

Арутюнян Георгий Артурович

**МЕТОД РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ  
ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩИХ КОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
НЕСУЩИХ СИСТЕМ АВТОМОБИЛЕЙ**

Специальность: 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре колесных машин федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: **Карташов Александр Борисович**,  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
колесных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Орлов Лев Николаевич**,  
доктор технических наук, профессор, заведующий  
кафедрой «Автомобили и тракторы»  
Нижегородского государственного технического  
университета им. Р.Е. Алексеева

**Зузов Игорь Валерьевич**,  
кандидат технических наук, технический  
директор группы компаний «Остров»

Ведущая организация: **ОАО «ЦНИИСМ»** (Центральный научно-  
исследовательский институт специального  
машиностроения)

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г. в \_\_\_\_\_ часов 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,  
стр. 1.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью  
учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д.  
5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.07.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на  
официальном сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана: [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.  
Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.т.н.

 **Е.Б. Сарач**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время все больше крупнейших мировых автомобильных производителей идут по пути использования волокнистых полимерных композиционных материалов (ПКМ) в несущей системе автомобиля как для изготовления полностью несущего кузова, так и для отдельных элементов. Несущая система автомобиля должна обеспечивать крепление всех узлов и агрегатов, обладать достаточной прочностью и жесткостью, обеспечивать комфорт и при этом обладать минимальной массой и габаритами. Кроме этого, несущая система автомобиля должна обеспечивать пассивную безопасность. Применение ПКМ является актуальным способом удовлетворения противоречивых требований, предъявляемых к несущей системе автомобиля.

С точки зрения обеспечения пассивной безопасности использование композиционных материалов имеет существенные отличия от металлов. Энергопоглощение в ПКМ происходит не путем деформирования с образованием пластических складок, а за счет постепенного стабильного разрушения с образованием большого количества мелких осколков. Для обеспечения безопасности в случае фронтального столкновения в несущих системах большинства легковых автомобилей можно выделить конструктивные элементы, предназначенные для энергопоглощения и части несущей системы, обеспечивающие сохранение жизненного пространства. Композиционные материалы также применяются для изготовления передних энергопоглощающих конструкций несущих систем легковых автомобилей. Методы расчета деталей из ПКМ, работающих при статических и переменных нагрузках, достаточно хорошо изучены. Тем не менее, устоявшегося метода для проектирования энергопоглощающих конструкций из композиционных материалов, которая бы позволяла описывать процесс постепенного стабильного разрушения с энергопоглощением, в настоящее время не существует.

Разработка подобного метода, позволяющего оценивать показатели пассивной безопасности автомобилей, с композитными энергопоглощающими конструкциями на стадии проектирования, является актуальной задачей.

Цель и задачи. Целью работы является обеспечение пассивной безопасности автомобилей путем применения в несущей системе фронтальных композитных энергопоглощающих конструктивных элементов.

Для достижения цели в диссертации обоснованы и решены следующие задачи:

- 1) разработана математическая модель процесса разрушения энергопоглощающих конструкций из композиционных материалов;
- 2) проведены экспериментальные исследования образцов композитных энергопоглощающих элементов с целью верификации разработанной математической модели;
- 3) разработан метод расчета композитных энергопоглощающих конструкций, позволяющий оценивать на стадии проектирования пассивную безопасность несущих систем автомобилей;
- 4) разработан метод оптимизации конструктивных параметров композитных энергопоглощающих конструкций несущих систем автомобилей;
- 5) разработаны научно-обоснованные базовые конструктивные решения для композитных энергопоглощающих конструкций несущих систем автомобилей.

Научная новизна работы заключается:

1) в разработанном методе расчета композитных энергопоглощающих конструкций несущих систем автомобилей, особенностями которого являются моделирование процесса постепенного разрушения композиционных материалов при ударном нагружении, и прогнозирование на стадии проектирования показателей пассивной безопасности в соответствии со стандартизованными методиками испытаний;

2) в разработанной методике оптимизации параметров композитных энергопоглощающих конструкций несущих систем автомобилей, особенностью которой является применение созданной с помощью искусственной нейронной сети регрессионной модели энергопоглощения при разрушении для оценки композитной конструкции, позволяющей увеличить скорость вычисления, и применение многокритериальной многопараметрической оптимизации с помощью генетического алгоритма.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов доказана сравнением теоретических и экспериментальных результатов исследования энергопоглощения в композиционных материалах и базируется на использовании апробированных методов имитационного математического моделирования и теории планирования эксперимента.

Практическая значимость работы. Разработанный метод расчета композитных энергопоглощающих конструкций несущих систем автомобилей, включающий цикл оптимизации, реализован в виде программного комплекса для использования на стадии проектирования несущей системы и сокращения количества необходимых натурных испытаний.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены в практику расчетов и проектирования в ООО «БРТ Инжиниринг», ОАО «ЦНИИСМ» (Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения), а также используются в учебном процессе на кафедре колесных машин в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

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

1. На научно-технических семинарах кафедры колёсных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2014-2018;

2. На десятой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 6 научных статей общим объёмом 3,76 п.л., 5 из которых входят в журналы из перечня, рекомендованного ВАК РФ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и заключения по работе, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. Работа изложена на 142 листах машинного текста, содержит 90 рисунков, 12 таблиц. Список литературы содержит 107 наименований.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся положения научной новизны, а также результаты и выводы по работе.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, заключающегося в разработке метода расчета и оптимизации композитных энергопоглощающих конструкций несущих систем автомобилей. Приведено краткое содержание выполненных исследований, сформулирована цель работы и отражены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор и анализ применения композиционных материалов для изготовления несущих систем автомобилей, в том числе для изготовления энергопоглощающих конструкций. Проведен обзор и анализ публикаций по теме исследования, которые можно разделить на четыре группы. Среди работ, которые посвящены аналитическим методам расчета изделий из композиционных материалов изучены публикации Алфутова Н.А., Зиновьева П.А., Попова Б.Г., Афанасьева Б.А., Даштиева И.З., Васильева В.В и других.

Проведен анализ публикаций, посвященных экспериментальным исследованиям энергопоглощающих свойств композиционных материалов авторов Hull D., Farley G., Thornton P.H. Starbuck J., Simunovic S., Jacob G., Feraboli P., Hamada H., Ramakrishna и других.

Проанализированы работы, посвященные численному моделированию разрушения композитных энергопоглощающих элементов авторов Бурова А.Е. Дмитриенко Ю.И., Сборщикова С.В., Соколова А.П., Шпаковой Ю.В., Козлова М.В., Шешенина С.В., Andersson M., Liedberg P., Feraboli P., Wade B., Deleo F., Rassaian M., Higgins M., Byar A., Karlsson F., Gradin W.

Среди работ, посвященных оценке пассивной безопасности автомобилей, в том числе с несущими системами из композиционных материалов, проанализированы публикации Зузова В.Н., Орлова Л.Н., Вашурина А.С., Тумасова А.В., Хусаинова А.Ш, а также зарубежные публикации Savage G. M., Heimbs S., Abrate S., Elmarakbi A. и других.

По результатам проведенного обзора выявлена необходимость в разработке метода расчета композитных энергопоглощающих конструкций несущих систем автомобилей и сформулированы задачи, решению которых посвящены дальнейшие главы диссертации.

Во второй главе описана разработка математической модели, учитывающей энергопоглощение в процессе постепенного стабильного разрушения энергопоглощающего элемента. Описаны особенности моделирования высоконелинейных быстропротекающих процессов методом конечных элементов. Обоснован выбор конечно-элементного решателя Radioss, входящего в состав программного комплекса Altair Hyperworks, реализующего явный метод интегрирования. Для математического описания напряженно-деформированного состояния композиционных материалов широко используются феноменологические критерии разрушения. Критерии разрушения представляются в виде функции критерия разрушения, которая зависит от параметров напряженного состояния и прочностных свойств композиционного материала в целом или его компонентов. Функция составляется так, что ее значение меньше единицы являются допустимым, а значение больше единицы свидетельствует о начале пластической деформации и разрушении. Критерий разрушения Цая-Ву относится к квадратичным критериям и

его функция имеет вид:  $F(\sigma) = F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{44}\sigma_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2$ . Особенностью расчета конструкций, подвергающихся ударному разрушению, является необходимость моделирования работы композиционного материала за пределами зоны упругости. Для этого в программном комплексе Altair Hyperworks применяется модель материала № 25 «Orthotropic shell and solid material», которая основана на критерии разрушения Цая-Бу. В ней учитывается зависимость коэффициентов критерия разрушения от величины работы по пластическому деформированию материала и коэффициенты вычисляются по формулам:

$$F_1(W_p) = -\frac{1}{\sigma_{1y}^c(W_p)} + \frac{1}{\sigma_{1y}^t(W_p)}, \quad F_{11}(W_p) = -\frac{1}{\sigma_{1y}^c(W_p) \cdot \sigma_{1y}^t(W_p)}, \quad F_{44}(W_p) = \frac{1}{(\sigma_{12y}(W_p))^2}.$$

Напряжения в зоне пластических деформаций вычисляются с помощью алгоритма радиального возврата. Модель учитывает накопление разрушений и разупрочнение в композиционных материалах, причем отдельно для растяжения и сжатия. Кривые нагружения показаны на Рис. 1.

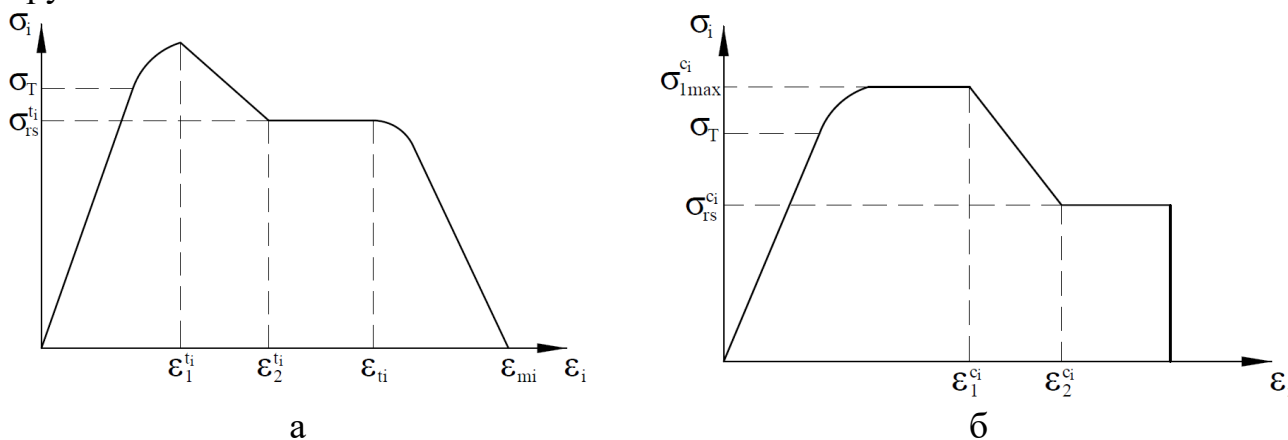


Рис. 1. Кривые нагружения а) при растяжении, б) при сжатии

Модель предусматривает два условия разрушения конечных элементов. Во-первых, разрушение в процессе растяжения происходит при превышении величины относительной деформации  $\epsilon_m$ . Вторым условием, при котором происходит удаление конечного элемента, является достижение максимальной допустимой величины энергии пластического деформирования. Некоторые параметры модели не могут быть получены только на основе квазистатических испытаний плоских образцов материала и требуют калибровки по результатам натурных испытаний.

Для верификации математической модели проводится моделирование образцов композитных энергопоглощающих элементов с круглым поперечным сечением. Модель разбивается на трехузловые и четырехузловые конечные элементы. Для моделирования многослойного композиционного материала используется специальная формулировка оболочечных конечных элементов «Type 11», в которой для каждого слоя композиционного материала возможно задание различной толщины, направления и свойств материала. Условия разрушения и удаления элементов оцениваются отдельно для каждого слоя. На Рис. 2 представлены промежуточные этапы разрушения первого и второго образцов, полученные в результате имитационного моделирования.

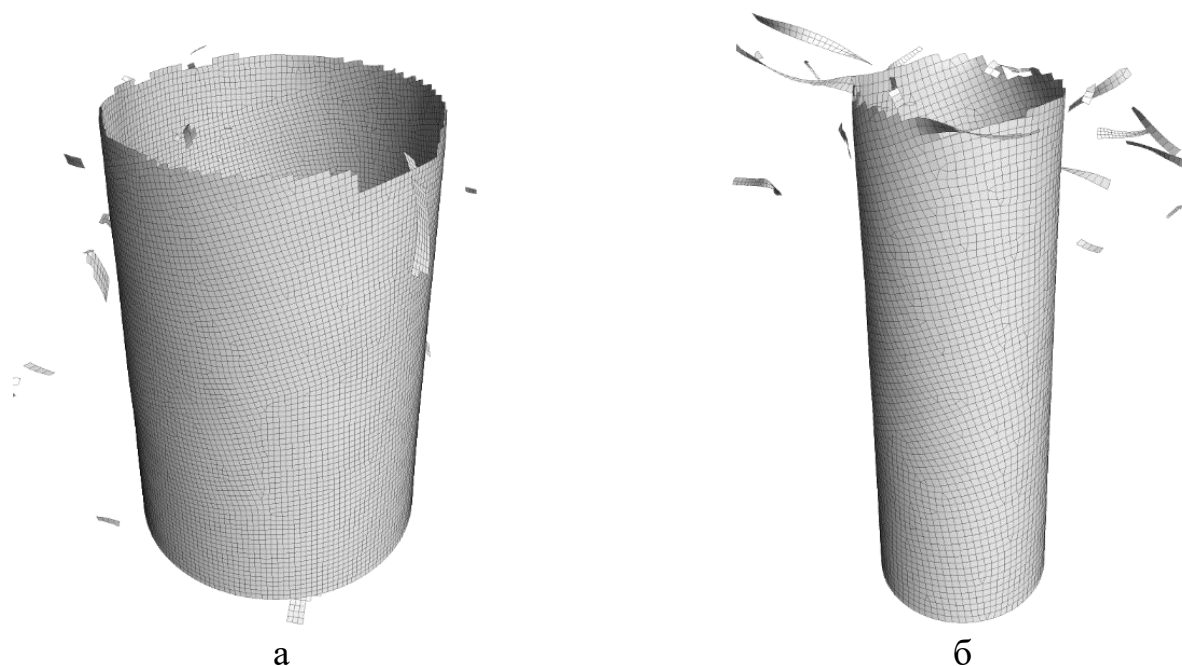


Рис. 2. Промежуточные этапы моделирования образцов

Описанная в главе математическая конечно-элементная модель позволяет рассчитывать энергопоглощение в композиционных материалах при разрушении и моделировать разрушение путем фрагментации.

В третьей главе описаны результаты экспериментальных исследований. Предварительные значения параметров модели материала определены на основе известных характеристик углеволокна и связующего, а также уточнены на основе публикаций, содержащих результаты экспериментальных исследований авторов Andersson M., Liedberg P., Obradovic J., Boria S., Belingardi G., Feraboli P., Wade B. и других. Свойства композиционных материалов, а также форма образцов и условия нагружения в рассмотренных публикациях отличаются. Кроме того, часть информации не приводится, или приводятся округленные значения. Поэтому для верификации математической модели в данной работе проводятся испытания образцов с круглым поперечным сечением. Такая форма приближена к конструкции лонжеронов, используемых в деформируемых конструкциях, которые в большинстве случаев имеют замкнутое поперечное сечение. Постоянная кривизна поверхности обеспечивает равномерное разрушение и повторяемость результатов. В отличие от плоских образцов, они не требуют дополнительной оснастки для закрепления при испытании. Проводятся динамические испытания с разрушением образцов, преимущество которых является большая приближенность к реальным условиям нагружения энергопоглощающих конструкций при дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) и возможность измерения непосредственно ускорений. Для проведения испытаний на основе эпоксидной матрицы с помощью метода вакуумной инфузии были изготовлены два образца углепластиковых энергопоглощающих элементов, показанные на Рис. 3.

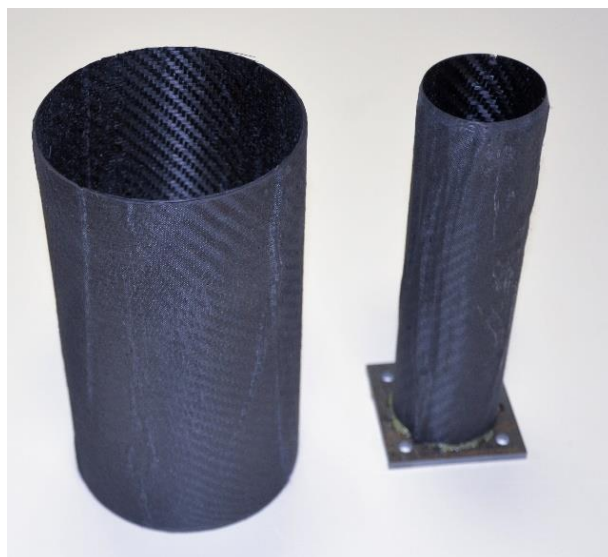


Рис. 3. Образцы углепластиковых энергопоглощающих элементов

Параметры образцов и условия нагружения определены путем моделирования с использованием предварительных свойств материала. Параметры образцов и условия нагружения представлены в Таблице 1. Условия нагружения определены так, чтобы образец не разрушался полностью, и была возможность измерить остаточную длину после удара.

Таблица 1.

Параметры образцов и условия нагружения

	Высота, мм	Диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Скорость удара, м/с
Образец №1	200	110	1,6	4
Образец №2	200	50	1,8	4,5

Испытания проводились на стенде маятникового типа в центре испытаний на пассивную безопасность ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». Схема стенда показана на Рис. 4. Образец 1 закреплен на основании 2. Удар производится маятником 3 массой 315,6 кг, предварительно поднятым на необходимую высоту подъемным устройством.

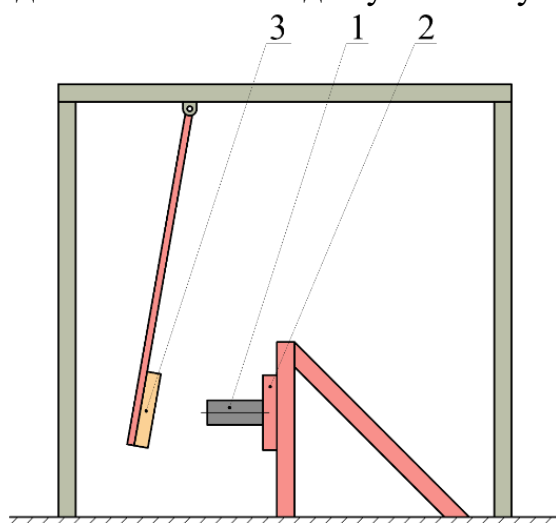


Рис. 4. Схема стенда маятникового типа



В процессе испытания образца №2 наблюдалось равномерное разрушение с образованием большого количества мелких осколков, как показано на Рис. 5.



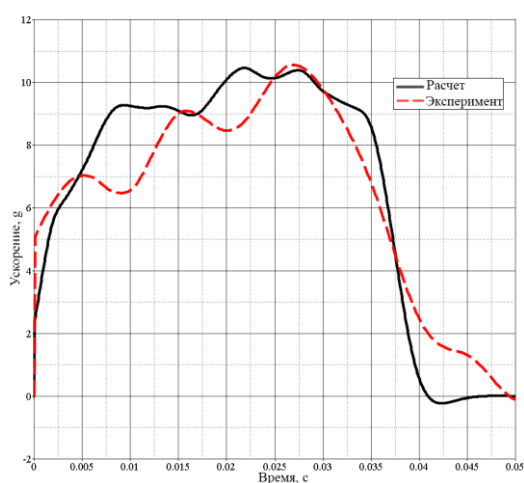
а)



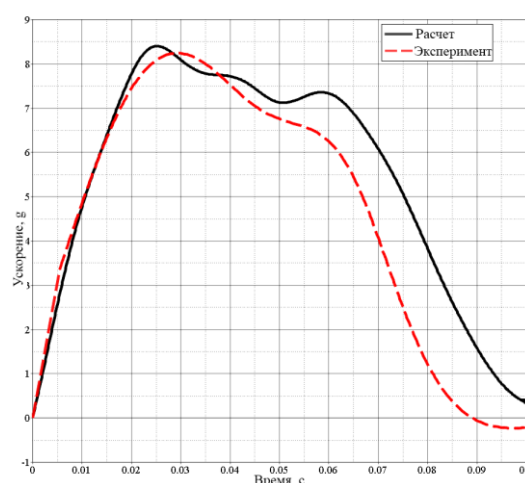
б)

Рис. 5. Процесс разрушения углепластикового образца

На Рис. 6 приведено сравнение ускорений, полученных экспериментально и в результате математического моделирования для двух типов образцов.



а



б

Рис. 6. Сравнение расчетных и экспериментальных ускорений а) – для первого образца, б) – для второго образца

Расчетная модель позволяет вычислять максимальные и средние значения ускорений, хотя наблюдаются отклонения в величине колебаний ускорений, которые могут быть объяснены недостаточной жесткостью экспериментального стенда. Погрешность определения длины разрушившейся части не превышает 3,4 %, а погрешность определения средних ускорений не превышает 12 %, что свидетельствует об адекватности модели и возможности ее применения для расчета энергопоглощающих конструкций несущих систем автомобилей. В главе установлено:

- композитные энергопоглощающие конструкции несущих систем следует моделировать одним слоем специальных оболочечных конечных элементов, поддерживающих задание различных слоев;
- для верификации модели и учета влияния на свойства всех параметров композиционного материала следует проводить испытания трубчатых образцов;
- для предотвращения неустойчивостей из-за мгновенного удаления большого количества конечных элементов КЭ сетку следует делать нерегулярной, что также соответствует неомогенности композиционных материалов.

В четвертой главе предлагается методика расчета композитных энергопоглощающих конструкций несущих систем автомобилей. Блок-схема методики представлена на Рис. 7.

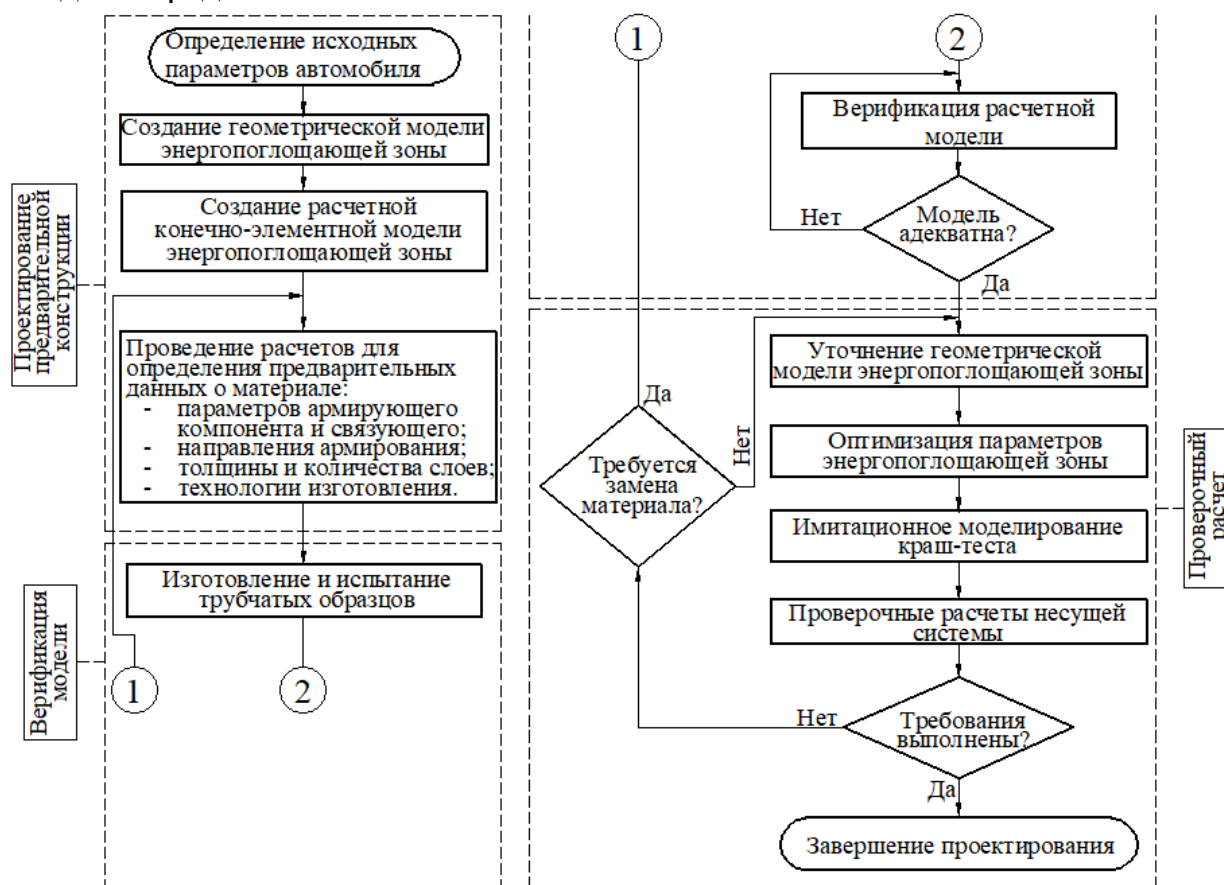


Рис. 7. Блок-схема методики расчета композитных энергопоглощающих конструкций

Разработанная методика применяется для проектирования передней энергопоглощающей конструкции автомобиля, разрабатываемого в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автомобиль имеет несущую систему типа «родстер», то есть имеет два места и складывающуюся крышу. Несущая система, показанная на Рис. 8, изготовлена из стали и представляет собой пространственную раму из труб круглого и квадратного сечения.



Рис. 8. Несущая система рассматриваемого автомобиля

Автомобиль имеет среднемоторную компоновку, двигатель установлен за водителем перед задней осью. Передняя энергопоглощающая конструкция имеет большую длину и составляет значительную часть несущей системы, поэтому

выбранный автомобиль является подходящим объектом для реализации разработанной методики.

В начале проводится сравнительная оценка эффективности энергопоглощения лонжеронов, изготовленных из стали и из углепластика с помощью математической модели, учитывающей особенности разрушения изделий из ПКМ.

Для проведения сравнения необходимо выработать критерии оценки эффективности работы энергопоглощающих элементов. Существует большое количество различных критериев, которые могут использоваться для количественной оценки эффективности конструкции с точки зрения энергопоглощения: величина поглощенной энергии  $W = \int P ds$ , удельное энергопоглощение  $E_{уд} = W/m$ , средние напряжения разрушения  $\bar{\sigma} = \bar{P}/A$ , коэффициент равномерности реакции  $k_{p.p.} = \bar{P} / P_{\max}$ , коэффициент эффективности энергопоглощения  $k_{э.эн.} = W / W_{теор}$ , где  $\bar{P}$  – средняя реакция в процессе разрушения,  $S$  – длина разрушившейся части,  $A$  – площадь поперечного сечения,  $P_{\max}$  – пиковое значение реакции,  $W_{теор}$  – теоретически возможная максимальная величина поглощенной энергии. На Рис. 9 показано графическое представление перечисленных параметров.

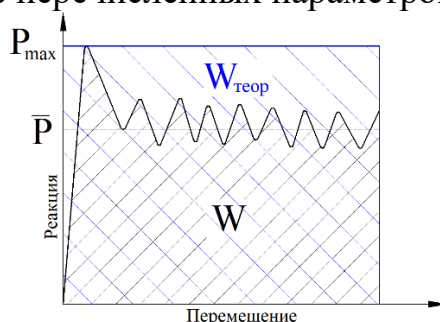


Рис. 9. Вычисление показателей энергопоглощения

Для сравнительного анализа ЭПЭ из различных материалов используется величина удельного энергопоглощения, как наиболее показательная, так как она позволяет оценить эффективность элемента, учитывая весь процесс энергопоглощения и в незначительной степени зависит от пиковых ускорений. Пиковые ускорения в первую очередь определяются конструкцией инициаторов деформации, которые влияют только на начальный момент энергопоглощения.

Для стального лонжерона выбрана восьмигранная форма сечения. По результатам обзора публикаций, анализа существующих конструкций и особенностей энергопоглощения в композиционных материалах для углепластикового лонжерона предлагается гофрированная форма сечения. Сравнение сечений показано на Рис. 10.

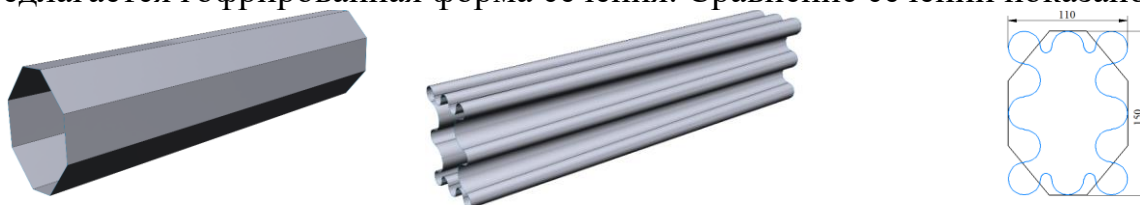


Рис. 10. Сравнение форм лонжеронов

Оба выбранных поперечных сечения лонжеронов имеют одинаковые габаритные размеры и вписываются в компоновку рассматриваемого автомобиля.

Моделируется фронтальное столкновение в недеформируемое препятствие на скорости 56 км/ч. Сравнение производится с ЭПЭ, изготовленными из стали 20 и из высокопрочной автомобильной стали марки 1000 DP.

Сравнение эффективности энергопоглощения различных комбинаций материалов и форм лонжеронов представлено на Рис. 11.

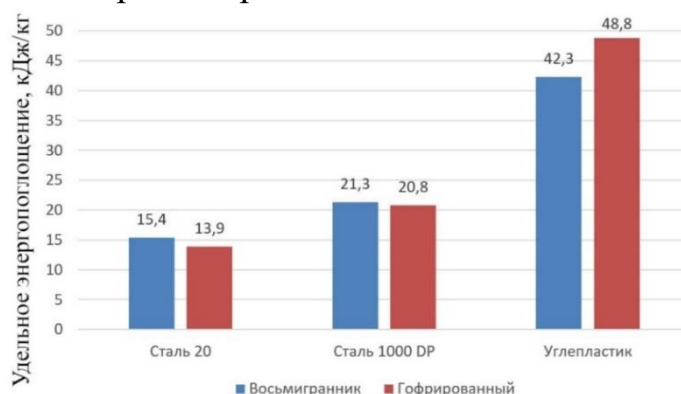


Рис. 11. Сравнение эффективности энергопоглощения различных комбинаций материалов и форм лонжеронов

Для лонжерона с восьмигранным сечением углепластик обеспечивает удельное энергопоглощение в 2,8 раза выше, чем для лонжерона из стали 20, и в 2 раза выше чем у высокопрочной стали.

При переходе к гофрированному сечению удельное энергопоглощение композитной конструкции возрастает на 15,4 %. При этом эффективность энергопоглощения стали 20 и стали 1000 DP уменьшается на 9,7 % и 2,4 %.

Формы деформации металлического и разрушения композитного лонжеронов значительно отличаются. Сравнение этапов разрушения восьмигранного лонжерона представлено на Рис. 12.



Рис. 12. Сравнение процессов ударного нагружения: а) сталь, б) углепластик

Стальной энергопоглощающий элемент деформируется с образованием равномерных складок. Композитный лонжерон постепенно разрушается с образованием отдельных осколков.

Сравнение процессов деформации гофрированного лонжерона из стали и углепластика представлено на Рис. 13.

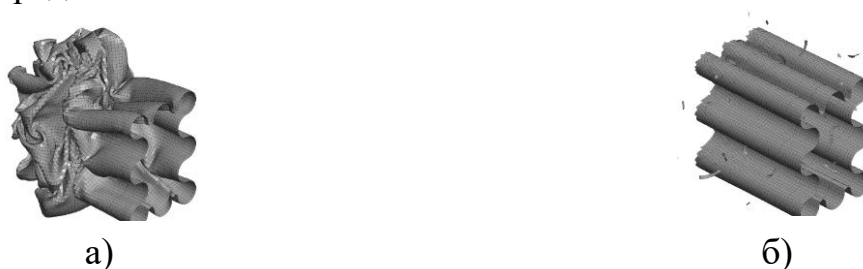


Рис. 13. Сравнение процессов ударного нагружения: а) сталь, б) углепластик



О большей эффективности предложенной формы для композитного лонжерона свидетельствует меньшее количество отделившихся осколков и их меньший размер. Неэффективность формы гофрированного лонжерона при изготовлении из стали обуславливается неравномерностью образования складок.

На Рис. 14 представлено сравнение реакций, возникающих при разрушении стального восьмигранного и композитного оптимизированных лонжеронов.

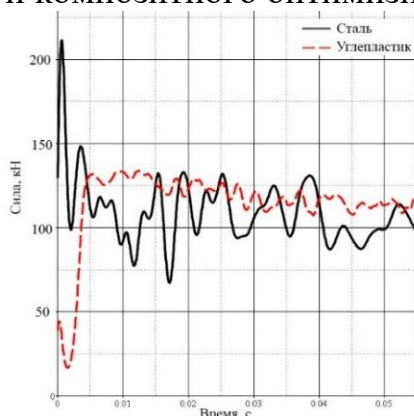
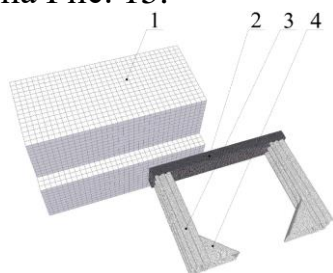


Рис. 14. Сравнение реакций

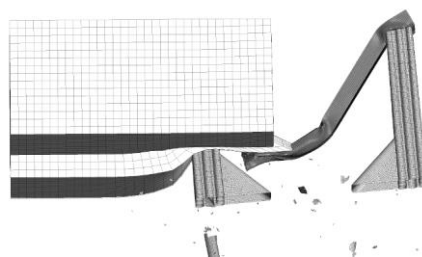
Обе конструкции в процессе разрушения создают реакцию с достаточно постоянным средним значением, но диапазон изменения величины реакции значительно больше при деформации стальной конструкции. Это объясняется дискретностью образования пластических складок. За счет равномерного разрушения и участия в энергопоглощении всего материала углепластиковый лонжерон создает реакцию практически постоянной величины. В результате сравнительного анализа продемонстрирована значительно большая эффективность углепластиковых энергопоглощающих конструкций и подтверждена перспективность их применения.

Для оценки работоспособности предложенной композитной энергопоглощающей конструкции и ее применимости в несущей системе автомобиля проведено имитационное моделирование нагружения конструкции с граничными условиями, соответствующими испытанию на фронтальный удар по правилу ЕЭК ООН №94.

Конечно-элементная модель и результаты моделирования представлены на Рис. 15. Расчетная модель состоит из деформируемого препятствия 1. Передняя энергопоглощающая конструкция состоит из лонжеронов 3, гофрированной формы, стальной поперечны 2, связывающей лонжероны, и усилителей 4, предназначенных для увеличения прочности лонжерона у основания и препятствующих катастрофическому разрушению при отклонении направления действия силы от оси лонжерона. Моделируется столкновения на скорости 56 км/ч. Этапы процесса показаны на Рис. 15.



а) КЭ модель



б) Результаты моделирования

Рис. 15. Удар в деформируемый барьер

В процессе столкновения наблюдается равномерное разрушение одного из лонжеронов. Несмотря на наличие силы, действующей в боковом направлении, и наличие изгиба лонжерона, не происходит его разрушения у основания за счет применения усилителя.

На Рис. 16 представлен график ускорений точки, расположенной в плоскости основания лонжеронов.

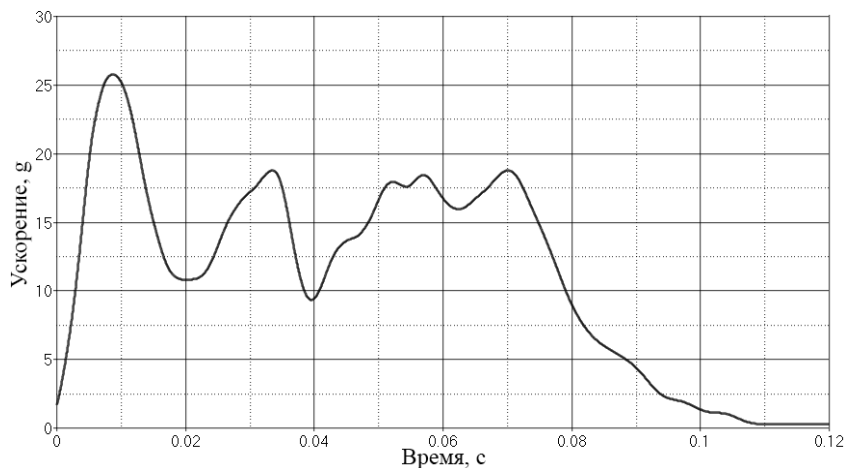


Рис. 16. График ускорений

Пиковое значение кратковременных ускорений в плоскости основания лонжеронов в процессе столкновения составляет 25,7 g. Длительность воздействия ускорений величиной более 25 g составляет 0,3 мс. В процессе стабильного замедления ускорения не превышают 19 g, что сравнимо с показателями классических металлических конструкций.

Проводится проверочный расчет передней композитной энергопоглощающей конструкции в составе автомобиля. Учитывается влияние элементов обшивки автомобиля, а также передних колес, учитывается закрепление энергопоглощающей конструкции не к абсолютно жесткому основанию, а к податливой раме автомобиля. Для оценки показателей пассивной безопасности используется КЭ модель манекена Hybrid III. Общий вид КЭ модели и результаты моделирования показаны на Рис. 17.

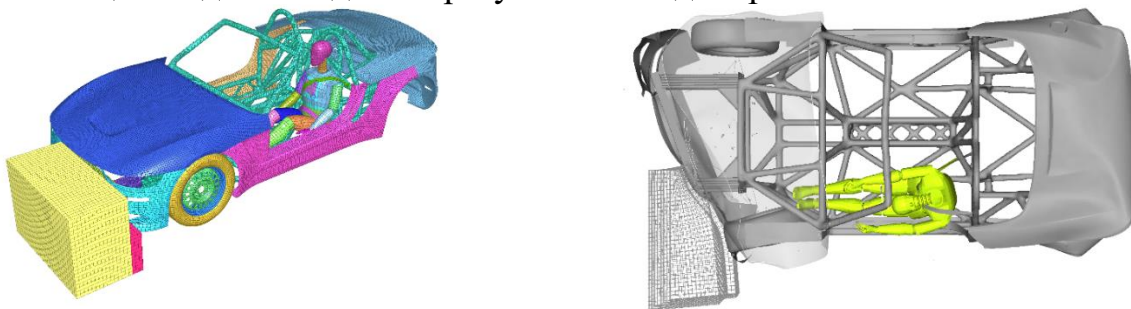


Рис. 17. Моделирование краш-теста

Значение критерия травмирования головы НИС составляет 248,5, что свидетельствует о низкой вероятности получения травм. В главе выявлено, что:

- для обеспечения высокого удельного энергопоглощения за счет разрушения путем фрагментации стенки конструкции должны обладать высокой жесткостью за счет малого радиуса кривизны или изготовления в виде гофр;
- в процессе разрушения конструкция теряет структурную целостность, поэтому необходимо обеспечить образование стабильного фронта разрушения. Для этого могут применяться различные инициаторы разрушения;

– для крепления к углепластиковым энергопоглощающим элементам узлов и агрегатов необходимо использовать дополнительные конструкции или использовать композиционные материалы с применением арамидных волокон;

– для предотвращения образования трещин у основания лонжерона его необходимо изготавливать с увеличенной толщиной за счет большего количества слоев или применять усилители.

В пятой главе представлена методика оптимизации параметров композитных энергопоглощающих конструкций, блок-схема которой показана на Рис. 18.



Рис. 18. Блок-схема методики оптимизации с применением суррогатной модели

Методика реализуется на примере оптимизации композитного энергопоглощающего лонжерона гофрированной формы, описанного в четвертой главе. При использовании композиционных материалов кроме параметров формы появляется также большое количество параметров, характеризующих материал.

Предлагается методика оптимизации с использованием созданной с помощью методов регрессионного анализа приближенной математической модели, отличающейся возможностью быстрого вычисления (суррогатной модели). Для построения суррогатной модели проводится серия расчетов и составляется набор управляемых параметров оптимизации и соответствующих значений контролируемых параметров (начальная выборка). Выбор значений управляемых параметров, равномерно охватывающих диапазон допустимых значений, осуществляется с помощью метода планирования экспериментов. На основании начальной выборки строится регрессионная модель энергопоглощения при разрушении композитной конструкции с помощью искусственной нейронной сети (ИНС), обеспечивающей высокую точность модели. ИНС представляет собой связанные между собой вычислительные операторы – нейроны, которые состоят из связей (синапсов), сумматора и функции активации. ИНС аппроксимирует входные сигналы путем их представления в виде суммы нелинейных функций. Процесс обучения ИНС заключается в определении значений весов связей. Обучение сети проводится с помощью метода обратного распространения ошибки, который основан на методе наименьших квадратов и градиентном спуске. Используется двухслойная

сеть прямого распространения состоящая из четырех входных, одного выходного нейрона, и 10 нейронов в скрытом слое. Структура нейрона и схема ИНС показаны на Рис. 19.

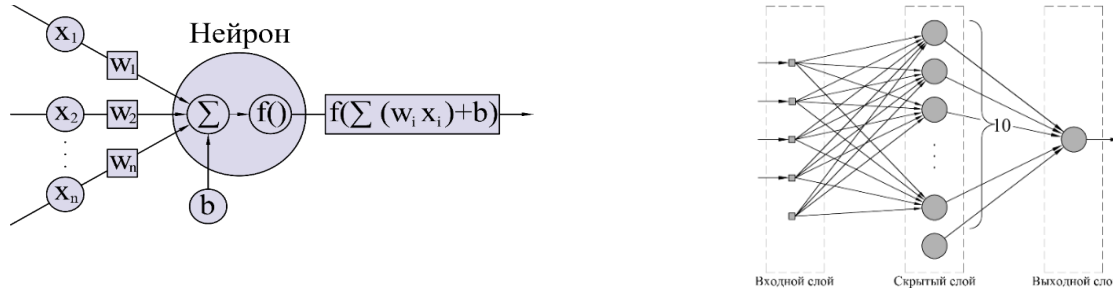


Рис. 19. Структура нейрона и схема ИНС

В конструкции лонжерона выделяется шесть групп слоев с различными углами армирования. К слоям применяется условие симметрии, поэтому для описания углов армирования слоев требуется только три управляемых параметра:  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  и  $\phi_3$ . Четвертым управляющим параметром является параметр  $t$ , характеризующий толщину стенки. Решается задача многокритериальной оптимизации. Целевыми функциями являются снижение массы и увеличение величины поглощенной энергии. Ограничением является минимальная величина поглощенной энергии. Примеры поверхностей отклика, показывающие зависимость величины поглощенной энергии от углов укладки тканей для нескольких значений управляемых параметров при одинаковой толщине показаны на Рис. 20.

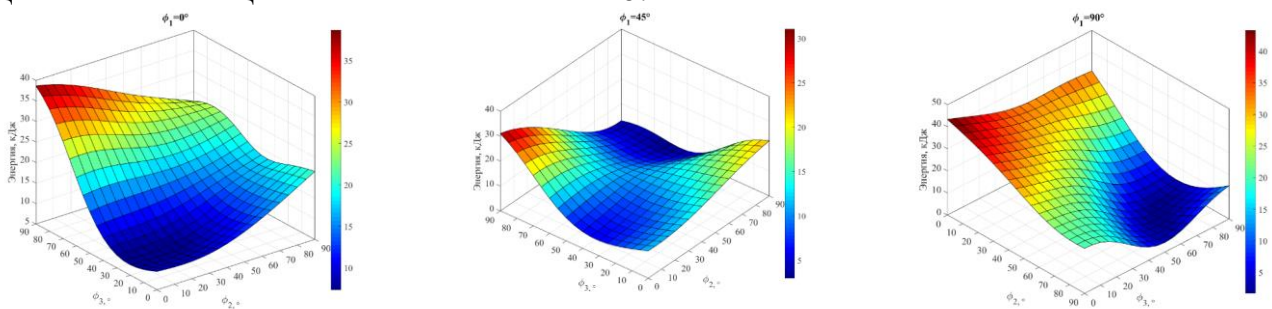


Рис. 20. Поверхности отклика

Отличаются не только абсолютные значения, но также и формы поверхностей отклика. Зависимости имеют локальные минимумы и максимумы.

На Рис. 21 показан полученный набор решений, а также точки, не удовлетворяющие ограничению.

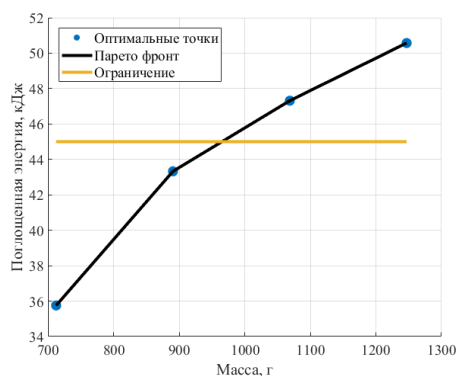


Рис. 21. Результаты оптимизации



Существуют два оптимальных решения, удовлетворяющих ограничению. Значения критериев оптимизации в этих точках, а также соответствующих им управляемых параметров оптимизации представлены в Таблице 2.

Результаты оптимизации

Таблица 2.

Параметр	$E_{\text{погл}}$ , кДж	$t$ , мм	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$
Решение 1	47,3	1,8	90°	0°	0°
Решение 2	50,6	2,1	0°	90°	22,5°

Окончательный выбор между недоминирующими решениями может быть произведен с помощью экспертного решения на основе дополнительных сведений о решаемой задаче. В данной работе предпочтительным принимается первое решение, так как оно обеспечивает снижение массы на 14%, при уменьшении величины поглощенной энергии только на 6,5% по сравнению со вторым.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработан метод расчета композитных энергопоглощающих элементов конструкции несущей системы автомобиля, позволяющий оценивать показатели пассивной безопасности автомобиля на стадии проектирования. Отличительной особенностью метода является применение математической модели, позволяющей моделировать процесс постепенного стабильного разрушения конструкции и оценивать величину энергопоглощения при ударном нагружении.

2. Проведены испытания образцов композитных энергопоглощающих элементов круглого сечения. Особенностью испытаний является использование ударного нагружения. Проведена верификация математической модели путем сравнения с результатами экспериментальных исследований. Величина отклонения от эксперимента при прогнозировании остаточной длины энергопоглотителя составила 3,4 %, а при определении средних ускорений составила 12 %, что позволяет судить о достаточно точной оценке энергопоглощения конструкции.

3. Сформулированы и обоснованы показатели для оценки эффективности композитных энергопоглощающих конструкций несущих систем автомобилей, которые могут быть применены для проведения сравнительного анализа. Обосновано применение показателя удельного энергопоглощения, то есть отношения поглощенной энергии к массе разрушившейся части.

4. Проведена сравнительная оценка эффективности энергопоглощения углепластиковых и стальных лонжеронов в передней части несущей системы. Описана форма сечения лонжерона с гофрированными стенками, обеспечивающего высокую эффективность энергопоглощения композиционного материала. Выявлено, что для углепластикового лонжерона гофрированная форма сечения оказывается на 15,4 % эффективнее, чем восьмигранная. Установлено, что удельное энергопоглощение углепластикового лонжерона составляет 48,8 кДж/кг. Масса углепластиковой конструкции в 2,3 раза меньше, чем у конструкции из высокопрочной стали при поглощении одинаковой энергии.

5. Проведено имитационное моделирование фронтального удара с частичным перекрытием передней энергопоглощающей конструкции как отдельно, так и в составе несущей системы автомобиля. Пиковое значение кратковременных ускорений в плоскости основания лонжеронов в процессе столкновения составляет 25,7 g. Длительность воздействия ускорений величиной более 25 g составляет 0,3 мс. В процессе стабильного замедления ускорения не превышают 19 g, что сравнимо со

показателями классических металлических конструкций. Таким образом подтверждена работоспособность композитной конструкции при фронтальном ударе.

6. Проведено моделирование фронтального удара с частичным перекрытием автомобиля с композитной энергопоглощающей конструкцией. Для оценки показателей пассивной безопасности использована конечно-элементная модель манекена Hybrid III. Значение критерия травмирования головы НИС составляет 248,5, что свидетельствует о низкой вероятности получения травмы.

7. Разработана методика оптимизации параметров композиционных материалов для изготовления энергопоглощающих конструкций несущих систем автомобилей, особенностью которой является применение созданной с помощью искусственной нейронной сети регрессионной модели энергопоглощения при разрушении для оценки композитной конструкции. Предложена постановка задачи многокритериальной оптимизации, в качестве управляемых параметров выбраны углы укладки ткани в слоях композиционного материала и количество слоев. Целевыми функциями являются снижение массы и увеличение поглощенной энергии, в качестве ограничения задана минимальная величина поглощаемой энергии.

8. В результате оптимизации установлено, что в оптимальной композитной энергопоглощающей конструкции гофрированной формы должны присутствовать как продольные слои материала, так и кольцевые. Кольцевыми должна являться одна треть слоев, остальные должны быть продольные или близкие к ним. В результате оптимизации параметров удельное энергопоглощение композитного лонжерона увеличено на 37% по сравнению с базовой конструкцией с углами укладки  $0^\circ$  и  $90^\circ$ .

#### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Арутюнян Г.А., Карташов А.Б. Оценка эффективности применения композиционных материалов для энергопоглощающих зон автомобильных несущих систем // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. №2 (695). С. 32-41. (0,58 п.л./0,52 п.л.);

2. Арутюнян Г.А., Карташов А.Б. Разработка математической модели разрушения углепластиковых энергопоглощающих элементов несущей системы автомобиля // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. №1 (694). С. 45-55. (0,64, п.л./0,58 п.л.);

3. Арутюнян Г.А., Карташов А.Б. Методика оптимизации композитных энергопоглощающих элементов несущих систем автомобилей // Журнал Автомобильных инженеров. 2018. №1 (108). С. 34-40. (0,81 п.л./0,73 п.л.);

4. Арутюнян Г.А., Карташов А.Б. Анализ истории развития и актуальности применения несущих систем из композиционных материалов // Журнал Автомобильных инженеров. 2015. №5 (94). С. 60-66. (0,81 п.л./0,73 п.л.);

5. Арутюнян Г.А., Карташов А.Б. Математическое моделирование процесса упруго-пластического деформирования трубчатых энергопоглощающих элементов // Инженерный журнал: наука и инновации. Эл № ФС77-53688. 2012. №10. С. 1-8. (0,46 п.л./0,39 п.л.). DOI: 10.18698/2308-6033-2012-10-406;

6. Арутюнян Г.А. Повышение пассивной безопасности автомобиля класса «Формула Студент» путем применения энергопоглощающих элементов: статья // Сборник трудов 3-го Всероссийского форума «Студенческие инженерные проекты». М.: МАДИ, 2015. С. 23-30. (0,46 п.л./0,46 п.л.).