

При разработке метода приняты следующие допущения:

- при определении нагрузочного режима, действующего на сиденье, моделируется только корпус БКМ без сиденья;
- взрывное воздействие на элементы корпуса прикладывается при помощи функции *Conver*, которая имеет следующие ограничения; функция не учитывает эффекты «затенения» ударной волны объектами, лежащими на пути ее распространения, и локальные эффекты ее отражения от элементов конструкции, однако этот подход вполне приемлем при определении ускорения, возникающего на корпусе БКМ;
- при проведении параметрической оптимизации ЭПЭ в качестве критерия оценки повреждений члена экипажа используется ускорение в нижней части его туловища, а не один из рекомендованных критериев. Однако при проведении результирующего проверочного расчета используется набор рекомендуемых критериев.

На рисунке 3 представлена блок-схема алгоритма разработанного метода.

Реализация метода расчета СЭК проведена для БКМ на базе автомобиля Урал-4320, спроектированной ЗАО Корпорация «Защита», с подробными рекомендациями и описанием особенностей создания расчетных моделей.

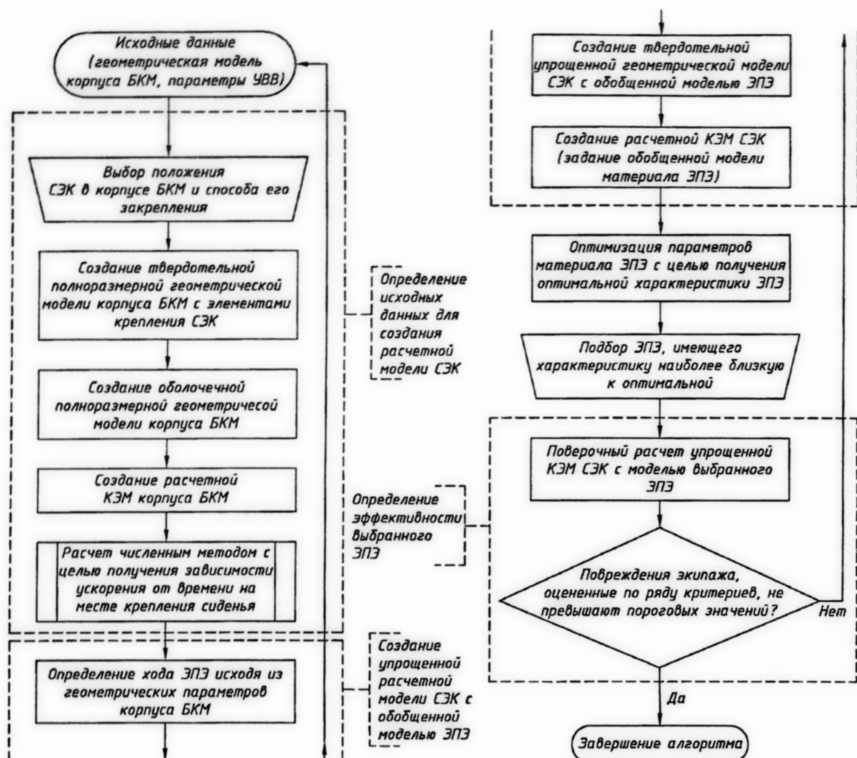


Рис. 3. Метод расчета СЭК

В качестве исходных данных использовалась зависимость ускорения от времени на местах крепления сидений в корпусе БКМ, полученная в результате проведения натурных испытаний, и максимально допустимый внутренней геометрией корпуса ход сиденья, равный 100 мм.

Созданная согласно разработанному методу упрощенная расчетная модель СЭК представлена на рисунке 4.

На следующем этапе, на основе созданной упрощенной модели, проводилась оптимизация характеристики ЭПЗ методом условной оптимизации нулевого порядка. Управляемым параметром при оптимизации являлась сила срабатывания элемента – F_c , на которую вводится следующее ограничение: $F_c > F_{c_min}$ – ЭПЗ не должен срабатывать при эксплуатации БКМ в штатном режиме. Целевая функция $\max_{t \in [0, T]}(a(t))$ – максимальное ускорение в нижней

части туловища манекена на расчетном отрезке времени. Математическая формулировка задачи:

$$\min_{F_c \in D} [\max_{t \in [0, T]}(a(t))],$$

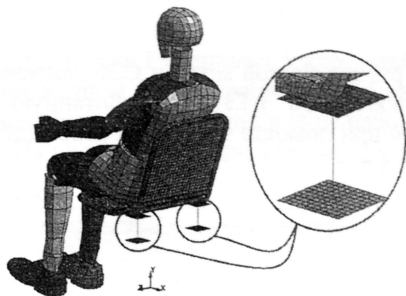


Рис. 4. Конечно-элементная модель СЭК

элемента 7400 Н. Ход элемента при этом составляет 94 мм.

На следующем этапе проводился подбор ЭПЭ, имеющего силу срабатывания наиболее близкую к найденной в результате оптимизации. Был выбран тип элемента, работа которого основана на пластической деформации стальной проволоки.

Проволока 4 (рис. 5) ЭПЭ в верхней части крепится к кронштейнам бронекорпуса 1, а корпус 5 ЭПЭ к каркасу сиденья 2. Таким образом, сиденье оказывается закреплено в бронекорпусе через ЭПЭ. Во время подрыва бронекорпус движется вверх, а сиденье смещается вниз по направляющим 3. При этом проволока протягивается вокруг валков 6 корпуса ЭПЭ, пластически деформируясь за счет изменения ее кривизны, и происходит поглощение энергии. Для подбора параметров ЭПЭ (диаметр проволоки, геометрические параметры корпуса ЭПЭ) была создана его расчетная модель.

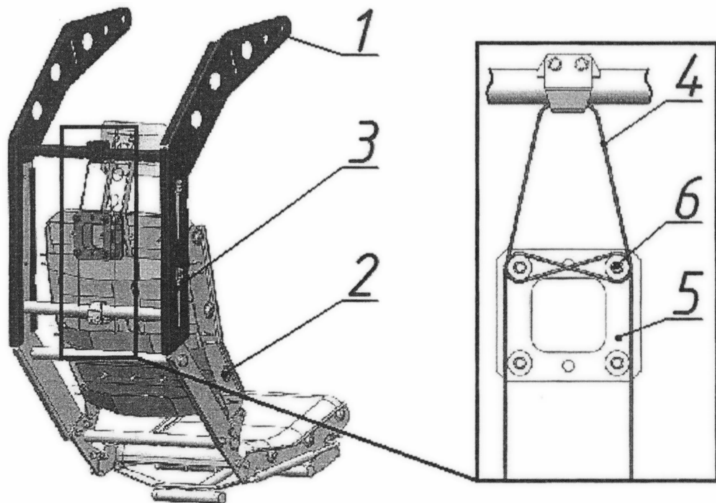


Рис. 5. Геометрическая модель СЭК и ЭПЭ

где область D – область допустимых значений параметра оптимизации F_c , задана неравенством $F_c > F_{c_min}$.

В ходе оптимизации получена зависимость ускорения в нижней части туловища манекена от силы срабатывания ЭПЭ. Минимальное ускорение соответствует силе срабатывания

На следующем этапе проводился расчет точной модели СЭК, включающей в себя модель выбранного проволоочного ЭПЭ и проработанную модель манекена, по результатам которого при помощи критериев повреждения оценивалась эффективность СЭК (табл. 1).

Таблица 1

Критерий повреждения	Предельный уровень	Значение критерия, полученное в ходе расчета
Индекс реакции позвоночника (DRI)	17,7	14,335
Сжимающая сила в шее	4 кН (0 мс) 1,1 кН (30 мс)	1,38 кН (13 мс)
Пиковое значение сгибающего момента в шее	190 Н·м	6,3 Н·м

Таким образом, использование разработанного СЭК на БКМ, для которого оно рассчитывалось можно считать эффективным для обеспечения живучести экипажа при заданном ходе.

В пятой главе проводится оценка адекватности и точности расчетных моделей и применимости метода.

Натурные испытания состояли из двух этапов. Первый этап натурных испытаний проводился в лаборатории кафедры колесных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана. В качестве объекта исследования выступал описанный выше проволоочный ЭПЭ.

В ходе проведения испытаний ЭПЭ испытывался под действием квазистатической нагрузки и проводилось сравнение с результатами, полученными ранее в результате расчета математической модели.

Схема экспериментальной установки и ее внешний вид представлены на рисунках 6, 7.

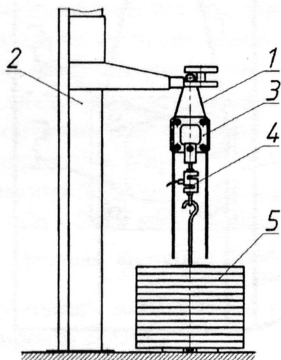


Рис. 6. Схема экспериментальной установки

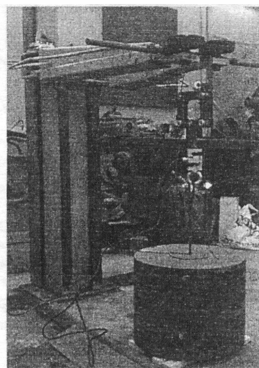


Рис. 7. Внешний вид экспериментальной установки

Проволока 1 крепилась к кронштейнам подъемника 2. На корпусе ЭПЭ 3 одним концом был закреплен S-образный тензодатчик 4. Ко второму концу тензодатчика крепился груз в виде набора металлических дисков 5.

На рисунквах 8, 9 представлен внешний вид ЭПЭ и схема намотки проволоки.

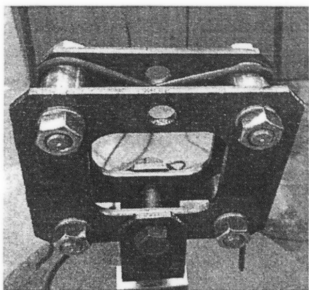


Рис. 8. Внешний вид ЭПЭ

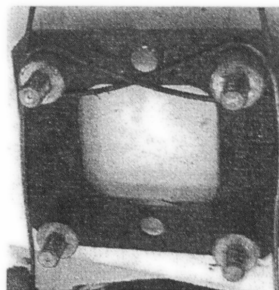


Рис. 9. Схема намотки проволоки

При включении подъемника его кронштейны начинают двигаться вверх со скоростью 0,03 м/с, в результате чего проволока протягивается через валки корпуса.

Тензодатчик измерял силу протяжки проволоки, которая регистрировалась при помощи подключенного к нему измерительного комплекса, включающего в себя предварительный усилитель, аналого-цифровой преобразователь и портативную ЭВМ.

На рисунках 10, 11 представлены графики зависимости силы протяжки проволоки от хода, полученные при проведении экспериментальных исследований и расчете математической модели (глава 4).

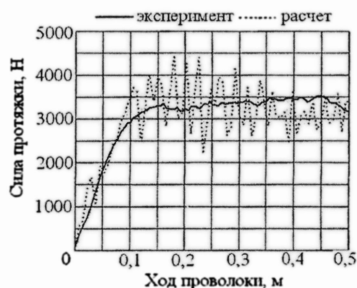


Рис. 10. Графики зависимости силы протяжки проволоки диаметром 4 мм от хода

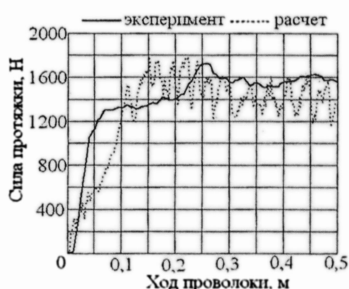


Рис. 11. Графики зависимости силы протяжки проволоки диаметром 3 мм от хода

Второй этап экспериментальных исследований проводился на полигоне 38 НИИ МО РФ в г. Кубинка в июле 2012 г. Был проведен подрыв бронекор-

пуска производства ЗАО Корпорация «Защита», установленного на шасси автомобиля Урал-4320 (рис. 12).

Одно из сидений установленных в бронекорпусе было оснащено изготовленным на первом этапе экспериментальных исследований ЭПЭ (рис. 13).

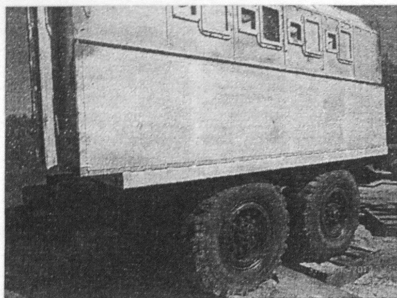


Рис. 12. Бронекорпус, используемый для натурных испытаний

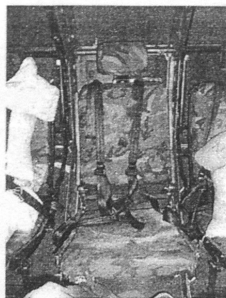


Рис. 13. СЭК с проволочным ЭПЭ

Измеряемыми параметрами при проведении эксперимента являлись ускорения, возникающие на месте крепления сиденья и подушке сиденья.

При подрыве использовалось безоболочечное ВВ массой 6 кг в ТЭ. Заряд имел форму параллелепипеда и был размещен под геометрическим центром днища в специальном приспособлении, имитирующем закладку ВВ в скальный грунт, а также засыпан и утрамбован слоем маскирующего песка.

Графики ускорений, замеренных в районе места крепления сиденья и на подушке сиденья, представлены на рисунках 14 и 15.

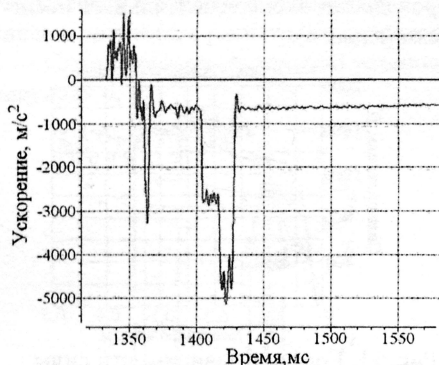


Рис. 14. Ускорение, замеренное в районе места крепления сиденья

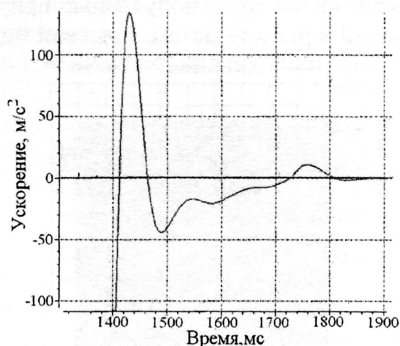


Рис. 15. Ускорение, замеренное на подушке сиденья

Максимальное значение ускорения на подушке сиденья составило $133,7 \text{ м/с}^2$.

Для определения степени тяжести повреждений, получаемых экипажем при подрыве, использовался критерий DRI. Значение критерия составило 9,76, что ниже предельно-допустимого значения, равного 17,7.

Проведенные экспериментальные исследования действия ЭПЭ позволяют сделать вывод об адекватности расчетных моделей. Натурные испытания на подрыв доказали эффективность рассчитанного и изготовленного ЭПЭ, что в свою очередь доказывает эффективность и работоспособность представленного в работе метода.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Рассмотрены механизмы получения повреждений различных частей тела человека при подрыве и критерии оценки этих повреждений. Установлено, что оценку повреждений, получаемых экипажем при подрыве, целесообразно производить при помощи индекса динамической реакции позвоночника, по силе и сгибающим моментам, возникающим в шее, и по силе, возникающей в голени.

2. С использованием численных методов проведена оценка подходов к повышению живучести экипажа БКМ. Рассмотрены вопросы размещения и закрепления сидений в корпусе БКМ, размещения нижних конечностей и использования ремней безопасности. На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы: существенных различий с точки зрения воздействия на экипаж в способах закрепления сидений к борту и крыше корпуса нет; расположение нижних конечностей оказывает существенное влияние на их нагруженность, применение подставок для ног позволяет снизить вероятность получения перелома голени на 20%; применение ремней безопасности является обязательным, так как предотвращает вылет членов экипажа из сидений и получение серьезных повреждений в результате удара об элементы бронекорпуса.

3. Разработан метод расчета сидений энергопоглощающих конструкций на основе численного моделирования процессов подрыва и работы энергопоглощающего элемента. Суть метода состоит в поиске оптимальной характеристики энергопоглощающего элемента путем проведения параметрической оптимизации. Основой метода является расчетная модель, которая состоит из энергопоглощающего элемента, манекена и сиденья. Исходные данные для проведения расчета – зависимость ускорения от времени на месте крепления сиденья, могут быть получены как в ходе проведения экспериментальных исследований, так и в результате решения численной модели подрыва БКМ.

4. Разработана математическая модель сиденья энергопоглощающей конструкции. Особенностью модели является представление энергопоглощающего элемента при помощи дискретного элемента, с характеристикой, определяемой силой срабатывания. Использование конечно-элементной мо-

дели манекена дает возможность оценки эффективности рассчитанного энергопоглощающего элемента на стадии проектирования.

5. Впервые сформулирована и решена задача оптимизации характеристики энергопоглощающего элемента. В качестве параметра оптимизации следует принимать силу срабатывания элемента. Целевая функция – максимальное ускорение, возникающее в нижней части туловища манекена (входной параметр для вычисления динамического индекса реакции позвоночника), которое необходимо минимизировать. В ходе проведения оптимизации установлено, что целевая функция имеет явный минимум, характеризующийся определенным значением силы срабатывания энергопоглощающего элемента.

6. Сравнением результатов расчетов и экспериментальных данных установлено, что относительная погрешность математических моделей разработанного проволочного энергопоглощающего элемента не превышает 15%.

7. Экспериментальные исследования по подрыву 6 кг взрывчатого вещества в тротиловом эквиваленте под днищем БКМ показали, что рассчитанное согласно разработанному методу сиденье энергопоглощающей конструкции обеспечивает живучесть экипажа БКМ. Используемый критерий повреждений – индекс динамической реакции позвоночника, равен 9,76 и не превышает допустимого значения.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Бутарович Д.О., Смирнов А.А., Рябов Д.М. Повышение противоминной защищенности бронированной колесной техники при помощи защитных экранов из пористых энергопоглощающих металлов // Вопросы оборонной техники. 2011. Выпуск 1 – 2. С. 52-57.

2. Рябов Д.М., Смирнов А.А., Бутарович Д.О. Оценка влияния способов закрепления сидений на живучесть экипажа при подрыве бронеавтомобиля // Известия вузов. Машиностроение. 2011. №5. С. 27-33.

3. Бутарович Д.О., Смирнов А.А., Рябов Д.М. Пеноалюминий как энергопоглощающий материал и его механические свойства // Известия вузов. Машиностроение. 2011. №7. С. 53-58.

4. Рябов Д.М., Смирнов А.А., Бутарович Д.О. Оценка влияния размещения нижних конечностей экипажа бронеавтомобиля на травмобезопасность при подрыве // Известия вузов. Машиностроение. 2012. №3. С. 43-47.

5. Рябов Д.М., Смирнов А.А., Бутарович Д.О. Методы снижения поражающего воздействия на экипаж бронеавтомобиля при подрыве // Материалы VII международной научно-практической конференции «Становление современной науки - 2011». Прага: «Образование и наука». 2011. С. 57-65.