

На правах рукописи

Гончаров Роман Борисович

**МЕТОДИКА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ КАБИН
ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НА БАЗЕ
ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИЙ ДЛЯ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ
УДАРЕ И МИНИМИЗАЦИИ МАССЫ**

Специальность: 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

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:

Зузов Валерий Николаевич,

доктор технических наук, профессор 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

Русанов Олег Александрович,

доктор технических наук, профессор кафедры «Наземные транспортные средства» Московского политехнического университета

Ведущая организация:

Государственный научный центр Российской Федерации Федеральное государственное унитарное предприятие «НАМИ»

Защита состоится «1» июля 2019 г. в 14:30 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 об автореферате 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.

Автореферат разослан «__» ____ 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

д.т.н., профессор



В.А. Горелов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Повышение требований по обеспечению пассивной безопасности людей в автомобиле являются важнейшей задачей для конструкторов, работающих в данной сфере. Увеличение количества автомобилей, скорости движения по городским улицам и на шоссе, рост грузоподъемности вновь разрабатываемых автомобилей ведет к необходимости создания кабин грузовых автомобилей, отвечающих требованиям пассивной безопасности при минимальной массе и достаточной жесткости и прочности.

Поскольку пассивная безопасность, в первую очередь, определяется ударно-прочностными свойствами кабины автомобиля, то это должно учитываться уже на самых ранних стадиях проектирования, когда невозможны натурные испытания. Таким образом, тема данной научной работы, посвященная разработке методики совершенствования конструкций кабин грузовых автомобилей на стадии проектирования с целью удовлетворения требований пассивной безопасности и минимизации массы, является актуальной.

Цель и задачи. Цель работы заключается в улучшении параметров конструкций кабин грузовых автомобилей и их элементов на стадии проектирования на базе топологической и параметрической оптимизаций для обеспечения требований международных и национальных правил пассивной безопасности и минимизации массы.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие основные задачи: 1). Анализ типовых конструкций кабин грузовых автомобилей с целью выявления конструктивных особенностей, влияющих на энергоемкость и поведение конструкции при аварийном нагружении; 2). Решение модельных задач для типовых элементов конструкции кабины грузовых автомобилей при ударном нагружении с целью отработки принципов построения рациональных конечно-элементных моделей применительно к оптимизационным задачам; 3). Разработка алгоритма многопараметрической оптимизации кабин, в том числе с наполнителем элементов каркасного типа, для достижения поставленной цели; 4). Разработка методики улучшения параметров конструкций кабин грузовых автомобилей и их элементов на стадии проектирования на базе топологической и параметрической оптимизаций для обеспечения требований международных и национальных правил пассивной безопасности и минимизации массы конструкции; 5). Проведение оптимизационных расчетов на базе метода конечно-элементов кабин грузовых автомобилей с различными особенностями конструкций с целью оценки эффективности методики.

Научная новизна работы заключается в разработке методики совершенствования конструкций кабин грузовых автомобилей на стадии проектирования с целью удовлетворения требований пассивной безопасности при минимизации массы конструкции, в которой:

1). Разработаны оригинальные рациональные конечно-элементные модели кабин и их элементов применительно к задачам оптимизации, отличающиеся определенными размерами и типами конечно-элементов и обеспечивающие получение требуемой точности результатов расчета при минимальных трудозатратах на подготовку и решение с помощью программных комплексов, реализующих метод конечно-элементов (ANSYS и LS-DYNA);

2). Определены оценочные параметры и их пороговые значения (удельная энергоемкость, коэффициент нагруженности, изменение площади поперечного сечения в зоне контакта, потеря несущей способности) для предварительной оценки эффективности использования существующих и вновь разрабатываемых материалов-наполнителей. Особенностью является возможность прогнозирования образования пластических шарниров с целью предотвращения потери несущей способности конструкции для обеспечения требований пассивной безопасности кабин грузовых автомобилей и минимизации массы конструкции;

3). Разработана методика повышения эффективности реализации алгоритмов параметрической оптимизации, особенностью которой является целенаправленное выделение подзон в конструкции кабины с последующим анализом их влияния на отклик конструкции с целью сокращения продолжительности решения задач оптимизации при обеспечении требуемой точности;

4). Разработана методика целенаправленного изменения конфигурации, жесткости и энергоемкости несущих элементов кабин, особенностью которой является обоснованное определение параметров усилителей (размеры, материал) и наполнителей на базе применения топологической и параметрической оптимизаций с целью удовлетворения требований пассивной безопасности и минимизации массы конструкции.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов подтверждена сопоставлением результатов с известными теоретическими положениями, а также сравнениями результатов расчетов с экспериментальными данными.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1). Разработанная методика может быть использована при проектировании и доводке кабин грузовых автомобилей для удовлетворения требований пассивной безопасности при минимизации массы конструкции;

2). Результаты теоретических исследований и рекомендации позволили дать предложения по изменению конструкции кабины грузового автомобиля КАМАЗ для повышения пассивной безопасности.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносится методика совершенствования конструкций кабин грузовых автомобилей на стадии проектирования с целью удовлетворения требований пассивной безопасности при минимизации массы конструкции.

Реализация результатов работы. Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке инженеров на кафедре колесных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана и в ПАО «КАМАЗ» при проектировании и изготовлении кабин автомобилей 6345 и 6355.

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

1). 103-й международной научно-технической конференции ААИ «Конструктивная безопасность АТС» / НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ». п. Автополигон (Московская область), 2018;

2). Научно-технических семинарах кафедры колесных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2015-2019;

3). Одиннадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». М., 2018.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 6 научных статей общим объемом 3,9 п.л., 5 из которых входят в журналы из перечня, рекомендованного ВАК РФ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключения по работе, списка литературы. Работа изложена на 161 листе машинного текста, содержит 87 рисунков, 25 таблиц. Список литературы содержит 109 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, заключающегося в разработке методики целенаправленного изменения конфигурации, жесткости и энергоемкости несущих элементов кабин, в том числе введением усилителей и наполнителей на базе обоснованного применения топологической и параметрической оптимизаций с целью удовлетворения требований пассивной безопасности и минимизации массы конструкции. Приведено краткое содержание выполненных исследований, сформулирована цель работы и отражены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор и анализ проблем, связанных с пассивной безопасностью кабин грузовых автомобилей, и вопросов, связанных с применением топологической и параметрической оптимизаций для решения задач ударного характера. Начиная со второй половины прошлого века, было проведено большое количество экспериментальных и теоретических исследовательских работ, посвященных проблеме пассивной безопасности. Из отечественных авторов можно выделить работы Рябчинского А.И., Фролова В.В., Дмитриченко С.С., Иванова В.Н., Лялина В.А., Орлова Л.Н., Зузова В.Н. и ряда других авторов. Из зарубежных авторов большой вклад в исследования пассивной безопасности внесли Вуд, Высоцкий М.С. и В. Абрамович, Н. Джонс, и др. Следует отметить научные школы МГТУ им. Н.Э. Баумана, НГТУ им Р.Е. Алексеева, КФТИ им. Е.К. Завойского, МГТУ «МАМИ» и др., в которых изучаются проблемы пассивной безопасности.

На основе проведенного обзора сделаны следующие выводы:

1). Проблема пассивной безопасности автомобиля остается одной из наиболее сложных и трудоемких задач, которую необходимо решать при проектировании новых транспортных средств. Поскольку пассивная безопасность в первую очередь определяется ударно-прочностными свойствами кабины автомобиля, то это должно учитываться уже на самых ранних стадиях проектирования, когда невозможны натурные испытания. 2). В настоящее время в основе расчетных методов оценки пассивной безопасности лежит МКЭ, позволяющий смоделировать и рассчитать любую пространственную конструкцию при практических видах воздействий, в том числе ударных. При этом не существует обоснованного метода выбора алгоритмов для решения задач топологической (НСА или ESL) и параметрической (метамодель или непосредственная оптимизация) оптимизаций, а также рационального размера и типа КЭ применительно к оптимизационным задачам (ударного характера и с большими перемещениями). 3). В настоящее время известны материалы (пеноалюминий), которые можно использовать в качестве наполнителя элементов каркасного типа и, в том

числе, кабин грузовых автомобилей для обеспечения требований пассивной безопасности. При этом до сих пор остаются проблемы, связанные с технологией изготовления и сборки таких конструкций и ценой. Остро стоит вопрос разработки новых технологичных материалов-наполнителей. Однако, для них не существует оценочных параметров, которые на предварительных и начальных этапах разработки позволили бы оценить целесообразность и эффективность их применения. 4). Разработка методики совершенствования конструкций кабин грузовых автомобилей на стадии проектирования с целью удовлетворения требований пассивной безопасности и минимальной массы является актуальной в связи с тем, что опубликованные подходы не раскрывают специфику получения картины рационального расположения усилителей, не дают представления об оптимальных механических свойствах материала-наполнителя и не обозначают пути решения поставленных проблем.

Цель второй главы заключается в выборе рациональных типов, размеров КЭ для корректного моделирования материала-наполнителя и задач оптимизации с точки зрения точности и времени, затрачиваемого на расчет; в подборе механических свойств материала-наполнителя для удовлетворения требований пассивной безопасности кабин грузовых автомобилей; в выборе наиболее эффективных алгоритмов параметрической и топологической оптимизаций.

В данной работе проводилось исследование на примере бампера автомобиля потому, что конструкция и НДС при центральном ударе схожи с НДС стойки кабины при ударе маятником по правилам VVFS 2003:29 и для бампера имеются экспериментальные данные. Для выбора рационального типа и размера КЭ ставилась задача топологической оптимизации конструкции бампера при ударе методом гибридных ячеек (HCA) в программе LS-TaSC. Масса ударника 25 кг, скорость 10 м/с. Основываясь на результатах исследования, рекомендуется использовать КЭ с размерами до 5 мм и типом solid constant stress (при этом погрешность решения по сравнению с экспериментом не превышает 3,5%). Интерпретация результатов позволяет получить окончательную конструкцию, масса которой до 29% меньше, чем у исходного варианта при сохранении аналогичных параметров жесткости и энергоемкости. На Рис. 1 показаны базовая модель бампера и модель бампера после окончательной доработки.



Рис. 1. Модели бампера: а) твердотельная модель; б) окончательная модель бампера после оптимизации

Для определения наиболее эффективного алгоритма, типа (для моделирования материала-наполнителя) и размера КЭ применительно к задачам параметрической оптимизации было проведено исследование бампера автомобиля при ударе. Рассматривалось два типа бамперов (Рис.1 и Рис. 3). Конструкция и поведение лонжерона бампера схожи с поведением лонжерона кабины при ударе, поэтому все исследования

проводятся на примере более простой модели. Начальная скорость ударника составляет 10 м/с, масса ударника 794 кг. В результате проведенных исследований получено, что наиболее эффективным является алгоритм, основанный на построении метамодели, включающий способ выбора опытов (space-filling), построение поверхности отклика (искусственная нейронная сеть RBF) и последующий поиск минимума на ее базе, схема алгоритма показана на Рис. 2.

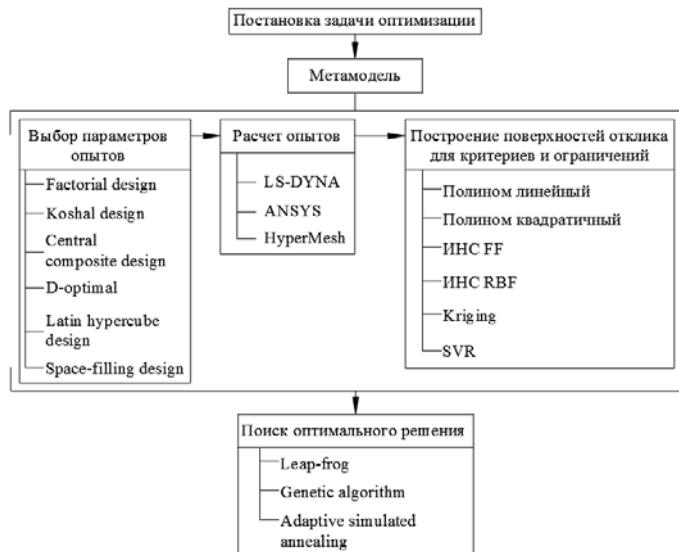


Рис. 2. Структурная схема алгоритма параметрической оптимизации

проектирования (в программе LS-OPT) уменьшение массы конструкции может доходить до 16%, по сравнению с исходной, при сохранении аналогичных параметров жесткости и энергоемкости. Результаты оптимизации элементов бампера сведены в Таблицу 1 и показаны на Рис. 3.

Таблица 1.

Результаты оптимизации для КЭМ высшего уровня

Толщина стенки, мм	Плотность пеноалюминия, кг/м ³	Перемещение ударника, мм	Масса, кг
3,2	-	415	10,3
1	258	415	9,8

В связи с технологическими ограничениями применения пеноалюминия в конструкциях кабин и с целью определения наиболее эффективных материалов для заполнения элементов каркасного типа были проведены численные и экспериментальные исследования на примере квазистатического трехточечного изгиба труб из алюминиевого сплава АМг6 с различными вариантами наполнителей. Образцы для проведения эксперимента и результаты показаны на Рис. 4.

Для предварительных расчетов энергопоглощающих элементов конструкции и материалов-наполнителей, на основе параметрической оптимизации, следует использовать КЭМ среднего уровня (размер элемента до 10 мм), для уточняющих расчетов следует использовать КЭМ высшего уровня (размер элемента до 5 мм); наиболее эффективный тип КЭ solid constant stress. В результате применения наполнителя в виде пеноалюминия в стойках бампера и последующей параметрической оптимизации параметров наполнителя и толщин стенок на стадии про-

ектирования (в программе LS-OPT) уменьшение массы конструкции может доходить до 16%, по сравнению с исходной, при сохранении аналогичных параметров жесткости и энергоемкости. Результаты оптимизации элементов бампера сведены в Таблицу 1 и показаны на Рис. 3.

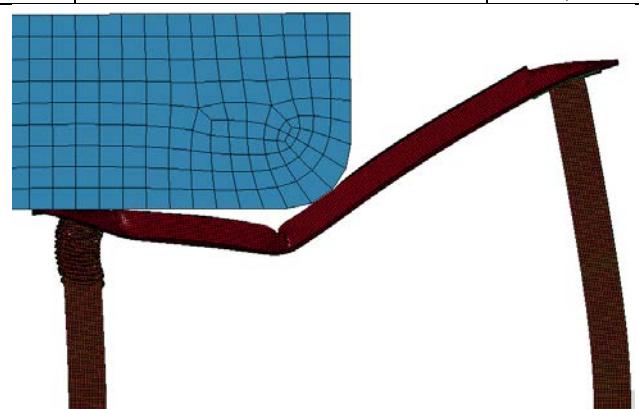


Рис. 3. Деформированное состояние оптимизированной конструкции бампера после ударного воздействия

Цель исследования заключается в выборе эффективных способов конечно-элементного моделирования поведения тонкостенных труб (типа каркасных элементов автомобилей) и наполнителей (из упругопластических, гиперупругих и хрупких материалов) при квазистатическом поперечном нагружении, экспериментальной верификации предлагаемых подходов и анализе применимости этих материалов для улучшения пассивной безопасности автомобилей. Как показало исследование, применение хрупких и гиперупругих материалов не дает значительного эффекта с точки зрения энергопоглощения, поэтому они не рекомендуются для решения вопросов, связанных с обеспечением пассивной безопасности автомобилей. Наилучшие показатели имеют упругопластические материалы, такие как пеноалюминий (коэффициент нагруженности возрастает в 364 раза, удельная энергоемкость в 22295 раз).



Рис. 4. Образцы для испытаний и результаты натурного эксперимента

Основываясь на проведенном анализе, были предложены оценочные параметры (удельная энергоемкость, коэффициент нагруженности, изменение площади поперечного сечения в зоне контакта, потеря несущей способности материала) и их пороговые

значения, которые сведены в Таблицу 2. Они необходимы для предварительной оценки эффективности использования существующих и вновь разрабатываемых материалов-наполнителей с целью обеспечения требований пассивной безопасности кабин грузовых автомобилей и минимизации массы конструкции.

Таблица 2.

Пороговые значения оценочных параметров

Удельная энергоемкость, Дж/кг	Коэффициент нагруженности	Изменение площади поперечного сечения в зоне контакта	Потеря несущей способности
>2500	>1,5	<1,25	Нет

В третьей главе решаются задачи, направленные на отработку подходов применения топологической и параметрической оптимизации для обеспечения пассивной безопасности на примере перспективной кабине грузового автомобиля.

Анализ НДС перспективной кабины (Рис. 5) на предварительном этапе при ударе маятником по передней стойке согласно национальным нормам VVFS 2003:29 (взяты как одни из наиболее «тяжелых») показал, что остаточное жизненное пространство внутри кабины не сохранилось. В конструкции возникли обширные пластические деформации, наблюдаются зоны смятия в местах соединения порогов с передней частью кабины. Следовательно, кабина требует доработки.

Основываясь на результатах исследования, приведенных во 2-ой Главе, была поставлена задача поиска оптимального распределения усилителей и наполнителя по каркасу кабины. Для этого используются КЭМ среднего уровня (размер конечного элемента 35 мм, размер элемента в местах концентрации напряжений 10-15 мм), позволяющая получить наилучшую картину распределения наполнителя по объему кабины при приемлемых затратах машинного времени.

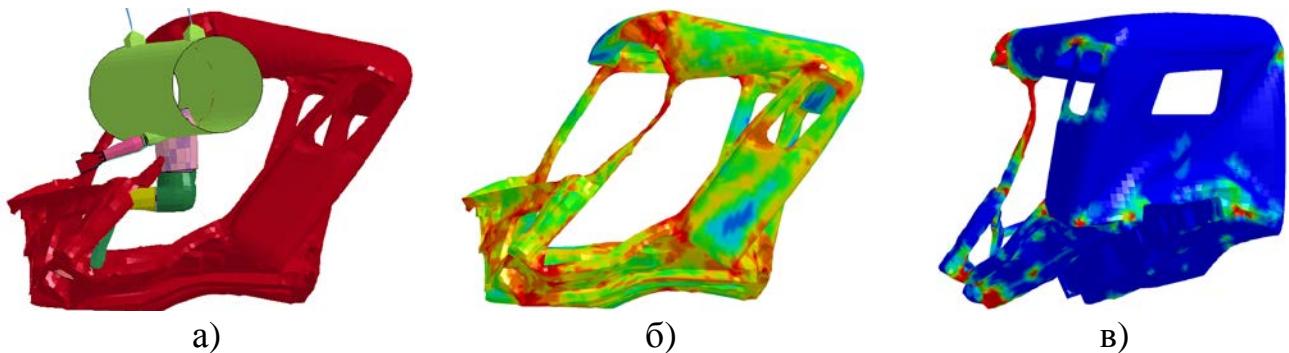


Рис. 5. Результаты расчета кабины: а) КЭМ в конечной фазе удара; б) напряжения по Мизесу; в) деформированное состояние кабины

Топологическая оптимизация проводится для трех наиболее тяжелых ударных режимов нагружения согласно международным и национальным нормам по пассивной безопасности (ЕЭК ООН №29 и VVFS 2003:29). Объект исследования – перспективная кабина и результаты топологической оптимизации показаны на Рис. 6.



Рис. 6. а) твердотельная модель кабины;
б) результаты топологической оптимизации

Основываясь на результатах топологической оптимизации и всестороннего анализа НДС кабины, было рассмотрено несколько вариантов рационального распределения наполнителя (пеноалюминия, как наиболее эффективного наполнителя) и накладок по конструкции кабины. Для получения решения задачи оптимизации кабина была разделена на несколько фрагментов (подзон), как показано на Рис. 7. Размеры и типы подзон (накладка или наполнитель) выбираются, исходя из конструктивных особенностей кабины и мест расположения пластических шарниров. Разбиение конструкции на подзоны необходимо для ограничения числа варьируемых параметров с целью получения решения задачи и минимизации затрат расчетного времени, но, при этом, их количество должно быть достаточным для адекватного описания оптимационной модели.

В качестве варьируемых параметров выступают плотность пеноалюминия ρ_i , которая изменяется в пределах от 100 кг/м³ до 800 кг/м³, и элементы каркасного типа с вариантами толщин t_j : 0,1; 1; 2; 3 и 4 мм. Определение на предварительном этапе влияния варьируемых параметров на отклик конструкции позволяет уменьшить количество параметров оптимизации, тем самым уменьшить время, затрачиваемое на расчет, что является актуальным при использовании стандартных ЭВМ.

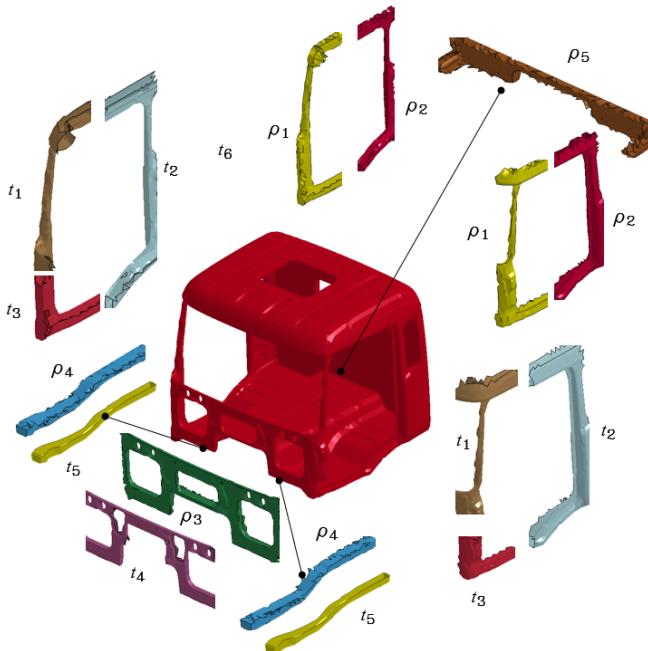


Рис. 7. КЭМ кабины, разбитая на подзоны

Использование предложенного комбинированного подхода (топологическая оптимизация для рационального распределения наполнителя и параметрическая оптимизация толщин накладок и параметров пеноалюминия) позволяет при минимальном увеличении массы (около 20%) добиться заданных свойств по пассивной безопасности конструкции кабины грузового автомобиля. Наилучшим решением является совместное использование накладок и наполнителя в виде пеноалюминия. Применение только накладок позволяет удовлетворить требованиям по пассивной безопасности, однако приводит к большей массе кабины (накладки из

обыкновенной стали увеличивают массу на 32%, из высокопрочной на 25%). Результаты оптимизации сведены в Таблицу 3. Время, необходимое на подготовку и решение задачи оптимизации, составляет 2-ое суток.

Таблица 3.

Сравнение четырех расчетных случаев

Вариант кабины	Перемещение КТ, мм	Масса кабины, кг	Изменение массы, %	Удовлетворения требованиям безопасности
Базовая кабина	850	250	-	Нет
С накладками из обычной стали	350	330	32	Да
С накладками из высокопрочной стали	350	312	25	Да
С наполнителем и накладками	349	306	22	Да

Помимо подхода, основанного на делении конструкции на подзоны, рассматривалась задача оптимизации параметров и свойств каждого КЭ в области проектирования (топометрическая оптимизация всей конструкции без деления). В итоге, решение задачи не было получено сразу из-за сверх большого количества варьируемых параметров и малых изменений целевой функции в процессе решения. Затраченное время на подготовку и решение задачи оптимизации заняло более 10-ти суток.

Особое внимание следует уделить ударным режимам нагружения по задней части кабины грузового автомобиля согласно нормам VVFS 2003:29. Результаты моделирования показали (Рис. 8), что жизненное пространство в кабине не сохранилось. В местах крепления стоек лобового стекла возникли обширные пластические деформации, задняя панель потеряла устойчивость и, как следствие, кабина сложилась в продольном направлении.

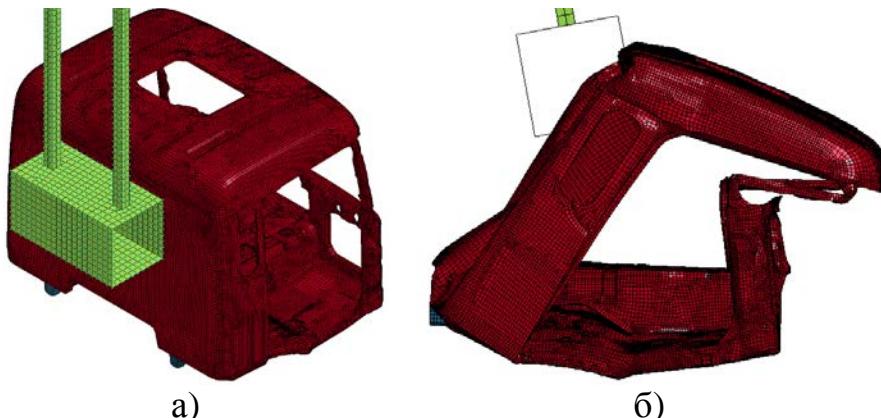


Рис. 8. КЭМ кабины: а) в момент удара маятником; б) после удара маятником

При исследовании поведения кабины при ударе сзади допустимо моделировать только ее заднюю часть с учетом того, что стойки и зоны вокруг дверных проемов были доведены на предшествующих этапах. Это позволяет сократить машинное время, затрачиваемое на проведение

топологической и параметрической оптимизаций, более чем в два раза, при этом отклонение результатов относительно модели полноценной кабины не превышает 8%. Интерпретация – важная задача обработки и представления результатов оптимизации в виде конструктивных решений для последующих расчетов, основанная на индивидуальном анализе напряжений и деформаций, возникающих в конструкции, и требующая от инженера особых знаний и опыта в разработке кабин грузовых автомобилей. Результат топологической оптимизации и его интерпретация представлены на Рис. 9.

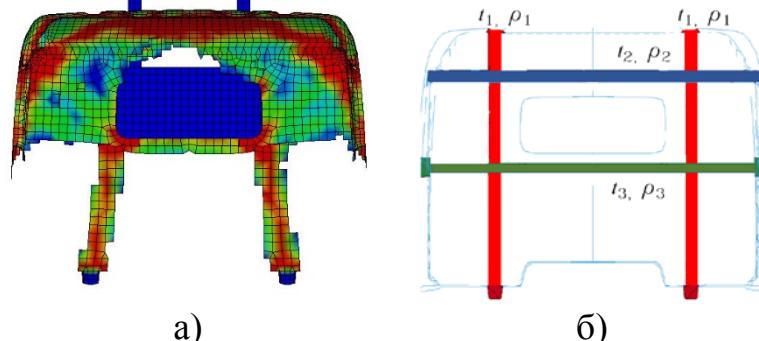


Рис. 9. Результаты: а) топологической оптимизации; б) интерпретации

Анализируя полученную картину распределения материала по задней панели, можно отметить, что вертикальные усилители позволяют передать ударную нагрузку к местам расположения элементов крепления конструкции к лонжеронам, а попечные перераспределяют нагрузку между боковыми панелями кабины.

С целью определения оптимальных значений толщин ребер и наполнителя была поставлена задача параметрической оптимизации, которая решалась в программе LS-OPT с использованием явного решателя LS-DYNA. В качестве варьируемых параметров выступают плотность наполнителя ρ_j (пеноалюминий) и толщины ребер t_i . Модель пеноматериала в программе LS-DYNA создана таким образом, что все механические свойства зависят от плотности материала. Результаты параметрической оптимизации сведены в Таблицу 4.

Таблица 4.

Результаты параметрической оптимизации

Варианты доработки кабины	t_1 , мм	t_2 , мм	t_3 , мм	ρ_1 , кг/м ³	ρ_2 , кг/м ³	ρ_3 , кг/м ³	Перемещение маятника, мм	Увеличение массы, кг
С помощью ребер	1	1	1	-	-	-	149	+18
С помощью наполнителя	1	1	1	100	100	100	146	+33

После доработки кабины грузового автомобиля путем целенаправленного введения накладок и усилителей удается добиться заданных свойств по пассивной безопасности при незначительном увеличении массы (6%).

Четвертая глава диссертации посвящена разработке методики совершенствования конструкций кабин грузовых автомобилей и их элементов на стадии проектирования на базе топологической и параметрической оптимизаций для обеспечения требований международных и национальных правил по пассивной безопасности и минимизации массы, и ее апробации.

Методику можно разбить на три основных блока. 1. Синтез кабины грузового автомобиля, составление национальных КЭМ, расчет на статические и динамические режимы нагружения. 2. Проведение виртуальных испытаний по международным и национальным правилам пассивной безопасности. Доводка конструкции кабины с использованием топологической и параметрической оптимизаций, направленная на уменьшение массы и на удовлетворение требованиям правил пассивной безопасности. Для этого выбираются механизмы доработки (усилители из обыкновенной или высокопрочной стали, использование материала-наполнителя), исходя из технологических и экономических возможностей предприятия-изготовителя. Определяются элементы конструкции с пониженной жесткостью и способы установки и крепления усилителей и наполнителя. Если кабина изначально удовлетворяет требованиям пассивной безопасности, то проводится оптимизация элементов конструкции кабины с целью минимизации массы. 3. Проверка полученной оптимизированной конструкции на базе высокоточной модели. Составление КЭМ кабины высшего уровня с учетом дверей, стекол и элементов крепления. Проверка соответствия остаточного жизненного пространства в кабине и ускорений в голове манекена.

Блок-схема методики показана на Рис. 11. Методика реализуется на примере серийной, широко распространенной кабины КАМАЗ, которая показана на Рис. 10.

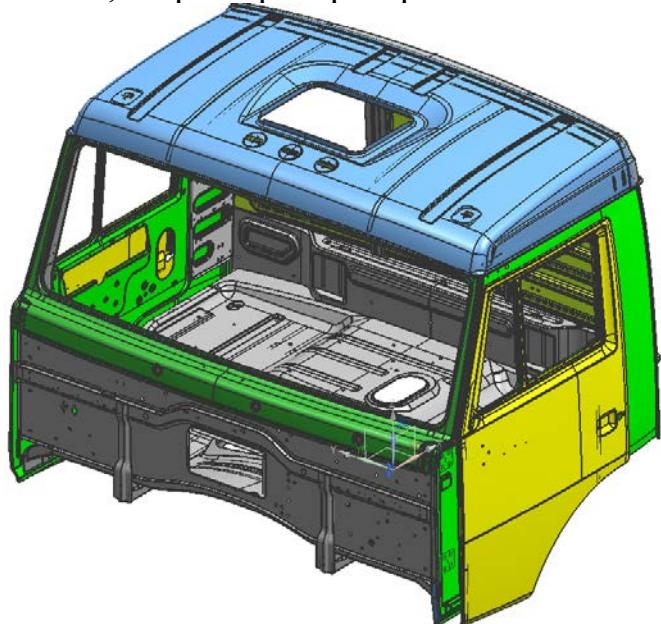


Рис. 10. Кабина КАМАЗ

Сильные деформации возникли в средней части лонжеронов, при ударе сзади панель не выдерживает силу удара и полностью сминается внутрь кабины. Масса базовой модели кабины без учета стекол и дверей составляет 225 кг.

Для проверки работоспособности кабины был проведен расчет для оценки соответствия требованиям правил пассивной безопасности VVFS 2003:29 и ЕЭК ООН №29 для ударных режимов нагружения. Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что остаточное жизненное пространство существенно меньше требуемых значений для всех рассмотренных режимов нагружения. В конструкции возникли обширные пластические деформации, дверной проем сильно деформировался, наблюдаются зоны смятия в местах соединения порогов с передней и задней частями кабины.

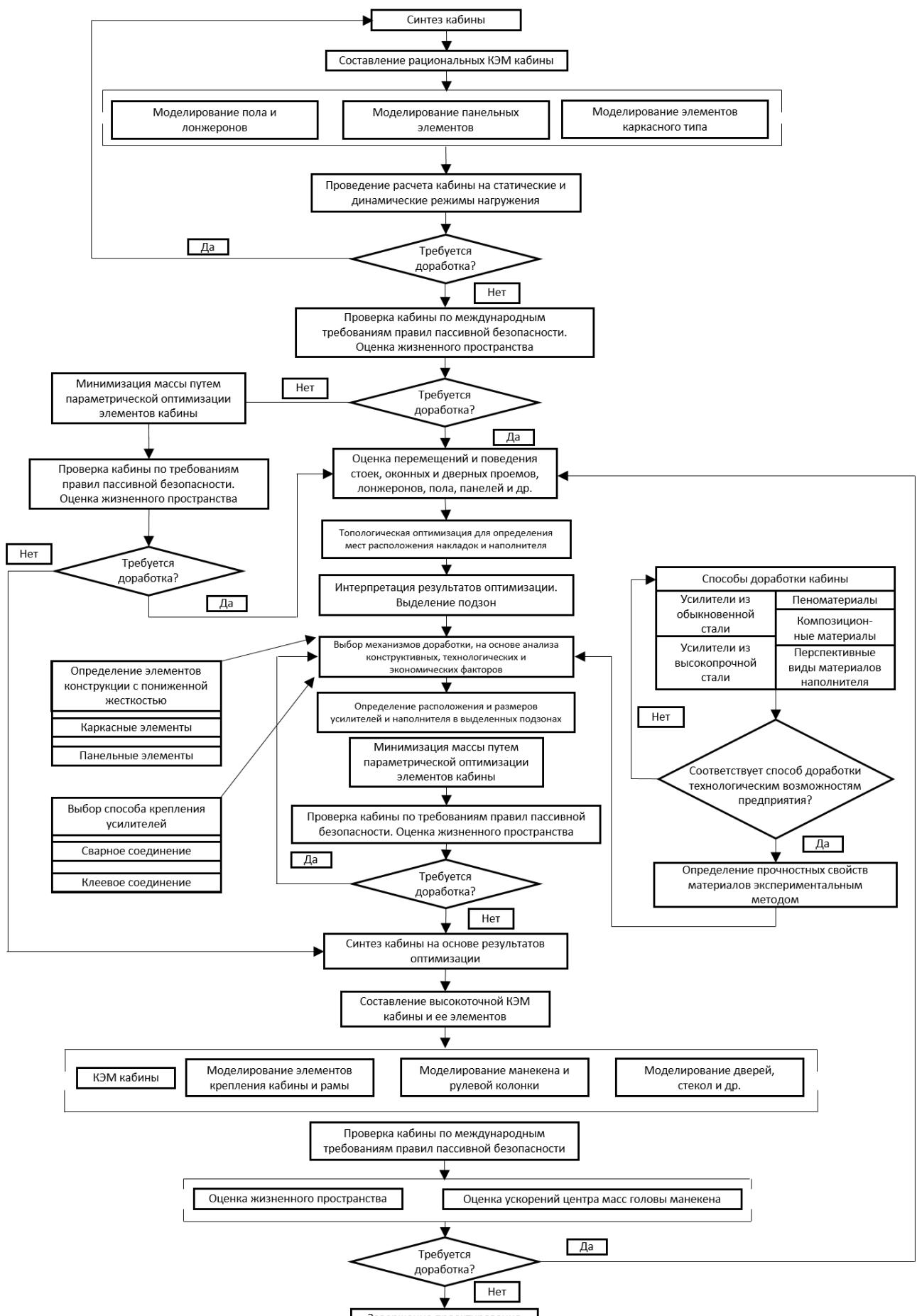


Рис. 11. Блок-схема методики

Основываясь на проведенном анализе, была поставлена задача доработать кабину с целью удовлетворения требований пассивной безопасности и минимизации массы. Исходя из технологических возможностей предприятия-изготовителя и требований заказчика, рассматриваемую кабину можно доработать несколькими способами. 1) Использование только усилителей в виде накладок (из обычной или высокопрочной стали). 2) Использование усилителей в виде накладок и наполнителя в элементах каркасного типа. В качестве наполнителя использовался пеноалюминий, как наиболее эффективный материал (Глава 2).

С целью оптимального распределения усилителей и наполнителя по каркасу кабины была проведена совместная топологическая оптимизация для рассматриваемых режимов нагружения. Цель оптимизации – обеспечение жизненного пространства в конструкции при минимальной массе. Оптимизация проводилась методом гибридных ячеек (HCA) в программе LS-TaSC (Глава 2). Результаты топологической оптимизации представлены на Рис. 12. Из них следует, что основными элементами, передающими нагрузку, являются пол, лонжероны и зоны вокруг дверных проемов и передней панели.

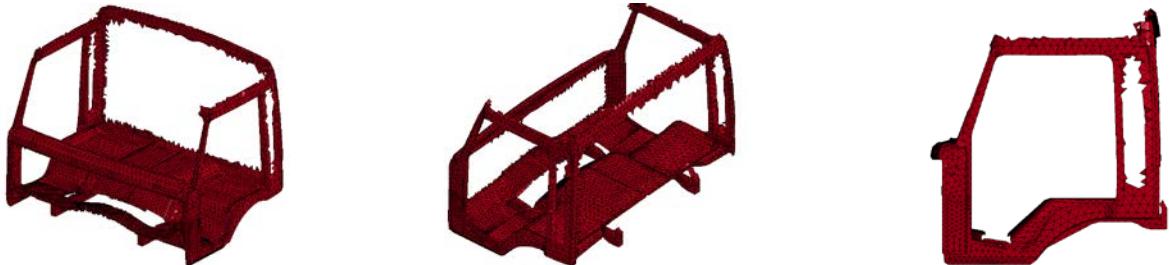


Рис. 12. Результаты топологической оптимизации кабины КАМАЗ

Основываясь на результатах топологической оптимизации и всестороннего анализа НДС кабины, было рассмотрено два варианта доработки: применение только накладок; использование накладок и наполнителя. Для решения поставленной задачи была сформулирована задача поиска оптимального решения для кабины на базе параметрической оптимизации. Кабина была разделена на подзоны, как показано на Рис. 13 (в соответствии с Главой 3). В качестве варьируемых параметров выступали плотность пеноалюминия ρ_i , которая изменяется в пределах от 100 кг/м³ до 800 кг/м³, и толщины накладок t_j : 0,1 мм; 1 мм; 2 мм; 3 мм; 4 мм.

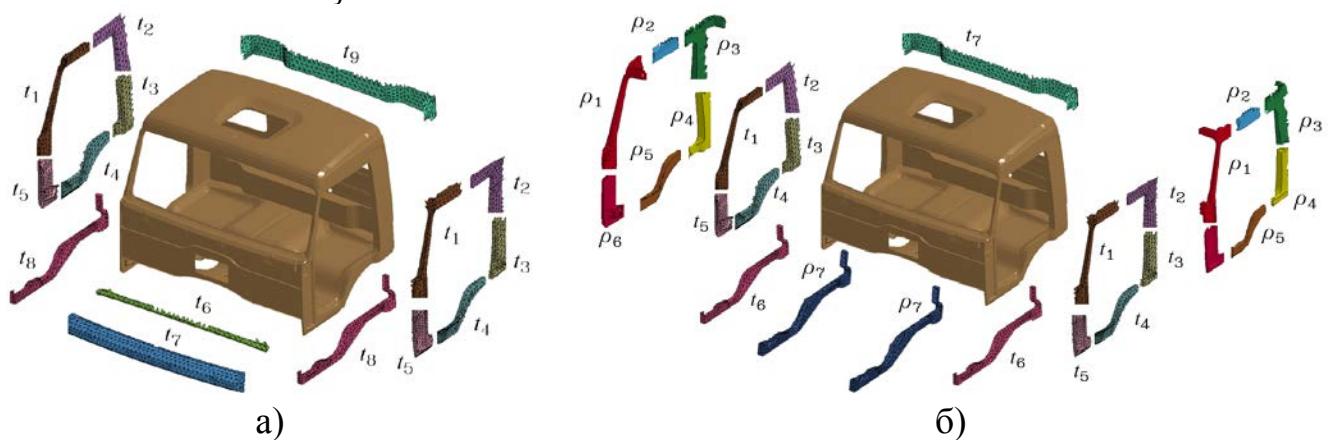


Рис. 13. Схема доработки кабины КАМАЗ: а) с помощью накладок; б) с помощью накладок и наполнителя

Анализ результатов параметрической оптимизации показал, что использование только накладок (из обычновенной и высокопрочной стали) не позволяет обеспечить требуемое жизненное пространство внутри кабины КАМАЗ при фронтальном ударе по передней части кабины. Следовательно, необходимо использовать наполнитель для увеличения жесткости и энергоемкости конструкции кабины. Итоги параметрической оптимизации в случае совместного применения накладок и наполнителя (пеноалюминий) сведены в Таблицу 5.

Таблица 5.

Результаты совместной оптимизации плотности пеноалюминия и толщин накладок

Пеноалюминий	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7
Плотность, кг/м ³	100	800	670	100	100	800	800
Наладка	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7
Толщина, мм	2	4	2	4	0,1	4	0,1
Масса, кг						303	

Для сохранения жизненного пространства при фронтальном ударе необходимо доработать конструкцию следующим способом: подзоны ρ_2 и ρ_6 объединить и заполнить пеноалюминием с плотностью 800 кг/м³, а подзону ρ_3 с плотностью 670 кг/м³, также зону t_2 необходимо усилить с помощью накладки толщиной 4 мм. Накладки в местах t_4 , t_5 , t_6 и t_7 не требуются. Помимо этого, необходимо увеличить толщину порогов и лонжеронов до 4 мм, лонжероны заполнить пеноалюминием с плотностью 800 кг/м³. В результате масса кабины возросла до 303 кг.

Далее была проведена доработка кабины при ударе сзади (в соответствии с Главой 3). Для получения картины оптимального расположения силовых элементов каркасного типа на задней панели кабины была проведена топологическая оптимизация при ударе маятником. Цель оптимизации – поиск оптимального расположения силовых элементов каркасного типа на задней панели, обеспечивающих требуемое жизненное пространство при ударе сзади и минимум массы конструкции. Результат топологической оптимизации и его интерпретация представлены на Рис. 14.



Рис. 14. Результаты: а) топологической оптимизации; б) интерпретации

Анализируя полученную картину распределения материала, можно отметить, что вертикальные стойки позволяют передать ударную нагрузку к местам расположения элементов крепления конструкции к лонжеронам, верхний поперечный элемент увеличивает изгибную жесткость задней панели. С целью определения оптимальных значений толщин профилей и плотности наполнителя была поставлена задача параметрической оптимизации. Результаты оптимизации сведены в Таблицу 6.

Таблица 6.

Результаты параметрической оптимизации

Доработка кабины	t_1 , мм	t_2 , мм	t_3 , мм	ρ_1 , кг/м ³	ρ_2 , кг/м ³	ρ_3 , кг/м ³	Перемещение, мм	Увеличение массы, кг
С помощью наполнителя	1	1	1	800	800	100	313	+5,6
С помощью профиля	3	3	3	-	-	-	349	+8,8

После оптимизации кабина была доработана для практического использования. Зоны с наполнителем ρ_4 , ρ_5 и элементы каркасного типа с толщиной 0,1 мм были удалены из конструкции, а элемент t_1 был заменен эквивалентной по жесткости накладкой толщиной 4 мм.

По итогам окончательной «доработки» кабина стала удовлетворять требованиям пассивной безопасности, однако масса кабины увеличилась на 37% до 308 кг по сравнению с базовой конструкцией. Результаты расчета оптимизированной модели кабины показаны на Рис. 15.

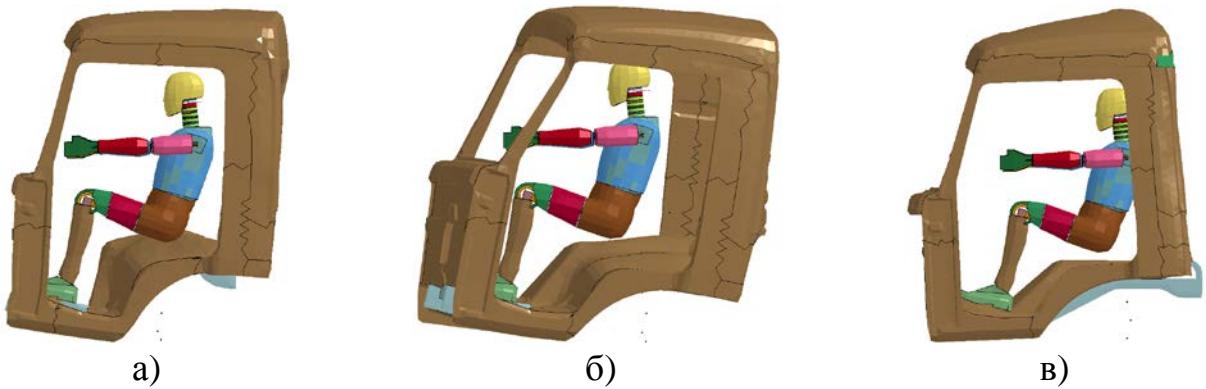


Рис. 15. Результаты испытаний кабины КАМАЗ: а) фронтальный удар; б) удар по стойке; в) удар сзади

С целью проверки принятых конструктивных решений была разработана высокоточная модель кабины (размер элемента 8-10 мм), в которой также смоделированы двери, стекла, манекен. Стекло моделируется как триплекс, состоящий из слоя стекла и подложки, двери моделируются четырех-узловыми shell элементами, манекен – Hybrid 3. Результаты проверки кабины КАМАЗ по ударным правилам пассивной безопасности показаны на Рис. 16.

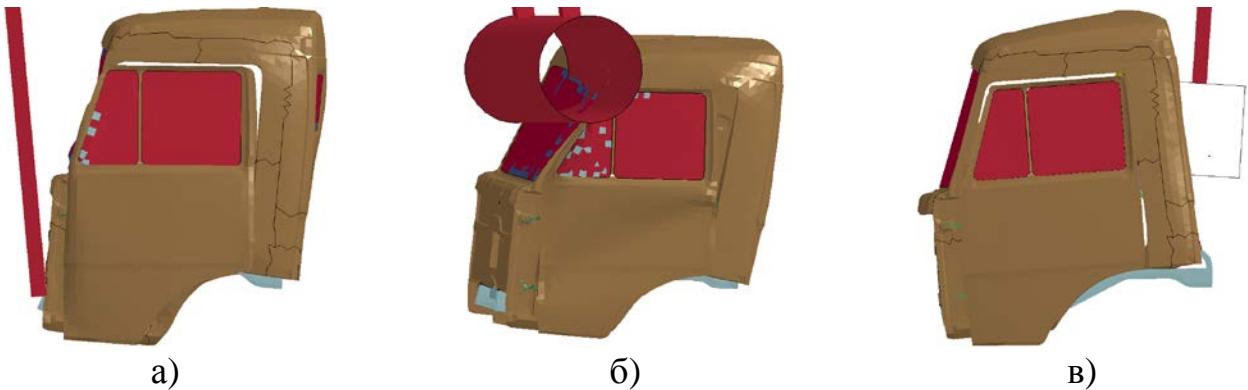


Рис. 16. Результаты испытаний кабины КАМАЗ: а) фронтальный удар; б) удар по стойке; в) удар сзади

Анализ результатов расчета высокоточной модели кабины показал, что кабина удовлетворяет требованиям пассивной безопасности для наиболее опасных ударных режимов нагружения, остаточное жизненное пространство сохранилось для всех режимов нагружения. Окончательная масса кабины с учетом дверей и стекол равна 342 кг. Учет стекол и дверей при расчете высокоточных моделей по правилам пассивной безопасности не приводит к значительным изменениям жесткости и энергоемкости кабины (изменение жесткости до 15%). Проверка ускорений, возникающих в голове манекена 10,2g, показала, что они не превышают пороговых значений (80g в течение 3 мс). Сравнение результатов расчета по перемещениям маятника показало, что погрешность моделей среднего уровня составляет 17% по сравнению с моделями высшего уровня.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана методика совершенствования конструкций кабин грузовых автомобилей и их элементов на стадии проектирования на базе топологической и параметрической оптимизаций для обеспечения требований международных (Правила ЕЭК ООН №29) и национальных правил (VVFS 2003:29 «Шведские нормы») по пассивной безопасности и минимизации массы;

2. Предложены рациональные конечно-элементные модели для эффективного поиска оптимальных решений, позволяющие получать результаты с приемлемой точностью при сокращении времени расчета. При этом рекомендуется использовать для решения задач топологической и параметрической оптимизаций кабин автомобилей КЭМ среднего уровня (базовый размер оболочечных и объемных элементов 30-35 мм, размер элементов в местах концентрации напряжений и в подзонах 10-15 мм); для уточняющих расчетов целесообразно использовать высокоточные модели высшего уровня (размер оболочечных и объемных элементов до 10 мм).

3. Разработан подход целенаправленного выделения подзон в конструкции кабины с последующим анализом их влияния на отклик конструкции, который позволяет сократить время на подготовку и решение (более, чем в 5 раз) задачи оптимизации с гарантированным получением результата по сравнению с оптимизацией конструкции в целом;

4. Предложен подход целенаправленного изменения конфигурации, жесткости и энергоемкости несущих элементов кабин, особенностью которого является обоснованное определение параметров усилителей (размеры, материал) и наполнителей на базе применения топологической и параметрической оптимизаций, позволяющий удовлетворить требованиям пассивной безопасности и минимизации массы (рациональное количество усилителей и наполнителей, необходимое для получения приемлемых результатов для рассмотренных кабин, составило 12-14 элементов);

5. Предложены оценочные параметры и их пороговые значения (удельная энергоемкость >2500 ; коэффициент нагруженности $>1,5$; изменение площади поперечного сечения в зоне контакта $<1,25$; потеря несущей способности), которые позволяют на предварительном этапе разработки конструкции подобрать типы материалов и их свойства для эффективного заполнения элементов кабин грузовых автомобилей каркасного типа;

6. Предложенные рекомендации на базе методики по изменению конструкции кабины грузового автомобиля КАМАЗ (комбинированное использование накладок и наполнителя) позволили удовлетворить требованиям пассивной безопасности при минимальном увеличении массы конструкции (масса увеличилась на 37%). Использование усилителей в виде накладок из обычновенной и высокопрочной стали не всегда позволяет добиться удовлетворения требованиям по пассивной безопасности для кабин грузовых автомобилей.

7. Использование на заключительном этапе высокоточных моделей позволяет уточнить НДС кабины в местах концентрации напряжений, учесть поведение стекол, дверей (увеличение жесткости до 15%) и других дополнительных элементов (погрешность результатов на базе моделей среднего уровня составила 17% по сравнению с результатами использования моделей высшего уровня).

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Топологическая оптимизация конструкции бампера автомобиля при ударном воздействии с позиций пассивной безопасности // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2018. № 2 (36). С. 2-9. (0,63 п.л./ 0,4 п.л.)

2. Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Проблемы поиска оптимальных конструктивных параметров бампера автомобиля при ударном воздействии с позиций пассивной безопасности // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2018. № 3 (122). С. 130–136. (0,5 п.л./ 0,35 п.л.)

3. Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Проблемы поиска оптимальных решений для обеспечения пассивной безопасности кабин грузовых автомобилей при минимальной массе // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2018. № 4 (38). С. 92-102. (0,75 п.л./ 0,53 п.л.)

4. Гончаров Р.Б. Исследование эффективности алгоритмов параметрической оптимизации применительно к процессам ударного воздействия на примере бампера и кабины автомобиля // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2019. №4 (709). С. 28-40. (0,75 п.л./ 0,58 п.л.)

5. Гончаров Р.Б., Зузов В.Н., Чайко Д.Н. Моделирование поведения тонкостенных труб с разными наполнителями при предельном нагружении применительно к решению проблем пассивной безопасности автомобилей // Инженерный журнал: наука и инновации. Эл № ФС77-53688. 2019. № 3(87) С. 1-14. (0,87 п.л./ 0,6 п.л.)

6. Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Проблемы поиска оптимальных конструктивных параметров кабины и свойств пеноалюминия для обеспечения пассивной безопасности кабин грузовых автомобилей // Будущее машиностроение России: Сборник докладов одиннадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием). Москва, 2018. С. 589-594. (0,38 п.л./ 0,2 п.л.)