

На правах рукописи

Бутарович Дмитрий Олегович

**МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТОЙКОСТИ
К УДАРНО-ВОЛНОВОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ НЕСУЩИХ
СИСТЕМ БРОНИРОВАННЫХ КОЛЕСНЫХ МАШИН С
ПРИМЕНЕНИЕМ В КОНСТРУКЦИИ ПОРИСТЫХ
ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва 2011

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

Котиев Г.О.

Официальные оппоненты: доктор технических наук

Бекетов С.А.,

кандидат технических наук

Мирошниченко А.В.

Ведущая организация:

ОАО «НИИ Стали»

Защита диссертации состоится «17» октября 2011 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.

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 «13» сентября 2011 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор



Сарач Е.Б.

22.10

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Начиная с 70-х гг. 20-го века, форма и тактика военных столкновений сильно поменялись. Форма военных столкновений от прямого боевого контакта смещается все больше в сторону применения методов партизанской деятельности. Для уничтожения колесной техники противник применяет тактику закладывания мин и фугасов на предполагаемых маршрутах её передвижения.

В настоящее время в мире появился новый класс бронированных спецавтомобилей – MRAP (сокр. от «mine resistant ambush protected», что в переводе с англ. «защищенный от мин и нападения из засады»).

Бронеавтомобили типа MRAP – это колесные транспортные средства, построенные в основном на узлах и агрегатах серийных военных автомобилей, имеющие высокую противоминную стойкость (ПРМС). Корпуса этих бронемашин спроектированы специально для противостояния подрывам на минах и самодельных взрывных устройствах.

Увеличение потребности войск в колесной технике типа MRAP выявило проблему отсутствия методов проектирования данных спецавтомобилей и методов оценки влияния различных организационно-методических мероприятий, реализованных в конструкции спецавтомобилей и направленных на повышение ПРМС образцов бронированной колесной техники (БKM).

По настоящее время оценка ПРМС конструкций БKM осуществляется в процессе натурных испытаний. Как правило, эти испытания проводят на заключительных этапах разработки после проведения эксплуатационных и ресурсных испытаний. Выявленные в ходе проведения натурных испытаний на подрыв разного рода недостатки по определенным причинам не могут быть устранены в полной мере, что в итоге снижает уровень взрывозащищенности спецавтомобиля.

Таким образом, тема данной научной работы, посвященной разработке метода прогнозирования несущих систем (НС) бронекорпусов колесных машин к ударно-волновому воздействию (УВВ) от взрывных устройств, является актуальной.

Целью работы является обеспечение живучести экипажа БKM при подрыве путем применения в конструкциях НС БKM пористых энергопоглощающих материалов (ПЭМ).

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

- определены и обоснованы основные критерии оценки ПРМС НС БKM;
- разработан способ компьютерного имитационного моделирования УВВ на НС БKM;
- разработана компьютерная и математическая модели ПЭМ, позволяющие, используя численные методы, прогнозировать его физико-механические свойства;

- разработан метод прогнозирования ПРМС БКМ с применением в конструкции НС ПЭМ;

- выполнено сравнение результатов расчетного и натурного исследования взрывозащищенности БКМ с целью оценки применимости и точности разработанного метода прогнозирования ПРМС.

Методы исследований. Исследования проводились с использованием численных методов, реализованных в программах Ansys и LS-Dyna. Экспериментальные исследования ПЭМ основывались на статических испытаниях образцов пеноалюминия опытной партии. Для экспериментальной оценки ПРМС были использованы утвержденные методики проведения испытаний образцов БКМ на подрыв.

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

- в определении критериев ПРМС НС БКМ, особенность использования которых заключается в одновременном учете прочности НС БКМ и возникающих вертикальных ускорений на частях тела членов экипажа;

- в разработке расчетной математической модели ПЭМ, отличающейся применением оригинальной геометрической модели ПЭМ, что по предлагаемому в работе алгоритму позволит на этапе проектирования при отсутствии данных о свойствах ПЭМ спрогнозировать механические свойства материала и применять их в дальнейших расчетах при оценке ПРМС образцов БКМ;

- в разработке метода прогнозирования ПРМС НС вновь разрабатываемых и серийных образцов БКМ, особенностью которого является оценка влияния применения ПЭМ в конструкции НС БКМ на повышение взрывозащищенности.

Практическая значимость работы состоит в комплексе организационно-методических мероприятий, направленных на выбор рациональных параметров конструкции НС БКМ при УВВ.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены в ОАО «НИИ Стали» и используются в процессе выполнения соответствующих опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ на кафедре колесных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана.

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

- на международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2006 г.

- на научно-практической конференции, посвященной теоретическим и лабораторно-полевым исследованиям и внедрению опытно-конструкторских разработок в учебный процесс и эксплуатацию специальной техники с легким бронированием в 2007 г. (РВВДКУ им. генерала В.Ф. Маргелова, г. Рязань);

- на научно-технических семинарах кафедры СМ-10 – «Колесные машины» МГТУ им. Н. Э. Баумана в 2008 – 2010 гг. (г. Москва);

-на 65-ой международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров: "Приоритеты развития отечественного авто-тракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров" в 2009 г. (МГТУ «МАМИ» г. Москва);

По материалам диссертации опубликовано 8 научных работ, из них по перечню ВАК – 3.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих результатов и выводов, списка литературы. Работа изложена на 209 листах машинописного текста, содержит 142 рисунка, 13 таблиц. Библиография работы содержит 86 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования: разработки расчетных методов прогнозирования противоминной стойкости НС образцов БКМ на различных этапах проектирования, а также при модернизации серийных БКМ с целью выпуска взрывозащищенных версий.

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

В первой главе диссертации приведен анализ состояния проблемы обеспечения и оценки взрывозащищенности БКМ.

Отмечено, что на территории Российской Федерации из открытых документов на данный момент действует лишь ГОСТ Р 50963-96 «Защита броневая специальных машин». Данный стандарт не предусматривает градацию уровней защиты взрывного воздействия на бронеавтомобили.

В связи с большим количеством подрывов БКМ коалиционных сил во время военных операций на территориях Афганистана, Балканского полуострова, Ирака и Ближнего Востока в НАТО разработаны и приняты новые нормативы защиты БКМ.

Одним из документов является STANAG 4569 «Protection Levels for Occupants of Logistic and Light Armoured Vehicles» («Уровни защиты для членов экипажа транспортных и легкобронированных машин»), принятый в 2004 году, предусматривающий разделение БКМ по уровню их взрывозащищенности от фугасных взрывных устройств и артиллерийских снарядов.

В 2007 году НАТО принимает следующий документ: RTO-TR-HFM-090 «Test methodology for protection of vehicle occupants against anti-vehicular landmine effects» («Методика испытаний на защищенность членов экипажа транспортных средств от минного подрыва»), который является дополнением STANAG 4569, и содержит оценочные критерии поражающих факторов экипажа БКМ и методику их вычисления.

Проведенный анализ работ, опубликованных в открытой зарубежной печати, а также их количество, свидетельствует о том, что за рубежом вопро-

сам защиты от воздействия минно-взрывных устройств уделяется большое внимание.

Несмотря на это, в работе отмечено, что работы по повышению ПРМС БКМ в различных направлениях ведутся следующими организациями: ОАО «НИИ Стали», ОАО «Автомобильный завод «УРАЛ», ОАО «КАМАЗ», МГТУ им. Н. Э. Баумана, НТЦ «Спецтехника» при МГТУ «МАМИ», ООО «Военно-промышленная компания», ООО «Институт спецтехники», ФКУ НПО «СТиС» и др. В основном эти работы имеют практический характер и заключаются в изготовлении какого-либо конструктивного элемента, направленного на повышение взрывозащищенности БКМ, с последующим интегрированием его в конструкцию БКМ и натурным испытанием при подрыве.

В связи с различным пониманием определения ПРМС БКМ в работе для дальнейших исследований установлено понятие ПРМС как одно из защитных свойств БКМ, определяющее одновременное обеспечение целостности конструкции БКМ и сохранение в живых членов экипажа с возможным приобретением ими различного рода травм совместимых с жизнью при подрыве БКМ.

Проведенный анализ средств поражения (минного оружия) и их характеристик позволил сделать вывод о том, что целесообразно ограничить высший уровень ПРМС БКМ воздействием фугасного безосколочного взрывного устройства с массой взрывчатого вещества (ВВ) 10 кг в тротиловом эквиваленте.

В виду того, что к БКМ предъявляют требования живучести критерии оценки воздействия предложено рассматривать в двух аспектах: в техническом и медицинском.

Технический аспект определяет способность БКМ противостоять подрыву с точки зрения получения конструктивных повреждений, вызывающих нарушение прочности НС БКМ.

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

Далее в главе приведены основные поражающие факторы, вызывающие поражение экипажа БКМ при подрыве.

Таким образом, установлено, что для комплексной оценки ПРМС БКМ необходимо наличие оценочных критериев, характеризующих степени повреждений членов экипажа.

Также в первой главе проведен анализ организационно-методических и конструктивных способов повышения ПРМС БКМ.

Отмечается, что основными направлениями технических решений, позволяющих обеспечить защиту образцов БКМ от минного оружия, являются:

- оптимизация компоновочных и конструктивных схем;
- применение различных видов бронирования;
- использование современных, в том числе, ПЭМ защиты;
- использование антитравматических сидений.



Рис. 1. Схематичная кривая, иллюстрирующая энергопоглощающие свойства ПЭМ

Исходящие свойства ПЭМ характеризуются площадью под кривой сжатия в координатах «напряжение – деформация» (затемненная область на рис.1).

Также в первой главе представлен анализ методов оценки ПРМС БКМ. Отмечается, что по настоящее время на всех этапах оценки ПРМС БКМ в основном применяется метод натурных испытаний. Проанализированы различные подходы при натурных испытаниях: использование лабораторных животных и антропометрических испытательных манекенов.

Наряду с методом натурных испытаний оценка ПРМС БКМ может выполняться расчетными методами с использованием компьютерного имитационного моделирования, особенности которого также рассмотрены в первой главе.

Отмечено, что в настоящее время имеется большое количество программ, позволяющих моделировать быстропротекающие процессы. Одной из них, часто используемой для решения высоко нелинейных динамических задач, является программный комплекс LS-Dyna. Проанализированы возможности и особенности данной программы, принятое обоснованное решение об её использовании как основы для разработанного метода прогнозирования стойкости НС БКМ к УВВ. Отдельно уделено внимание и приведен анализ функциональных возможностей и особенностей конечно-элементных моделей испытательных манекенов типа GEBOD и HIBRID, интегрированных в LS-Dyna.

В конце главы сделаны основные выводы по проблеме обеспечения взрывозащищенности БКМ и вынесены основные задачи исследования, решение которых необходимо для достижения цели работы.

Во второй главе представлены способ моделирования УВВ на БКМ, установлены и обоснованы критерии оценки повреждений экипажа для разработанного метода оценки ПРМС БКМ при УВВ.

В физике взрыва динамическим называется нагружение, которому свойственно малое время возрастания нагрузки до максимального значения ($t_{max} <$

Выполнен сравнительный анализ технического уровня взрывозащищенности серийных образцов отечественных и зарубежных БКМ.

Так как отдельным направлением в противоминной защите является применение в НС БКМ ПЭМ, то в работе выполнен обзор методов производства ПЭМ и их основных физико-механических свойств.

Отмечается, что особое место в ряду таких материалов по определенным причинам занимает пеноалюминий. Установлено, что энергопогло-

L/C), где L — характерный размер элемента конструкции, а C — скорость звука в твердом теле. Сильное динамическое нагружение в виде взрыва принято называть ударно-волновым нагружением.

Проанализированы основные положения теории ударных волн с последующим представлением основных параметров воздушных ударных волн (ВУВ): избыточного давления, длительности фазы сжатия ударной волны и удельного импульса. За основу были взяты формулы Садовского для определения пикового давления в зависимости от массы заряда ВВ и расстояния.

Многочисленные алгебраические вычисления значений параметров ВУВ в различных отдельных точках исследуемых областей конструкции НС БКМ не позволяет прогнозировать общую ПРМС БКМ. Решить такую задачу представляется возможным только при использовании МКЭ и современных вычислительных программ.

В LS-Dyna для моделирования УВВ на конструкции в лагранжевой постановке используется специальная функция CONWEP. Моделирование УВВ с применением CONWEP состоит в задании многопараметрической функции давления среды в зависимости от времени, расстояния, массы заряда взрывчатого вещества. В итоге конструкции сообщается импульс ВУВ. При этом максимальное давление, действующее на конечный элемент, рассчитывается по эмпирическим зависимостям, полученным на основе обширного экспериментального материала.

Функция CONWEP представляет собой реализацию эмпирической формулы Кингери-Балмэша (Kingery and Bulmash) для ВУВ:

$$\Delta P = \exp(A + B \ln Z + C (\ln Z)^2 + D (\ln Z)^3 + E (\ln Z)^4), \text{ кПа} \quad (1)$$

где A, B, C, D, E — это эмпирические коэффициенты, зависящие от формы заряда ВВ (сфера, полусфера), от расстояния до объекта, от типа взрыва и типа ВВ; Z — переменная Садовского-Гопкинсона, равная $R/W^{1/3}$, R — расстояние от источника взрыва до точки измерения в м, а W — масса заряда в тротиловом эквиваленте в кг.

При анализе программного кода функции CONWEP, написанного на языке программирования FORTRAN и представленного в зарубежной литературе, было установлено, что в основе CONWEP лежит закон изменения давления от времени, представленный в следующем виде:

$$p(t) = p_{so} \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) \exp\left(-\frac{at}{t_0}\right), \quad (2)$$

где p_{so} — амплитуда давления падающей ВУВ, t — текущее время расчета в LS-Dyna, t_0 — длительность фазы сжатия, a — коэффициент спада давления ВУВ в зависимости от времени.

Далее было установлено, что закон изменения давления по формуле (2), являющийся основой расчетного алгоритма функции CONWEP, абсолютно одинаков с законом затухания ВУВ, описанным в российской теории ударных волн.

Этот факт позволил сделать вывод о том, что интегрированная в LS-Dyna функция CONWER, моделирующая УВВ, является численной реализацией известных зависимостей, описывающих взрыв в воздухе.

Для подтверждения применимости функции CONWER для численного моделирования УВВ было проведено теоретическое сравнение аппроксимаций формул Садовского и Кингери-Балмэша (1):

$$\Delta p = 0,084 \cdot \frac{\sqrt[3]{m}}{r} + 0,27 \cdot \frac{\sqrt[3]{m^2}}{r^2} + 0,7 \cdot \frac{m}{r^3}, \text{ МПа.} \quad (3)$$

На рисунке 2 представлены сравнительные результаты давления на пике ВУВ в зависимости от расстояния. Значения эмпирических коэффициентов, входящих в формулу Кингери-Балмэша были взяты из иностранных источников.

Как видно из графиков, расхождение в результатах вычислений по формулам (2) и (3) составляет не более 15%. Был сделан вывод, что такое расхождение можно считать достаточно приемлемым для дальнейшего использования функции CONWER для моделирования УВВ в дальнейшем в разработанном методе прогнозирования ПРМС БКМ.

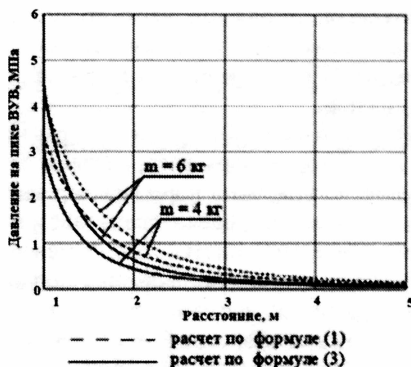


Рис. 2. Зависимость давления на пике ВУВ от расстояния, полученная по формулам Кингери-Балмэша (1) и Садовского (3); m — масса заряда взрывчатого вещества, кг

Далее в главе сформулировано понятие биомеханического критерия оценки ПРМС, который количественно соотносится с тяжестью повреждения части тела человека находящейся в рассмотрении.

На основе анализа иностранных критериев оценки поражения человека и его отдельных органов сделан вывод, что большинство из них зависят от возникаемых при УВВ на БКМ вертикальных ускорений. Приведен анализ рекомендаций российских авторов по оценке переносимости ударных перегрузок, в которых предлагается использовать такой параметр, как доза ударной перегрузки ΔV , величина которой зависит от скорости нарастания перегрузки dn/dt .

В конце главы, на основании анализа и приведенных обоснований, сделан вывод, что для дальнейшей оценки ПРМС БКМ с помощью разработанного в работе метода прогнозирования, в медицинском аспекте предлагается в качестве критерия оценки использовать значения пиковых (максимальных по амплитуде) ускорений, причем действие пика не должно превышать

0,015 с. В качестве критерия оценки прочности конструкции установлены допустимые эквивалентные напряжения, возникающие в конструкции НС БКМ.

В третьей главе представлена разработанная расчетная математическая модель (РММ) ПЭМ. Для РММ ПЭМ были разработаны компьютерные геометрические модели (ГМ) ПЭМ на основе различных алгоритмов изменения диаметра пор, размещаемых в объеме материала. При разработке РММ ПЭМ за основу исходного материала брался алюминий.

Для получения ГМ образца ПЭМ со случайной структурой была разработана программа-макрос для системы трехмерного моделирования «SolidWorks». Входными параметрами для программы являются: размеры образца, плотность материала стенок пор, желаемая плотность образца (плотность ПЭМ), средний диаметр пор, среднеквадратическое отклонение диаметра пор.

Результатом работы этой программы является ГМ пористого образца (рис. 3), в котором поры распределены случайно по объему и имеют диаметры, распределенные по нормальному закону с заданными параметрами. Установлено, что с помощью такого алгоритма возможно смоделировать образец с относительной плотностью не менее 0,54 (пористостью более 0,46).

В целях повышения значения пористости в данную программу-макрос был интегрирован другой алгоритм размещения пор в объеме и изменения их диаметров, так называемый, генетический алгоритм. Интеграция состояла в использовании встроенного в MATLAB 7.0 программного модуля оптимизации на основе генетического алгоритма. Результатом его работы был файл с необходимыми для программы-макроса данными.

Использование программного модуля с генетическим алгоритмом позволило достичь значения пористости 0,69.

Далее в главе представлен расчетный метод определения механических свойств виртуальных образцов ПЭМ, основанный на компьютерном моделировании процесса квазистатического нагружения ГМ ПЭМ в программах, основанных на МКЭ и имеющих возможность проводить прочностной анализ. Результатом применения данного метода является полученная диаграмма нагружения в координатах «напряжение – деформация» (рис. 4).

На основании расчетного метода определения механических свойств виртуальных образцов ПЭМ предложены два метода получения РММ ПЭМ.

Первый метод состоит в прямом экспортировании геометрической модели в расчетную программу, в данном случае в LS-Dyna, с последующим заданием в программе-препроцессоре физико-механических свойств, полученных по разработанному расчетному методу. Другим вариантом создания

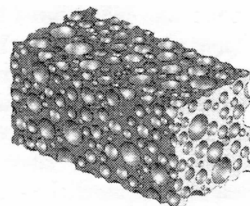


Рис. 3. ГМ ПЭМ, полученная с помощью программы-макроса

РММ виртуального ПЭМ, является использование уже разработанной модели ПЭМ в LS-Dyna с последующим вводом имеющихся физико-механических свойств, полученных также при использовании расчетного метода.

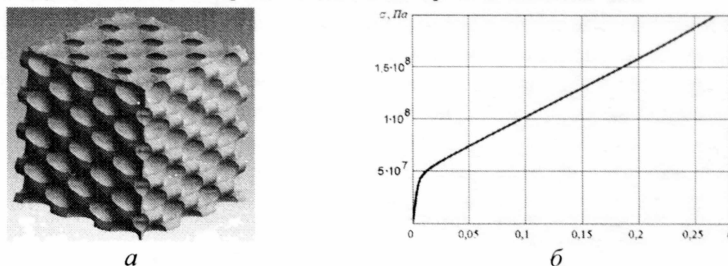


Рис. 4. Сжатый образец ПЭМ с регулярным распределением пор:
 а – изображение сжатой ГМ в Ansys; б – полученная при сжатии нагрузочная диаграмма образца ПЭМ в координатах «напряжение – деформация»

В работе обосновано использование модели материала «MAT_MODIFIED_CRUSHABLE_FOAM_163» из библиотеки материалов LS-Dyna.

В заключении главы сделан вывод, что разработанные методы создания геометрических моделей ПЭМ и определения их механических свойств могут быть использованы для описания модели материала ПЭМ на этапе проектирования при отсутствии данных о свойствах ПЭМ. Использование разработанных методов позволит прогнозировать энергопоглощающие свойства ПЭМ при оценке ПРМС БКМ на различных этапах её проектирования.

В четвертой главе сформулирован метод прогнозирования ПРМС НС БКМ как без применения, так и с применением в их конструкции ПЭМ.

В основе разработанного метода прогнозирования ПРМС НС БКМ лежит компьютерное имитационное моделирование УВВ на БКМ с последующей оценкой взрывозащищенности спецавтомобиля. Оценка уровня ПРМС производится по одновременному анализу прочности НС и возникающим ускорениям. Разработанный метод позволяет произвести оценку влияния на уровень ПРМС НС БКМ применения в их конструкции различных ПЭМ. Метод основывается на использовании специализированного программного обеспечения, позволяющего анализировать высокоскоростные динамические процессы, в частности программного комплекса LS-Dyna.

На рисунке 5 представлена блок-схема алгоритма разработанного метода.

Вместе с подробным описанием метода в работе приведена его реализация для оценки ПРМС спецавтомобиля СПМ-3 (первого образца) с подробными рекомендациями и описанием особенностей создания расчетной модели и моделирования УВВ в LS-Dyna. В результате решения расчетной моде-

ли (рис. 6) были получены поля возникающих напряжений в НС (рис. 7) и уровень ускорений в голове модели испытательного манекена GEBOD.

В качестве источника УВВ на СПМ-3 был принят заряд массой 4 кг в тротиловом эквиваленте, размещенный под днищем на расстоянии 0,5 м, по середине базы спецавтомобиля и в его продольной плоскости симметрии. В результате расчетов было установлено, что конструкция НС СПМ-3 удовлетворяет условию прочности, но полученные значения вертикальных ускорений существенно превысили допустимые для человека значения – $1,8 \cdot 10^3 \text{ м/с}^2$ в течение 0,015 с и составили $6 \cdot 10^3 \text{ м/с}^2$ за 0,01 с (рис. 8).

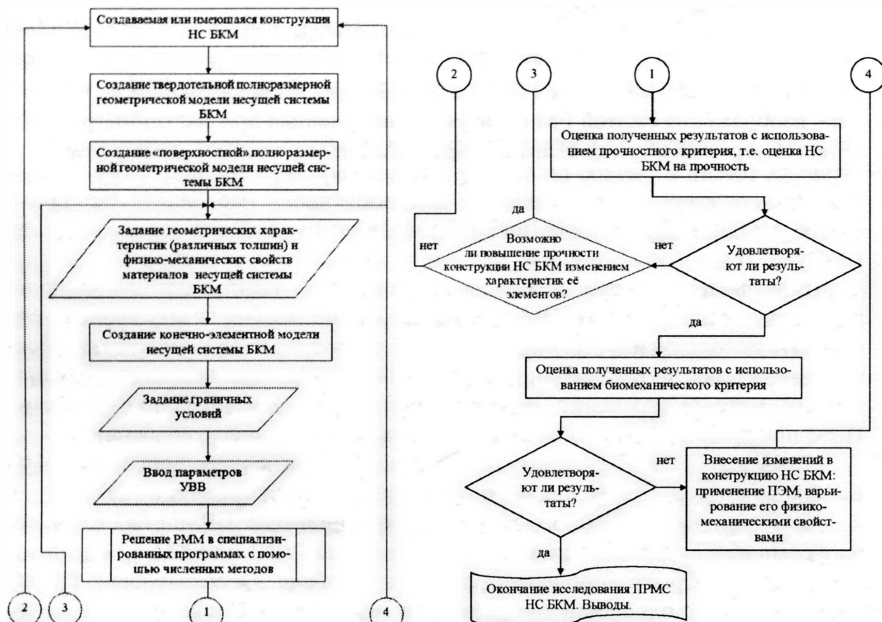


Рис. 5. Блок-схема алгоритма метода прогнозирования ПРМС НС БКМ при УВВ

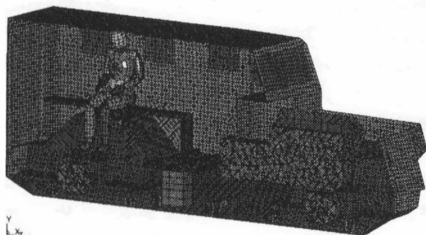


Рис. 6. Расчетная модель СПМ-3 для прогнозирования уровня ПРМС

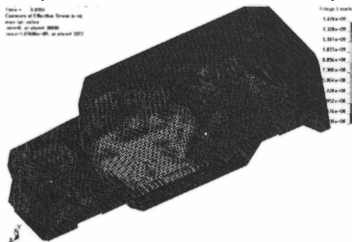


Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений по конструкции НС СПМ-3 в момент времени $t=0,01 \text{ с}$

Таким образом, СПМ-3 по биомеханическому критерию не удовлетворяет заданным требованиям по ПРМС. Согласно разработанному методу необходимо применять ПЭМ. Расчетная модель СПМ-3 была переработана: к днищу бронекорпуса были закреплены защитные экраны с наполнителем из пеноалюминия (рис.9).

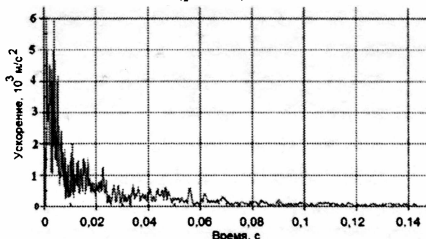


Рис. 8. Возникающие ускорения в узле модели головы манекена GEBOD

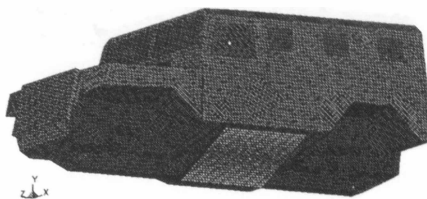


Рис. 9. Переработанная расчетная модель СПМ-3 с защитным экраном с наполнителем из пеноалюминия

Применение защитного экрана в конструкции НС СПМ-3 позволило снизить вертикальные ускорения – они составили на уровне головы модели манекена 700 м/с^2 .

В заключении главы сделан вывод, что применение разработанного метода позволит за приемлемое, с практической точки зрения, время спрогнозировать ПРМС БКМ. Также, используя данный метод, можно оценить влияние того или иного конструктивного или организационно-методического решения, реализованного в конструкции НС БКМ, на уровень взрывозащищенности БКМ. При этом отмечается, что данная процедура возможна на ранних этапах проектирования, что скажется на повышении технического уровня изготовленного образца БКМ в части взрывозащищенности.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований, выполненных с целью подтверждения адекватности, установления относительной точности и применимости разработанных в работе расчетных методов определения механических свойств ПЭМ и прогнозирования ПРМС НС БКМ. Объектами исследования являлись образцы пеноалюминия (рис. 11), произведенные по опытной технологии ОАО «НИИ Стали» и бронетранспортер – БТР-80 (рис.12), списанный со снабжения.

Экспериментальное исследование механических свойств пеноалюминия проводилось путем сжатия образцов в лаборатории МГТУ им. Н.Э. Баумана на многофункциональной испытательной машине «Galdabini» (Италия).

В результате сжатия образцов были получены диаграммы нагружения в координатах «напряжение – деформация» (рис. 13). На основании полученных диаграмм определены механические характеристики плотной партии пеноалюминия (таблица 1).

Полученные значения механических свойств пеноалюминия были использованы в при расчетной оценки ПРМС БТР-80.

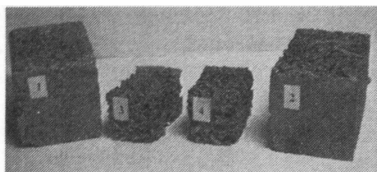
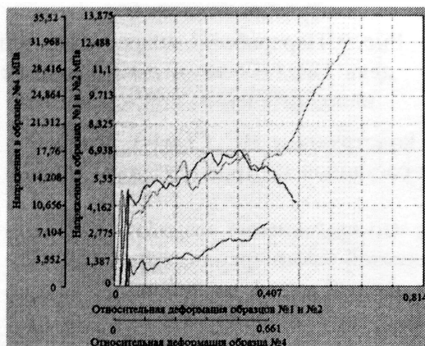


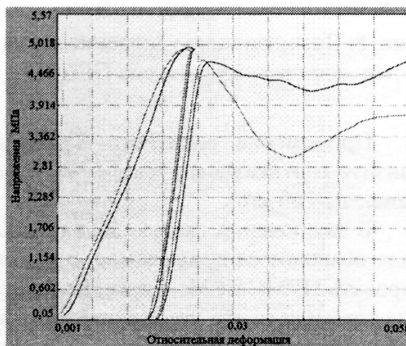
Рис. 11. Опытные образцы пеноалюминия



Рис. 12. Бронетранспортер БТР-80, используемый для натурных испытаний на подрыв



а



б

Рис. 13. Диаграмма сжатия образцов пеноалюминия: а – объединенная диаграмма сжатия для 3-х образцов пеноалюминия; б – начальный участок диаграммы сжатия для 2-х образцов пеноалюминия

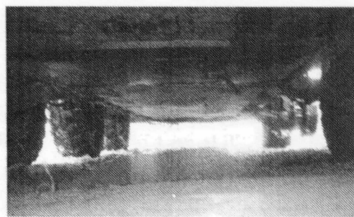
Таблица 1

Характеристика № образца	Модуль упругости E , ГПа	Напряжение пластичности σ_{pl} , МПа
Образец №1	2,21	4,96
Образец №2	1,93	4,93
Образец №4	0,799	3,7

При экспериментальной оценке уровня ПРМС БТР-80 были исследованы два варианта защиты: с разнесенным защитным экраном из углеродистой стали и с разнесенным защитным экраном из углеродистой стали с наполнителем – пеноалюминием в виде плиты с размерами 500x500x60 мм (рис. 14). Масса заряда взрывчатого вещества, расположенного на твердом основании под геометрическим центром защитных экранов составляла 2 кг в тротиловом эквиваленте. Датчики вертикального ускорения были закреплены на внутренней поверхности листа днища БТР-80.



а

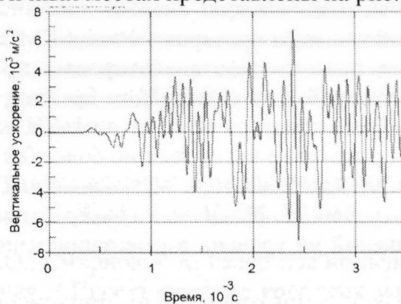


б

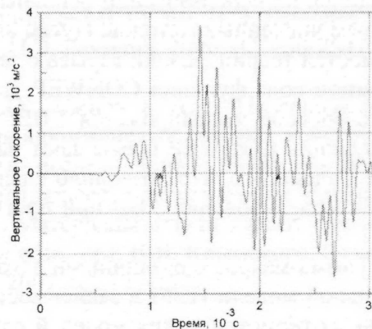
Рис. 14. Закрепление защитного разнесенного экрана на днище БТР-80: *а* – без пеноалюминия; *б* – с пеноалюминием

При натурном исследовании по данным ОАО «НИИ Стали» получены значения вертикальных ускорений в первом случае (без пеноалюминия) $5,4 \cdot 10^3 \text{ м/с}^2$, во втором случае (с пеноалюминием) – $2,8 \cdot 10^3 \text{ м/с}^2$.

Для сравнительной оценки была создана расчетная модель БТР-80 и проведена расчетная оценка его ПРМС. Полученные значения ускорений, измеренные в аналогичных местах представлены на рис. 15.



а



б

Рис. 15. Вертикальные ускорения в точке на днище расчетной модели БТР-80: *а* – с разнесенным защитным экраном; *б* – с разнесенным защитным экраном с наполнителем из пеноалюминия

Пиковое ускорение в первом случае составило $7,0 \cdot 10^3 \text{ м/с}^2$, во втором – $3,7 \cdot 10^3 \text{ м/с}^2$.

Полученные при расчетном исследовании значения вертикальных ускорений превышают значения ускорений, полученные при натурных исследованиях ПРМС БТР-80:

- с защитным разнесенным экраном – на 30%;
- с защитным разнесенным экраном и наполнителем из пеноалюминия – на 26%.

Повышение точности результатов расчетного метода возможно при большей детализации и проработке расчетной модели с учетом функциональных возможностей современных многопроцессорных ЭВМ.

Сходимость результатов расчетных и экспериментальных исследований позволила сделать вывод об адекватности разработанного метода и его пригодности для прогнозирования ПРМС НС образцов БКМ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Предложены и обоснованы критерии ПРМС БКМ: эквивалентные механические напряжения, позволяющие анализировать прочность конструкции НС, обеспечение которой необходимо для предотвращения затекания ударной волны внутрь бронекорпусов БКМ, и пиковые вертикальные ускорения, действующие на различные части тела не более 0,015 с. Установлено, что использование данных критериев при исследовании ПРМС БКМ позволяет комплексно оценить влияние различных конструктивных и организационно-методических решений на уровень взрывозащищенности специальных БКМ.

2. Разработан способ компьютерного имитационного моделирования УВВ на БКМ, базирующийся на использовании основных зависимостей физики взрыва с применением численных методов. Путем аналитического сравнения основных зависимостей теории физики взрыва с зависимостями, представленными в программном коде функции CONWER, доказана приемлемая точность разработанного способа моделирования УВВ: результаты расчета пикового давления по функции CONWER превышают на 6-15% результаты, полученные по формуле Садовского, что позволило сделать вывод о применимости данного способа моделирования УВВ при прогнозировании ПРМС БКМ.

3. Разработана программа-макрос с различными алгоритмами генерации компьютерной твердотельной модели ПЭМ в зависимости от требуемой пористости. На основе данных геометрических моделей разработан расчетный метод определения механических свойств виртуального ПЭМ. Качественные результаты натурных экспериментов по исследованию механических свойств пеноалюминия подтвердили адекватность метода. Использование данного метода позволяет сформулировать требования к технологии производства

ПЭМ для получения материала с необходимыми физико-механическими свойствами.

4. Разработан расчетный метод прогнозирования ПРМС НС при УВВ на БКМ, позволяющий проводить исследования по обеспечению живучести экипажа БКМ и влияния ПЭМ на снижение поражающего действия УВВ. Применение данного метода как на этапах проектирования новых, так и при модернизации существующих БКМ, позволит повысить уровень их ПРМС с существенным снижением временных затрат и стоимости доводочных работ.

5. Выполнено сравнение результатов расчетного исследования ПРМС БКМ с результатами натурного исследования. Данным сравнением доказана адекватность и достаточная точность разработанного метода прогнозирования ПРМС БКМ. Относительная погрешность по вертикальным ускорениям при исследовании образца БКМ с разнесенным защитным экраном составила 30%, с защитным экраном с наполнителем из ПЭМ (пеноалюминия) – 26%.

6. В результате проведения исследований по оценке ПРМС БКМ доказано, что применение ПЭМ, в частности пеноалюминия, в конструкции НС БКМ существенно снижает уровень поражающего действия УВВ, а также приводит к уменьшению пластических прогибов листов днища бронекорпусов БКМ на 20-40% в зависимости от физико-механических свойств ПЭМ, способа их установки на НС БКМ, и состава композиции защитной структуры с наполнителем из ПЭМ.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Бутарович Д.О., Смирнов А.А. Расчетное исследование механических свойств пеноалюминия // Проектирование колесных машин: Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. (22–23 ноября 2006 г.) М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2006. (С. 250-254).

2. Бутарович Д.О., Смирнов А.А. Исследование процессов ударно-волнового нагружения алюминиевых сотовых конструкций // Теоретические и лабораторно-полевые исследования и внедрение опытно-конструкторских разработок в учебный процесс и эксплуатацию специальной техники с легким бронированием: Материалы научн.-практ. конференции, 26-28 июня 2007 г., г. Рязань: Под общ. ред. В.Я. Крымского. Рязань: РВВДКУ им. генерала В.Ф. Маргелова. 2007. (С. 173-177).

3. Бутарович Д.О., Смирнов А.А. Моделирование механических свойств пеноалюминия // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2009. № 3 (76) 2009. (С. 120-123).

4. Бутарович Д.О. Оценка возможности вторичного поражения экипажа броневедомобиля элементами корпуса при ударно-волновом нагружении // Автомобили, тракторы, их агрегаты и системы: Материалы 65-ой международной научно-технической конференции АИИ «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров». М.: МГТУ «МАМИ», 2009. (С. 64-70).

5. Разработка бронетранспортера для внутренних войск / Г.О. Котиев [и др.] // Вопросы оборонной техники. 2009. Выпуск 5 – 6. (С. 38-41).

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

7. Рябов Д.М., Смирнов А.А., Бутарович Д.О. Оценка влияния способов закрепления сидений на живучесть экипажа при подрыве броневедомобиля / Известия ВУЗов. Машиностроение. 2011. №4. (С. 27-33).

8. 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).