

На правах рукописи



МИХАЛЁВА ДАРЬЯ СЕРГЕЕВНА

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ И СОПУТСТВУЮЩИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПОПУТНОГО СТОЛКНОВЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ
СРЕДСТВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ
ЭКСПЕРТИЗ**

Специальность 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орёл – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»

Научный руководитель: **Новиков Александр Николаевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Евтюков Станислав Сергеевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
заведующий кафедрой транспортных систем и дорожно-мостового строительства

Лазарев Дмитрий Александрович
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»,
доцент кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

Защита состоится «26» марта 2026г. в 11.00 на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.032.03 на базе ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» по адресу: г. Орёл, ул. Московская, д.77, ауд. 426.

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева» (<http://oreluniver.ru>) и в фундаментальной библиотеке по адресу: 302028, г. Орёл, пл. Каменская, д.1.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г. Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева» (<http://oreluniver.ru>) и на официальном сайте Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (<https://vak.gisnauka.ru/adverts-list/advert>).

*Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, в двух экземплярах просим направлять в диссертационный совет по адресу:
302030, г. Орёл, ул. Московская, д.77, тел. +79606476660,
email: srmostu@mail.ru.*

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент



Васильева В.В

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Причиной возникновения до 90% в общем ежегодном объеме дорожно-транспортных происшествий в РФ являются отклонения (нарушения), возникающие в подсистеме «Водитель» системы «Водитель – Автомобиль – Дорога – Среда» (ВАДС). При этом, наиболее распространенным отклонением (нарушением) в подсистеме «Водитель» системы ВАДС является неверный выбор скорости движения одним или несколькими участниками ДТП. Следует отметить, что превышение разрешенной скорости существенно усугубляет последствия ДТП, что делает необходимым регулирование скорости не только прямыми, но и косвенными мерами.

Государственные и коммерческие экспертные организации, занятые производством дорожно-транспортных экспертиз (ДТЭ) в РФ на настоящий момент часто используют методики расчета скорости движения ТС к моменту начала контактно-следового взаимодействия (КСВ), в большинстве своем разработанные и внедренные более чем 30-40 лет назад. Среди них нет современного научно-практического аппарата оценки рисков травмирования и более того, весь арсенал действующих (общепринятых) методик ДТЭ не имеет методического аппарата, учитывавшего бы специфические особенности исследования попутных задних столкновений и наездов.

Действующие методики расчета, основанные на законе сохранения движения в решении через моменты инерции или через работы сил, как правило, дают высокую погрешность особенно в случаях множественных попутных КСВ (попутное заднее столкновение трех и более ТС) и без учета затрат энергии на деформацию задней части приводят к занижению фактических значений расчетных скоростей ТС к моменту начала их КСВ или к моменту начала их торможения (перемещения со следообразованием).

В последние годы наблюдается рост числа исследований посвященных совершенствованию метода унифицированной трехсторонней жесткости (МУТЖ), что связано, с одной стороны, расширением применения метода в ДТЭ, а, с другой стороны, с наибольшей доступностью данного метода для применения в ДТЭ, по сравнению, например, с методом конечных элементов (МКЭ). Однако, в данных исследованиях не содержится допустимого и достаточного объема данных для МУТЖ по жесткости задней части кузова ТС, пригодный для проведения расчетов с погрешностью не более 5%. При этом при применении МУТЖ, как при расчете по табличным данным, так и при расчете по данным натурных краш-тестов, возникает ряд не устраненных ранее проблем, а именно: имеющиеся сводные значения коэффициентов жесткости по таблицам не обновлялись с 2010 года, а имеющийся объем натурных тестов часто не покрывает объем и номенклатуру марок и моделей ТС, эксплуатируемых в РФ в настоящее время.

Таким образом, в сложившейся практике производства ДТЭ, в настоящее время, при реконструкции попутных контактно-следовых взаимодействий (КСВ) фактически отсутствует научно-обоснованная методика учета затрат энергии на

деформацию задней части автомобилей категории М1, а также отсутствует возможность обоснованно формулировать выводы по ДТП с попутным столкновением трех и более ТС, особенно в условиях недостаточного объема и низкого качества фиксации пространственно-следовой информации (ПСИ) с места ДТП.

В свою очередь, использование индексов травмирования становится одним из наиболее современных инструментов при применении модельно-ориентированного подхода в реализации процедур ДТЭ направленных на оценку причинно-следственных связей между действиями водителя (в частности по выбору скорости движения ТС до ДТП) и наступившими последствиями (объемом полученных травм водителями или пассажирами).

Совершенствование методов реконструкции ДТП при попутных задних контактах ТС относится к актуальной проблемной области. Это обусловлено тем, что оно способствует повышению достоверности и категоричности экспертного исследования при реконструкции механизма таких ДТП, а также влияет на эффективность ДТЭ и мероприятий, выполняемых в рамках экспертной профилактики ДТП и повышения пассивной безопасности конструкций ТС категории М1.

Степень разработанности проблемы. Исследованиям связанным с расчетом скорости через затраты энергии на объемные деформации в РФ занимались такие ученые как: Боровский Б.Е., Суворов Ю.М., Евтюков С.А., Васильев Я.В., Голов Е.В., Никонов В.М., Кристи Н.М. Так же имеется обширные исследования, посвященные роли ДТЭ в ОБДД, среди которых следует выделить такие ученых как: Кравченко П.А., Евтюков С.С., Жанказиев С.В., Клявин В.Э., Лукошявичене О.В., Новиков А.Н., Новиков И.А., Сильянов В.В., Терентьев А.В. Среди зарубежных ученых исследования в области как МУТЖ, так и методологии расчета скорости движения ТС до ДТП занимались: Дж. Сирл, Д.Вуд, Д.Ванги, Н. Карпентер и др. Однако, несмотря на значимые результаты практического внедрения результатов исследований вышеуказанных и многих других отечественных и зарубежных ученых, их исследования в большинстве своем были сконцентрированы на фронтальной и боковой жесткости ТС, а также на расчетах скорости движения и прогнозировании травмирования при фронтальных и боковых столкновениях. Таким образом, в настоящее время требуется совершенствование и разработка новых решений в исследуемой области.

Цель исследования: совершенствование методов дорожно-транспортной экспертизы по анализу задних попутных объемно-проникающих контактно-следовых взаимодействий ТС путем выявления новых зависимостей изменения энергии деформации при различных условиях столкновения ТС.

Для достижения этой цели были поставлены следующие **задачи исследования:**

1. Провести оценку качества и степени полноты исследований, выполненных в рамках (ДТЭ) по случаям попутных задних столкновений транспортных средств (ТС), что предполагает формирование интегрированного

набора сценариев попутного сближения ТС и определение структуры факторного пространства, определяющего механику (КСВ) при задних столкновениях.

2. Установить зависимости между изменением осевых замедлений в центре масс ТС и вариациями индексов травмирования манекенов водителя и пассажира на основе комплексного анализа результатов натурных краш-тестов, моделирующих задние попутные объемно-проникающие контактно-следовые взаимодействия ТС.

3. Уточнить методику определения потерь скорости, связанных с объемными деформациями, в рамках модели трехсторонней унифицированной жесткости, выявив зависимости коэффициентов жесткости от степени перекрытия (площади зоны контакта) и угла столкновения.

4. Определить закономерности изменения величин работы сил деформации, энергии деформирования и скорости движения ТС до момента столкновения с учетом условий его возникновения.

5. Разработать усовершенствованную методику расчета скорости движения ТС при проведении ДТЭ задних попутных столкновений, а также оценить эффективность ее применения в процедурах модельно-ориентированной реконструкции механизма ДТП, с последующей разработкой решений по оптимизации траекторий перемещения исследуемых объектов в ДТЭ на основе генетического алгоритма.

Объект исследования: транспортные средства категории М1 в процессе задних попутных объемно-проникающих контактно-следовых взаимодействий.

Предмет исследования: причинно-следственные связи между механизмом задних попутных объемно-проникающих контактно-следовых взаимодействий ТС, значениями индексов травмирования водителя и пассажиров, фактической скоростью движения ТС в момент начала контакта и энергий деформаций.

Рабочая гипотеза: выявление новых зависимостей изменения энергии деформации при различных условиях задних попутных объемно-проникающих контактно-следовых взаимодействий ТС позволит повысить качество, полноту и категоричность дорожно-транспортных экспертиз по таким видам столкновений ТС, что также окажет влияние на развитие аппарата оценки травмирования водителя и пассажиров при задних попутных ДТП.

Научная новизна исследования:

1. Впервые на основе ретроспективного анализа большого массива реальных ДТЭ (3385 исследований) систематизированы и количественно оценены ключевые проблемы экспертной практики при реконструкции задних попутных столкновений, а именно: широкое использование устаревших коэффициентов жесткости, приводящее к значительным погрешностям в расчетах скорости, и как следствие — высокая доля некатегоричных выводов;

2. Установлены новые количественные зависимости между осевыми замедлениями в центре масс ТС и индексами травмирования (НІС, Nij, AIS) для водителя и пассажира, полученные путем комплексного анализа данных

натурных краш-тестов и численного моделирования с кластеризацией ТС по массогабаритным характеристикам. Полученные регрессионные модели обладают высоким коэффициентом детерминации ($R^2 \geq 0.93$) и позволяют напрямую оценивать тяжесть последствий ДТП;

3. Предложено уточнение методики МУТЖ для расчета затрат скорости на объемные деформации, заключающееся в учете влияния угла столкновения и площади контактной зоны на коэффициенты жесткости, а также во введении кластерного подхода к классификации ТС. Впервые определены и апробированы уточняющие коэффициенты (k и k_1), позволяющие повысить точность расчета скорости перед ударом до 27% по сравнению с действующими методами;

4. Выявлены и формализованы новые закономерности изменения работы сил на деформации и энергии деформации от условий столкновения (угла, площади контакта, начальной скорости) для различных кластеров ТС. Разработан соответствующий математический аппарат и программная реализация в средах Matlab/Simulink и Python, позволяющие строить профили жесткости и поверхности отклика для конкретных условий ДТП.

5. Предложена новый комплексный методический подход к реконструкции ДТП, который интегрирует усовершенствованную модель расчета деформаций с процедурой оптимизации траекторий движения ТС на основе генетического алгоритма. Доказана практическая эффективность подхода, обеспечивающего повышение категоричности выводов ДТЭ до 63% за счет минимизации неопределенности при определении места столкновения и параметров движения.

Теоретическая значимость работы заключается выявлении комплекса зависимостей изменения энергии деформаций, индексов травмирования от условий наступления столкновения при реконструкции механизма задних попутных объемно-проникающих контактно-следовых взаимодействий ТС, путем реализации новых расчетно-аналитических методов, программного и информационного их обеспечения.

Практическая значимость работы заключается в прикладном характере результатов исследования, которые могут быть использованы экспертным сообществом в интересах повышения категоричности и объективности результатов выполнения ДТЭ, органами региональной исполнительной власти и федеральными государственными структурами в интересах повышения БДД на автомобильных дорогах общего пользования при реализации мероприятий по профилактике ДТП.

Методология и методы исследования базируется на анализе статистических данных по ДТП с задними попутными объемно-проникающими контактно-следовыми взаимодействиями ТС, методах и результатах ДТЭ использованных при анализе таких ДТП в РФ и за рубежом, рассмотрении и критической оценке научных трудов и публикаций по ним отечественных и иностранных специалистов, посвященных ДТЭ, использовании общепризнанных научных методов исследования: анализа и обработки данных методами математической статистики и методов системного анализа, теории

моделирования, регрессионного анализа, методов оптимизации, прогнозирования и экспериментальных исследований.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты оценки исследований по ДТЭ задних попутных столкновений, включающие набор типовых сценариев сближения транспортных средств и описание системы факторов, влияющих на механизм контактно-следового взаимодействия.

2. Установленные на основе анализа натурных краш-тестов связи между динамикой осевых замедлений автомобиля и уровнями травмоопасности для водителя и пассажира при задних объемно-проникающих столкновениях.

3. Усовершенствованный метод определения потерь скорости на деформации, основанный на трехсторонней жесткости и учитывающий влияние площади контакта и угла столкновения на коэффициенты жесткости.

4. Выявленные закономерности изменения работы сил деформации, энергии деформации и скорости ТС до момента удара в зависимости от условий, при которых произошло столкновение.

5. Разработанный и апробированный метод расчета скорости ТС для ДТЭ при задних столкновениях, интегрированный в процедуру модельно-ориентированного восстановления механизма ДТП, а также алгоритм оптимизации траекторий движения объектов в испытаниях с использованием генетического алгоритма.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационного исследования обеспечена: аналитическим обоснованием цели и связанных с ней задач исследования, в результате оценки ДТЭ, выполненных в СЗФО; применением апробированных и общеизвестных методов их решения; полученными результатами оценки эффективности предложенных методик в составе модельно-ориентированной реконструкции ДТП; публикациями и обсуждением на Российских и международных конференциях; Актами внедрения.

Информационная база исследования. Нормативно-техническая документация, законодательные и правовые акты, базы данных по натурным краш-тестам, банки данных по EDR/CDR представленным в общем доступе NHTSA, статистические материалы и базы данных федеральных и региональных органов власти, государственных ведомств и других структур, научные труды и методические издания, применяемые в отечественных и зарубежных научно-исследовательских организациях, в сфере анализа и реконструкции ДТП, в которых имели место попутные объемно-проникающие контактно-следовые взаимодействия.

Личный вклад автора. Автором сформулированы цель и задачи работы, в соответствии с ними выполнены теоретические и экспериментальные исследования, на основе результатов которых разработан математический и методический аппарат, использующий модельно-ориентированный подход к расчету скорости движения ТС при их попутных объемно-проникающих контактно-следовых взаимодействиях.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности 2.9.5 «Эксплуатация автомобильного транспорта»: п.6 Обеспечение экологической и дорожной безопасности автотранспортного комплекса; совершенствование методов автодорожной и экологической экспертизы, методов экологического мониторинга автотранспортных потоков; п.9 Исследования в области безопасности движения с учетом технического состояния автомобиля, дорожной сети, организации движения автомобилей, качеств водителей; проведение дорожно-транспортной экспертизы, разработка мероприятий по снижению аварийности.

Публикации. Основные положения диссертации изложены в 10 работах общим объемом – 11,81 п.л. (авторских – 3,49 п.л.), в том числе 6 - в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ, издана 1 монография получено 1 свидетельство на программное обеспечение ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения. Содержит 198 страниц, 58 иллюстраций, 35 таблиц, 3 приложения на 60 страниц, список литературы из 74 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность представленной темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи, определены объект и предмет исследования. Раскрыты научная новизна, практическая ценность и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «**Анализ состояния системы обеспечения БДД и эффективности ДТЭ**» представлен анализ состояния общего в целом состояния безопасности дорожного движения в России, а также отдельно по Санкт-Петербургу и Ленинградской области.

С целью выявления взаимосвязи между категоричностью полученных выводов по результатам ДТЭ, объемом исходной ПСИ и методами решения, использованными в ДТЭ, а также для определения характера динамики сужения вариативности выводов при использовании различных методов оптимизации применяемых численных методов и причин, обуславливающие это явление, т.е. фактически определения эффективности методов анализа и оптимизации решений, используемых в ДТЭ, методами математической статистики были исследованы 3385 ДТЭ (за период с 2013 по 2023 годы), выполнявшихся в рамках гражданского, административного и уголовного производства в государственных экспертных организациях Северо-Западного региона РФ (в анализ были включены только комплексные исследования).

Выполненный анализ ДТЭ по попутным задним КСВ (столкновениям движущихся попутно ТС и наездам на стоящее ТС или группу ТС) позволил выявить следующие проблемы:

- в 78% исследований эксперты указывали на невозможность установления скорости движения в момент начала КСВ по причине отсутствия научно-обоснованной методики расчета затрат энергии на деформацию;

– в 87% ДТЭ, где для расчета применялся метод трехсторонней унифицированной жесткости (алгоритм Crash3) использовались коэффициенты жесткости, полученные на ТС до 2009 года выпуска, при этом эксперты указывали на погрешность расчета скорости не менее чем в ± 10 км/ч, что в 45% таких ДТЭ приводило к отсутствию категоричного вывода о наличии/отсутствии у водителя ТВ избежать ДТП;

– в 53% ДТЭ эксперты также не дали категоричный вывод по месту начала КСВ, также обосновывая отказ от исследования отсутствием научно-обоснованной методики;

– среди рассмотренной выборки ДТЭ по попутным задним КСВ также следует отметить, что в 91% ДТЭ по таким ДТП экспертами не проводилась оценка влияния фактической скорости на травмирование водителя и/или пассажиров относительно случая движения ТС с максимально допустимой по ПДД скоростью движения до ДТП.

На рисунке 1 показано, как в течение рассматриваемого периода возрастал объем применения расчета скорости по затратам энергии и по видео. Однако всеобщего применения он так и не нашел, в силу указанных ранее причин. При этом в таблице 1 показано, что метод унифицированной трехсторонней жесткости все еще остается малоиспользуемым экспертами при ДТЭ.

Указанные явления свойственны не только рассмотренному региону, а в целом сложившейся практике производства ДТЭ в РФ. Это практика формирует прецедент изоляции ДТЭ от экспертной профилактики ДТП, существенно сдерживая развитие ее методов, так как не выявление истинных причин реальных событий исключает разработку мер по их предотвращению.

Применение устаревших значений коэффициентов жесткости вскрывает целый ряд проблемных областей в ДТЭ:

а) несоответствие расчетных значений, обусловленное существенным изменением конструкционных (эксплуатационных) требований ТС, приводит к тому, что имеющиеся табличные значения не могут быть применены для ТС, выпущенных после 2009 года;

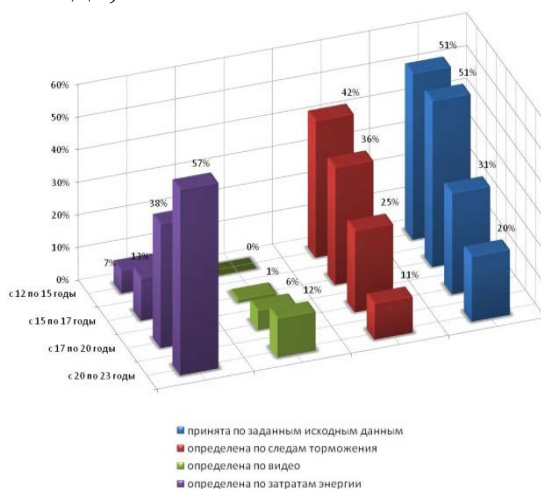


Рисунок 1 - Изменение применяемых методов ДТЭ при определении скорости ТС в исследовании по годам

б) существенная погрешность расчета, особенно в случаях КСВ с неполным перекрытием или под углом более 20°;

в) при расчете значений коэффициентов А и В, значения пороговой скорости для задних ударов избирается только по результатам краш-тестов, которые будучи индивидуальными для каждой марки и модели (модельного ряда) не могут быть применены на те, ТС которые (например есть тест на ТС в модельного ряда, но в кузове седан, а в ДТП участвовал кузов универсал) в тестах не исследовались.

Таблица 1 - Изменение применения метода унифицированной трехсторонней жесткости по годам

Период в годах	Расчет скорости без учета деформаций	Расчет скорости с учетом деформаций	
		из них по данным краш-теста	из них по унифицированным коэф. жесткости
С 12 по 15 год	98%	2%	
		1%	99%
с 15 по 17 год	78%	22%	
		40%	60%
с 17 по 20 год	72%	28%	
		41%	59%
с 20 по 23 год	68%	32%	
		43%	57%

Учитывая вышеизложенное, следует сделать следующие выводы и выделить некоторые особенности реальной практики производства экспертизы ДТП в РФ, свойственные сложившейся методологии в экспертизе ДТП: в связи с тем, что алгоритм Crash3 (метод унифицированной трехсторонней жесткости) так и не принят официально для органов ЛСЭ МЮ и ЭКЦ МВД, его применение на практике сильно ограничено; низкое качество сбора ПСИ в целом, характерное для использования ручного метода сбора ПСИ, например, приводит к вынужденному положению, в котором при производстве ДТЭ отсутствие возможности определить место контакта вносит ограничения в исследование и в некоторых случаях делает невозможным определение скорости движения ТС. Следовательно, при отсутствии решений в вышеуказанных подобластях, решение в части определения причинной связи между скоростью ТС и ДТП, наличием у водителя технической возможности избежать ДТП и т.д., также становятся невозможными. Выводы ДТЭ в этом случае чаще всего бывают неконкретными (не категоричными), основанными на субъективных исходных данных, которые не могут быть проверены.

Во второй главе «Теоретические основы расчета скорости движения ТС» выполнен расчет скорости ТС при различных видах столкновения, на основании закона сохранения количества движения, с учетом коэффициента восстановления, представлен в таблице 2.

Таблица 2- Скорости ТС при различных видах столкновения

№	Качественная хар-ка столкновения	Запись закона сохранения количества движения	Коэффициент восстановления	Скорость ТС в соответствующих фазах
1	2	3	4	5
1	Попутное столкновение ТС, в результате которого они движутся в первоначальном направлении	$m_1 V'_{1n} + m_2 V'_{2n} = m_1 V_{1n} + m_2 V_{2n}$	$\varepsilon = \frac{-V'_{2n} - V'_{1n}}{V_{1n} - V_{2n}}$	$V_{2n} = \frac{-V_{2n} \left(m_2 - \frac{m_1}{\varepsilon} \right) + V_{1n} m_1 \left(1 + \frac{1}{\varepsilon} \right)}{m_1 + m_2}$ $V_{1n} = V_{2n} - \frac{V'_{2n}}{\varepsilon} - \frac{V'_{1n}}{\varepsilon}$ $V'_{2n} = -V'_{1n} + \varepsilon V_{1n} - V_{2n} \varepsilon$ $V_{2n} = \frac{\left(1 + \frac{m_1}{m_2} \right) V_{1n} + \left(\varepsilon - \frac{m_1}{m_2} \right) V_{1n}}{1 + \varepsilon}$
2	Попутное столкновение ТС, в результате которого одно из них разворачивается на 180 градусов и движется в обратном направлении	$-m_1 V'_{1n} + m_2 V'_{2n} = m_1 V_{1n} + m_2 V_{2n}$	$\varepsilon = \frac{V'_{2n} + V'_{1n}}{V_{1n} - V_{2n}}$	$V_{1n} = V_{2n} + \frac{V'_{2n}}{\varepsilon} + \frac{V'_{1n}}{\varepsilon}$ $V_{2n} = \frac{V'_{2n} \left(m_2 - \frac{m_1}{\varepsilon} \right) - V_{1n} m_1 \left(1 + \frac{1}{\varepsilon} \right)}{m_1 + m_2}$ $V'_{2n} = \frac{-(1 + \frac{m_1}{m_2}) V'_{1n} + \left(\varepsilon - \frac{m_1}{m_2} \right) V_{1n}}{1 + \varepsilon}$ $V'_{1n} = -V_{2n} + \varepsilon V_{1n} - V_{2n} \varepsilon$

Настоящая методика, основана на алгоритме Crash 3 (МУТЖ) и предназначена для определения доли затрат кинетической энергии (ΔE) на развитие деформаций и эквивалентную данным затратам скорость при технической реконструкции удара в следующих специализированных программных продуктах: VistaCrash, PCCrash, BigSumsPro, Damage, ARpro и других, использующих расчет аналогичный следующей зависимости для определения затраченной на развитие деформаций энергии (формула приводится на примере 2-х характерных точек зоны локализации деформаций):

$$\Delta E = (1 + \operatorname{tg} \delta^2) \cdot L_d \cdot \left[\frac{m_A \cdot k_0 \cdot k_1}{2 \cdot g \cdot L_d} \cdot (C_1 + C_2) + \frac{m_A \cdot k_1^2}{6 \cdot g \cdot L_d} \cdot (C_1 + C_1^2 + C_2 + C_2^2) + \frac{3 \cdot m_A \cdot k_0^2}{4 \cdot g \cdot L_d} \right] \quad (1),$$

где, δ – угол столкновения транспортных средств, град;

L_d – ширина зоны локализации деформаций, м;

m_A – масса транспортного средства, кг;

g – ускорение свободного падения, $g \approx 9,81 \text{ м/с}^2$;

k_0 – коэффициент жесткости (квадратичная постоянная), определяется по результатам краш-тестов или по таблицам 4.5 - 4.8;

k_1 – коэффициент жесткости, определяется по результатам краш-тестов или по таблицам 4.5 - 4.8;

C_1, C_2 – величина деформации в характерной точке, мм, определяются линейной съемкой объемных деформаций транспортных средств, изложенной в данной главе.

Показанный подход по МУТЖ и методики расчета, основанные на законе сохранения движения в решении через моменты инерции или через работы сил, как правило, дают высокую погрешность особенно в случаях множественных попутных КСВ (попутное заднее столкновение трех и более ТС) и без учета затрат энергии на деформации задней части, приводят к занижению фактических значений расчетных скоростей ТС к моменту начала их КСВ или к моменту начала их торможения (перемещения со слеодообразованием).

В третьей главе «**Результаты анализа натуральных краш-тестов и численных экспериментов**» при оценки вероятности травмирования была проанализирована категоричность выводов, данных экспертами при решении частных задач по попутным задним КСВ (столкновениям движущихся попутно ТС и наездам на стоящее ТС или группу ТС), а именно случаи: наезда на стоящее ТС (Н), столкновения с попутным движущимся ТС (С) и наезда с последующим столкновением (Н+С) и столкновения с последующим наездом (С+Н). В рамках данного анализа получены следующие зависимости (см. таблицу 3).

Таблица 3 – Полученные зависимости изменения вероятности травмирования

№	Наименование	Зависимости	Коэффициент детерминации, R^2
1	Изменение вероятности P летального исхода от скорости V в момент начала КСВ для случаев Н	$P = 0,0002V^3 - 0,0117V^2 + 0,1975V - 0,0038$	0,95
2	Изменение вероятности P летального исхода от скорости V в момент начала КСВ для случаев Н+С и С+Н	$P = -0,0002V^3 - 0,0023V^2 + 0,1455V - 0,1388$	0,97
3	Изменение вероятности P тяжкого вреда от скорости V в момент начала КСВ для случаев Н	$P = 0,0013V^3 - 0,0363V^2 + 0,343V - 0,0692$	0,96
4	Изменение вероятности P тяжкого вреда от скорости V в момент начала КСВ для случаев Н+С и С+Н	$P = 0,0015V^3 - 0,0416V^2 + 0,3877V - 0,2011$	0,97
5	Изменение вероятности P легкого вреда от скорости V в момент начала КСВ для случаев Н	$P = 0,0024V^3 - 0,0658V^2 + 0,701V - 0,0994$	0,95
6	Изменение вероятности P легкого вреда от скорости V в момент начала КСВ для случаев Н+С и С+Н	$P = 0,0027V^3 - 0,0789V^2 + 0,4222V - 0,2578$	0,96

На рисунке 2 показан пример полученных объемных деформаций задней части ТС различных классов при различной величине перекрытия (тесты №8676 и №8678). Для выполнения комплексного анализа использовалась схема обработки данных, показанная на рисунке 3.

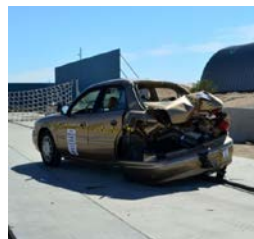


Рисунок 2 – Пример деформаций ТС после тестов, примеры из тестов №8676 и № 8678

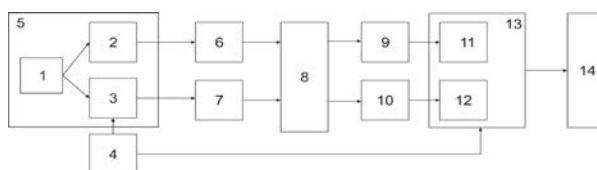


Рисунок 3 - Схема обработки данных по второму положению, выносимому на защиту

На схеме на рисунке 3 обозначены: 1 – общий объем тестовых данных; 2 – тесты на наезд ТС на ТС; 3 – тесты с наездом ТС на деформируемый барьер (тележка типа MDB); 4 – кластерный анализ данных по массово-габаритным характеристикам ТС; 5 – общий объем данных включая данные по EDR и CDR; 6 – обработка данных в программе EnetreV5; 7 – обработка отчетов средствами Excell; 8 – формирование банков данных чтения файлов записей; 9 - построение графиков по каждому тесту; 10 – построение деформационных профилей и вычисление коэффициентов жесткости; 11 и 12 – вычисление зависимостей изменения на каждый кластер; 13 – объем выделенных кластеров (всего 6); 14 – формирование обобщающих датасэтов для подключения их к моделям Matlab/Simulink.

Всего были проанализированы 253 теста из базы NHTSA, которые были обработаны в программе Entree V5, а также средствами MSExcel. Учитывалось время с момента начала КСВ до момента его завершения, строились графики изменения осевых замедлений для ударяющего и принимающего ТС, а также формировались графики изменения индексов травмирования головы и шеи (НІС и Nij). Пример контроля времени КСВ по видеозаписи теста показан на рисунке 4. Примеры получения зависимостей изменения индексов травмирования (НІС и Nij) по натурным данным (на примере теста №8547 по рисунку 4) показан на рисунках 5-10.

Соответственно по EDR банку NASS EDR Report (за период с 2000 по 2015 – всего 10992 записи) и по CDR базе проекта CISS (3226 записей за 2016-2018) были выбраны 678 пакетов данных, которые были обработаны в программе Entree V5, а также средствами MSExcel.

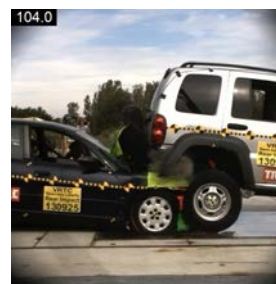


Рисунок 4 – Тест №8547, слева - момент начала КСВ (время 0,0 мс), справа – момент завершения КСВ (время 104,0 мс)

Также были выполнены численные эксперименты на попутные объемно-проникающие контакты на основе многотельных моделей типа MADYMO, внедренных в программу VirtualCrash 5.

Исследовались случаи Н, Н+С и С+Н, с вариацией: угла взаиморасположения в момент начала КСВ, площади контактной зоны, высоты точки первичного контакта, массы ТС по кластерам, скорости в момент начала КСВ (с шагом в 10 км/ч). Использовался манекен взрослого человека: масса 75 кг, рост 180 см (модель MADYMO).

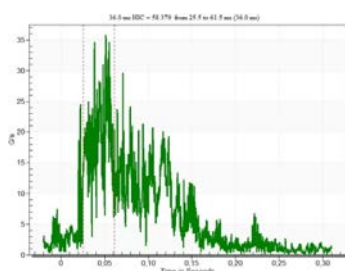


Рисунок 5 – График изменения НИС для ударяющего ТС для теста №8547

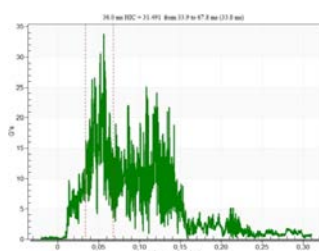


Рисунок 6 – График изменения НИС для принимающего ТС для теста №8547

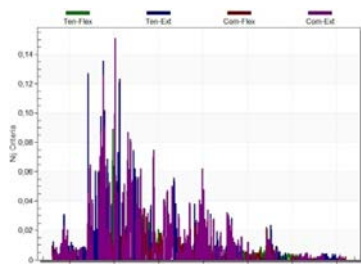


Рисунок 7 – График изменения N_{ij} для ударяющего ТС для теста №8547

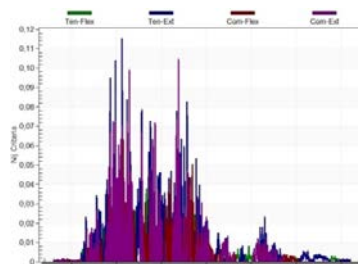


Рисунок 8 – График изменения N_{ij} для принимающего ТС для теста №8547

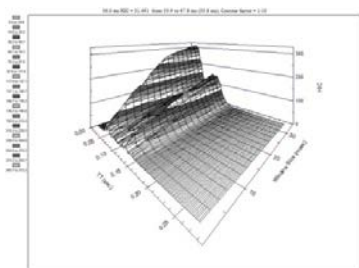


Рисунок 9 – Поверхность отклика НИС для ударяющего ТС, в зависимости от интервала расчета для теста №8547

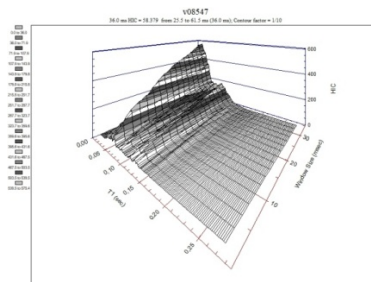


Рисунок 10 – Поверхность отклика НИС для принимающего ТС, в зависимости от интервала расчета для теста №8547

По каждому численному эксперименту строились графические зависимости средствами инструментов анализа программы VirtualCrash 5. Пример графика показан на рисунке 11.

В результате, на базе обработанных данных были получены: зависимости изменения индексов AIS, НИС, N_{ij} и ASI, обобщены данные по объемам деформаций задней части ТС, составлен датасет для обучения нейронной сети.

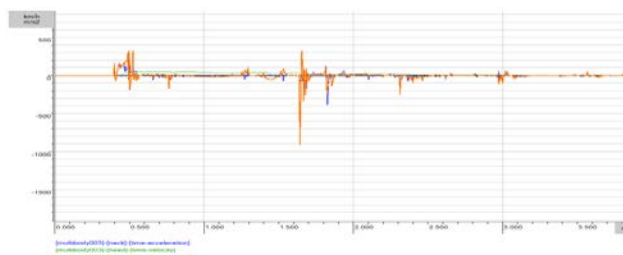


Рисунок 11 - Пример графика изменения скорости и замедлений/ускорений на ЦТ головы и шее манекена для случая Н, кластер 3, угол 25, площадь 0,8 м², высота 0,7 м, скорость 70 км/ч

Пример зависимостей для случаев Н:

- зависимость изменения значения индекса AIS от скорости в момент начала КСВ, полученная зависимость (2) имеет классический экспоненциальный вид (коэффициент детерминации $R^2 = 0,921$):

$$AIS = 2,457e^{0,0161V} \quad (2)$$

- зависимость изменения значения индекса НИС от скорости в момент начала КСВ, полученная зависимость (3) имеет полиномиальный вид третьего порядка (коэффициент детерминации $R^2 = 0,908$):

$$NIS = 0,000478V^3 - 0,0027V^2 + 0,2438V + 3,78 \quad (3)$$

Также были получены с разделением по кластерам (всего 6 кластеров): зависимости изменения осевых замедлений для ЦТ ТС и для ЦТ головы манекена; зависимости изменения скорости перемещения ЦТ головы манекена и его груди; зависимости изменения погашения скорости от угла КСВ, площади КЗ и высоты точки КСВ.

С целью систематизации подхода к сортировке данных по натурным и численным экспериментам, была введена кластеризация по массогабаритным характеристикам, при этом основной принцип разделения транспортных средств на кластеры был основан на их массе и типе кузова: Кластер 1: Малые легковые (до 1500 кг); Кластер 2: Средние легковые (1500-1800 кг); Кластер 3: Крупные легковые (1800-2200 кг); Кластер 4: Кроссоверы (2200-2500 кг); Кластер 5: Внедорожники (свыше 2500 кг); Кластер 6: Тяжелые внедорожники и спецтранспорт.

Также были получены с разделением по кластерам (всего 6 кластеров): зависимости изменения осевых замедлений для ЦТ ТС и для ЦТ головы манекена; зависимости изменения скорости перемещения ЦТ головы манекена; зависимости изменения погашения скорости от угла КСВ, площади КЗ и высоты точки КСВ.

Графики изменения индекса AIS и индекса НИС от скорости для выделенных кластеров показаны на рисунках 12-13.

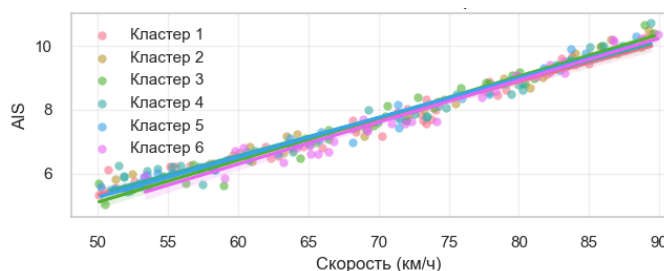


Рисунок 12 – Зависимость AIS от скорости по кластерам

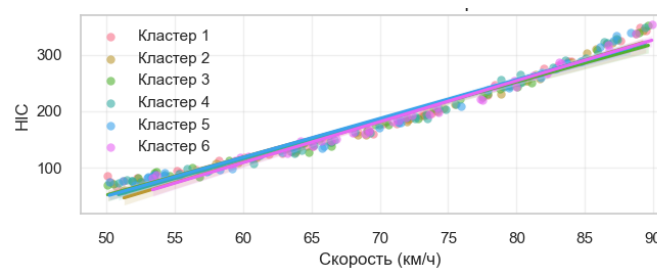


Рисунок 13 – Зависимость НИС от скорости по кластерам

Матрица корреляций подтверждает сильную взаимосвязь между скоростью и всеми индексами травмирования (коэффициенты корреляции 0.65-0.85), в то время как масса транспортного средства показывает умеренную отрицательную корреляцию с AIS (-0.4).

Полученные итоговые зависимости для каждого кластера показаны в таблице 4.

Таблица 4 – Полученные зависимости ИТ для кластеров

№ п/п	Номер кластера	Индекс травмирования	Зависимость	Коэффициент детерминации, R ²
1	Кластер 1	AIS	$2.4982 * \exp(0.0158 * V)$	0.976
2		НИС	$0.000195 * V^3 + 0.059349 * V^2 + -4.261030 * V + 113.3955$	0.997
3	Кластер 2	AIS	$2.5176 * \exp(0.0158 * V)$	0.983
4		НИС	$0.001969 * V^3 + -0.316582 * V^2 + 21.991068 * V + -492.9622$	0.998
5	Кластер 3	AIS	$2.2365 * \exp(0.0174 * V)$	0.977
6		НИС	$0.000810 * V^3 + -0.069969 * V^2 + 4.649391 * V + -88.0592$	0.995
7	Кластер 4	AIS	$2.5282 * \exp(0.0158 * V)$	0.978
8		НИС	$-0.000104 * V^3 + 0.126437 * V^2 + -9.071874 * V + 222.5661$	0.997
9	Кластер 5	AIS	$2.3821 * \exp(0.0165 * V)$	0.989
10		НИС	$0.000679 * V^3 + -0.025789 * V^2 + 0.542340 * V + 23.5820$	0.997
11	Кластер 6	AIS	$2.2994 * \exp(0.0169 * V)$	0.973
12		НИС	$0.001050 * V^3 + -0.122748 * V^2 + 8.402886 * V + -174.0782$	0.996

Сравнение средних значений по кластерам выявляет статистически значимые различия: кластер 6 имеет на 18% более высокие средние значения AIS по сравнению с кластером 3, а максимальные значения НИС в кластере 4 на 25% превышают показатели кластера 2. Анализ влияния массы транспортного

средства показывает нелинейную зависимость: для легких автомобилей (до 1300 кг) уменьшение массы на 100 кг приводит к росту AIS на 7-12%, тогда как для тяжелых автомобилей (свыше 1700 кг) эта зависимость выражена слабее. Полученные результаты позволят также ранжировать кластеры по уровню безопасности и разрабатывать дифференцированные рекомендации по улучшению конструкции транспортных средств для каждого типа.

Дано последовательное теоретическое представление о двухмерной и трехмерной постановке математической модели, учитывающей форму импульса ударного воздействия (треугольная, синусоидальная, квадратная), определено расчетное время КСВ, для этого получена следующая зависимость времени КСВ (t_R) от жесткости (C_g) и скорости в момент начала КСВ (V_0):

$$t_R = \frac{k_1 \cdot C_g}{k_2 \cdot V_0} \quad (4)$$

где k_1 – впервые полученный коэффициент скорости поглощения, выделенный для кластеров через коэффициент Гука (коэффициент А в МТУЖ); k_2 – впервые полученный коэффициент рассева скорости на площади КСВ, выделенный для кластеров через модуль упругости первого рода (коэффициент В в МТУЖ).

Модель удара в трехмерной постановке, реализованная как подмодель в Matlab/Simulink. Данная трехмерная постановка была использована в модели Matlab/Simulink для объемного удара, с переменной жесткостью в зоне контакта. Получены графики изменения жесткости и деформаций для выделенных кластеров. В таблицах 5 и 6 приведены примеры зависимостей для кластера 2.

Определены значения коэффициентов k_1 и k_2 с учетом кластеризации, в частности значения для кластеров 1-6 показаны в таблице 6. Итоговые зависимости для всех кластеров ТС показаны в таблице 8.

Таблица 5 - Изменение коэффициента жесткости C и пульсации ω в зависимости от времени КСВ - t

№ п/п	Полученная зависимость	Коэффициент детерминации, R^2
1	$C = 1,6933t^{-1,9092}$	0,99
2	$C = 1,5225t^{-1,004}$	0,99

Таблица 6 - Изменение статической деформации ударяющего ТС в зависимости от времени КСВ и начальной скорости

№ п/п	Начальная скорость ударяющего ТС, км/ч	Полученная зависимость	Коэффициент детерминации, R^2
1	10	$D = 1,5633t - 0,0406$	0,97
2	20	$D = 1,9433t - 0,0307$	0,97
3	30	$D = 0,1105\ln(t) + 0,4327$	0,98
4	40	$D = 0,1239\ln(t) + 0,4996$	0,98
5	50	$D = 0,1529\ln(t) + 0,6296$	0,97
6	60	$D = 0,1804\ln(t) + 0,7636$	0,95
7	70	$D = -131,99t^2 + 20,702t - 0,4111$	0,98

8	80	$D = -213,94t^2 + 31,953t - 0,6854$	0,98
9	90	$D = -249,18t^2 + 36,215t - 0,7202$	0,98

Таблица 7 – Значения, полученных k_1 и k_2

№ п/п	Кластер	k_1	k_2
1	1	143,678	1,0284
2	2	144,272	1,0304
3	3	148,684	1,0482
4	4	152,332	1,0531
5	5	158,845	1,0687
6	6	166,741	1,0785

Представленный методический аппарат и выявленные зависимости позволяют количественно оценивать влияние параметров на результат (в частности расчет скорости движения ТС до начала КСВ), что является важным для решения задач ДТЭ. Кластерный подход значительно повышает достоверность расчетов. Учет шести категорий ТС через коэффициенты k_1 и k_2 позволяет адаптировать модель под конкретные условия ДТП. Практическая значимость методики заключается в ее универсальности и точности ($\pm 5\%$ погрешность). Она позволяет: определять скорость ТС до удара на основе деформаций, оценивать энергопоглощение при сложных КСВ (например, столкновениях трех и более автомобилей) и может использоваться в условиях дефицита данных с места ДТП.

На основе выполненного анализа экспериментальных данных была разработана методика расчета, реализующая обработку датасетов в Matlab/Simulink с возможностью построения профилей поверхностей коэффициентов жесткости для различных кластеров в зависимости от угла и площади КСВ. Расчётный блок реализован в среде Matlab/Simulink.

Таблица 8 – Полученные зависимости по кластерам

№	Номер кластера, описание	Наименование зависимости	Зависимость	Коэффициент детерминации, R^2
1	Первый. Малые легковые (до 1.500 кг)	Коэффициент жесткости от деформации	$y = 152,5e^{(-0,50x)(1+0,01x)}$	0,974
		Работа сил от угла удара	$y = 120,7(1+0,50\sin(x+5,0))$	0,965
		Энергия деформации от угла удара	$y = 100,6(1+0,50\sin(x+5,0))$	0,958
2	Второй. Средние легковые (1500-1800 кг)	Коэффициент жесткости от деформации	$y = 154,3e^{(-0,51x)(1+0,012x)}$	0,972
		Работа сил от угла удара	$y = 121,2(1+0,51\sin(x+10,0))$	0,981
		Энергия деформации от угла удара	$y = 101,1(1+0,51\sin(x+10,0))$	0,963
3	Третий. Крупные легковые (1800-2200 кг)	Коэффициент жесткости от деформации	$y = 160,1e^{(-0,52x)(1+0,011x)}$	0,971
		Работа сил от угла удара	$y = 124,9(1+0,51\sin(x+15,0))$	0,964
		Энергия деформации от угла удара	$y = 104,1(1+0,52\sin(x+15,0))$	0,958

№	Номер кластера, описание	Наименование зависимости	Зависимость	Коэффициент детерминации, R^2
4	Четвертый. Кроссоверы (2200-2500 кг)	Коэффициент жесткости от деформации	$y=164,9e^{(-0,52x)(1+0,012x)}$	0,974
		Работа сил от угла удара	$y=128,0(1+0,52\sin(x+20,0))$	0,966
		Энергия деформации от угла удара	$y=106,6(1+0,52\sin(x+20,0))$	0,959
5	Пятый. Внедорожники (свыше 2500 кг)	Коэффициент жесткости от деформации	$y=172,7e^{(-0,52x)(1+0,013x)}$	0,982
		Работа сил от угла удара	$y=133,4(1+0,52\sin(x+25,0))$	0,969
		Энергия деформации от угла удара	$y=111,2(1+0,53\sin(x+25,0))$	0,956
6	Шестой. Тяжелые внедорожники (спецтранспорт)	Коэффициент жесткости от деформации	$y=181,9e^{(-0,53x)(1+0,014x)}$	0,961
		Работа сил от угла удара	$y=140,1(1+0,53\sin(x+30,0))$	0,977
		Энергия деформации от угла удара	$y=116,7(1+0,54\sin(x+30,0))$	0,984

Учет шести категорий ТС (от малолитражек до спецтранспорта) через уникальные коэффициенты k_1 и k_2 позволяет адаптировать модель под конкретные условия ДТП. Практическая значимость методики заключается в ее универсальности и точности ($\pm 5\%$ погрешность). Она позволяет: определять скорость ТС до удара на основе деформаций, оценивать энергопоглощение при сложных КСВ (например, столкновениях трех и более автомобилей) и использоваться в условиях дефицита данных с места ДТП. Что делает методику ценным инструментом для дорожно-транспортной экспертизы и разработки мер пассивной безопасности ТС.

В четвертой главе «Методики расчета затрат скорости на объемные деформации и оптимизации модельной сцены» на основе пересчета коэффициентов жесткости с учетом угла и объема КСВ, включая зависимости: изменения работы сил от угла удара при различной площади контактной зоны (m^2) и изменение работы сил от площади контакта для различных углов (град); сравнительные профили жесткости (диаграмма жесткость/деформация для выделенных кластеров, при различных скорости начала КСВ); сравнение энергии деформации и соответственно работы сил на деформации к углу удара по кластерам при площади контакта в $1m^2$. На примере кластера 2, на рисунке 14 показано изменение работы сил угла удара при различных площадях контактной зоны (m^2). Соответственно, на рисунке 15 показано сравнение энергии деформации по кластерам при площади контакта в $1m^2$.

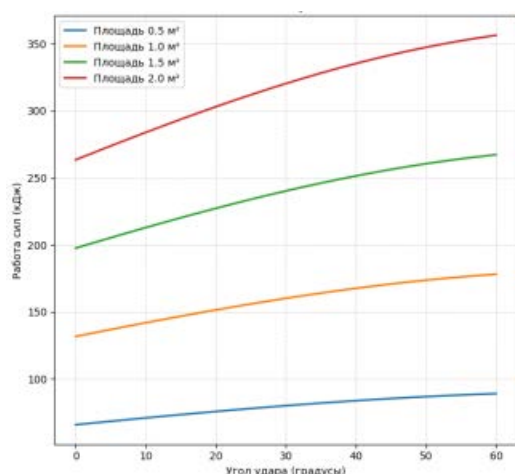


Рисунок 14 – Изменение работы сил угла удара при различных площади контактной зоны

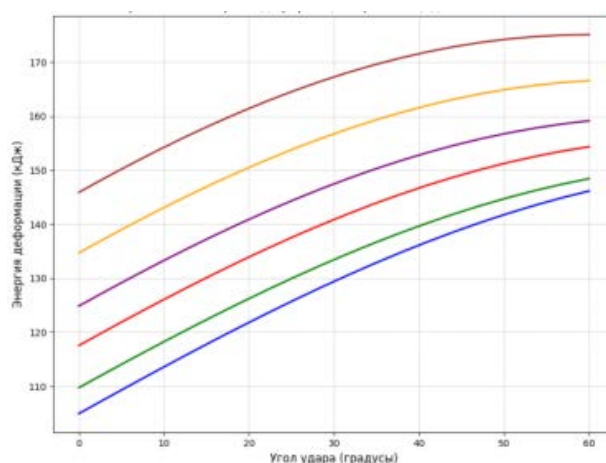


Рисунок 15 – Сравнение энергии деформации (на примере площади КСВ в 1м²)

- Кластер 1: Малые легковые (до 1500 кг)
- Кластер 2: Средние легковые (1500-1800 кг)
- Кластер 3: Крупные легковые (1800-2200 кг)
- Кластер 4: Кроссоверы (2200-2500 кг)
- Кластер 5: Внедорожники (свыше 2500 кг)
- Кластер 6: Тяжелые внедорожники (спецтранспорт)

Таблица 9 - Результаты расчета по предложенной и общепринятой методикам

№	Ограничение скорости	Расчет по действующей методике					Расчет по предложенной методике	
		Работа сил на перемещение, Дж	Работа сил на разворот, Дж	Работа сил по МУТЖ, Дж	Суммарная работа, Дж	Скорость, км/ч	Суммарная работа, Дж	Скорость, км/ч
1	60	124570	42573	4271	171414	53,7	198454	57,8
2	90	347540	65785	5035	418360	87,2	487241	94,1
3	60	174452	87412	8268	270132	57,7	289452	59,8
4	90	274451	32784	4028	311263	84,1	478368	104,3
5	40	78496	12548	5331	96375	43,0	117855	47,5
6	40	66912	19846	8112	94870	36,3	147821	45,3
7	60	165248	67855	6591	239694	60,9	278454	65,7
8	90	268493	61548	4399	334440	83,4	389784	90,1
9	90	365945	94085	5426	465456	93,6	578144	104,3
10	90	512687	84965	7485	605137	95,5	678418	101,1

Полученный программный комплекс и его реализация отражает разработанное уточнение МУТЖ и учитывает возможность пересчета коэффициентов жесткости с учетом угла и объема КСВ, таким образом обновляя возможность принятия средних значений коэффициентов А и В в МУТЖ по

полученным поверхностям. Результаты сравнения расчетов скорости движения ТС до ДТП (случай Н) по предложенной и общепринятой методикам показаны в таблице 9. При этом следует отметить, что в 63% расчетных случаев, выбранных для верификации, было установлено, что до КСВ имело место превышение максимально допустимой скорости движения, при этом данное превышение не могло быть установлено при расчете действующим методом.

Методика опирается на усовершенствованный математический аппарат и алгоритм оптимизации, который был реализован на языке Python. В данном коде была реализована связь с компонентами Matlab/Simulink: универсальной частью расчетного модуля для определения затрат скорости движения транспортного средства, эквивалентных затратам энергии на объемную деформацию с учетом новых зависимостей изменения коэффициентов жесткости и моделью расчета удара в трехмерной постановке.

Оптимизируемыми параметрами на модельной сцене являются: траектория сближения ТС до ДТП, траектория совместного движения, область расположения места контакта, угол взаиморасположения (между продольными осями ТС) и угол столкновения (между векторами количества движения) в момент контакта, скорость до ДТП, энергия деформации и работа сил деформации. Модельная сцена формируется на базе значений XML. Фиксированными данными на сцене: масса ТС, загрузка ТС, конечное положение ТС после ДТП, геометрия участка дороги, следы на месте ДТП.

Формальная постановка задачи оптимизации может представлена как минимизация целевой функции $F(X)$, характеризующая качество сценария ДТП:

$$\min F(X), X \in S \quad (5)$$

где, $X = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ – вектор оптимизируемых параметров: x_1 – область контакта (м); x_2 – угол сближения (град); x_3 – угол столкновения (град); x_4 – скорость до ДТП (м/с); S – пространство допустимых решений, заданное границами параметров.

Целевая функция представляет собой взвешенную сумму четырех ключевых показателей:

$F(X) = w_1 \cdot E_{def}(X) + w_2 \cdot \Delta V(X) + w_3 \cdot \Delta \theta(X) + w_4 \cdot D_{traj}(X)$ (6)
 где E_{def} – энергия деформации (определяется по модели Matlab/Simulink: model_3Dcrush2.slx, рис.14); ΔV – изменение скорости (определяется по модели Matlab/Simulink: crash3for6.slx); $\Delta \theta$ – угловые отклонения от оптимальных углов столкновения; D_{traj} – отклонение от желаемой траектории; w_1 – w_4 – весовые коэффициенты.

Из фактических ДТЭ, выполненных в ИБДД СПбГАСУ были отобраны 12 примеров исследований задних попутных объемных столкновений, по которым составлена сводная таблица 10 с примерами оптимизации.

Таблица 10 – Примеры применения оптимизации ГА

Прим ер	Мас са ТС 1 (кг)	Мас са ТС 2 (кг)	Начальн ый угол сближен ия (°)	Начальн ая скорост ь 1 (м/с)	Начальн ая скорост ь 2 (м/с)	Оптимизирова нная энергия деформации (Дж)	Снижен ие ΔV (%)	Время оптимизац ии (с)
1	1500	1200	30	15	10	45,320	28.5	12.4
2	1800	900	45	20	5	62,150	34.2	15.1
3	1200	1500	60	10	15	38,740	22.1	11.8
4	2000	1000	90	25	0	85,200	41.7	18.3
5	1600	1600	120	18	18	73,850	37.8	16.5
6	1400	1300	15	12	8	41,560	26.3	13.2
7	1700	1100	75	22	7	68,920	39.1	17.0
8	1300	1400	135	9	14	35,480	20.7	10.9
9	1900	800	180	30	3	92,340	45.2	19.7
10	1100	1700	225	7	20	32,150	18.9	9.8
11	1500	1500	270	16	16	70,210	36.5	15.8
12	1000	2000	315	5	25	29,870	17.3	8.5

На рисунке 16 показаны обобщающие данные по 12 примерам из таблицы 10, применительно к оценке эффективности применения методики.

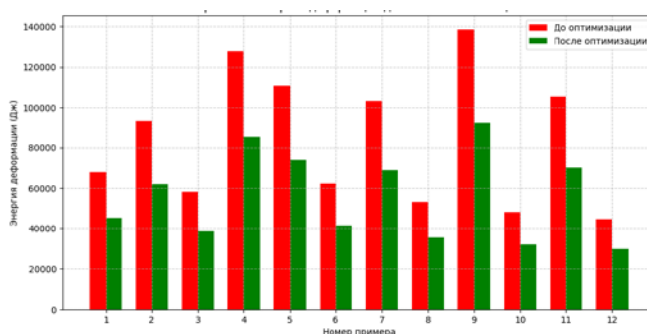


Рисунок 16 – Сравнение энергии деформации до и после оптимизации (все примеры)

Таким образом, реализация представленного выше математического аппарата оптимизации ГА обеспечивает комплексный подход к оптимизации траекторий ТС с учетом всех ключевых факторов ДТП и позволяет получать физически обоснованные решения. Данная методика обеспечивает категоричность выводов, что существенно влияет на эффективность ДТЭ в целом. Изложенный методический подход, в дальнейшем можно улучшить за счет интеграции с машинным обучением — например, используя нейросети для предсказания оптимальных траекторий на основе исторических данных ДТП, что ускорит расчеты. Кроме того, целесообразно внедрить многокритериальную оптимизацию, чтобы учитывать больше входных параметров. Также перспективным направлением является расширение модели для разных типов ТС и участников дорожного движения (например: мотоциклы, пешеходы и т.д.), что позволит реализовать ее потенциал для применения в более широком контексте.

Также, в рамках 4-ой главы выполнено сравнение предложенных решений с действующими методами и оценка экономических эффектов для производства ДТЭ применительно к экспертной организации и к макроэкономическим эффектам. В рамках сравнительного анализа с действующими методами по 15 примерам ДТЭ показано, что действующий метод дает заниженное значение скорости по сравнению с предложенной методикой. Это является прямым следствием игнорирования затрат кинетической энергии на необратимые деформации кузовов ТС. При этом определены влияние величины погрешности, влияние кластера и влияние угла и площади КСВ на практические выводы для ДТЭ: устранение ошибочных выводов о технической возможности (действующий метод может привести к выводу об отсутствии превышения, тогда как предложенный метод категорично указывает на превышение, что коренным образом меняет правовую оценку деяния) и некорректная оценка причинной связи (предложенная методика, устанавливая истинную скорость, позволяет использовать зависимости изменения индексов травмирования для категоричного определения насколько превышение скорости повлияло на тяжесть травм).

В части оценки экономических эффектов: итоговый прямой экономический эффект для экспертной организации: снижение себестоимости производства одной ДТЭ на 15-25% за счет сокращения трудозатрат и сроков, а также увеличение доходности за счет возможности гарантированно решать сложные задачи. При этом на макроуровне ориентировочный совокупный годовой экономический эффект для региона (СЗФО) может достигать 17-18 млн. рублей.

Таким образом, следует отметить, что разработанная методика не только является научным достижением, но и обладает значительным экономическим потенциалом. Её внедрение приводит к снижению прямых затрат на производство ДТЭ, существенной экономии бюджетных средств в системе правосудия и, что наиболее важно, к предотвращению многомиллионных социально-экономических потерь от дорожно-транспортных происшествий.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе выполненных исследований изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие и совершенствование методов ДТЭ:

1. Выполненный анализ качества и полноты исследований, выполненных в рамках ДТЭ по задним попутным столкновениям ТС, показал существенный взнос ошибки определения коэффициентов жесткости при реконструкции задних попутных ударов в полноту, категоричность и точность ДТЭ;

2. Впервые установлены зависимости изменения осевых замедлений на центре масс ТС и изменения индексов травмирования манекенов водителя и пассажира, по результатам комплексного анализа натурных краш-тестов задних попутных объемно-проникающих контактно-следовых взаимодействий ТС показали коэффициент детерминации не ниже 0,93;

3. Уточнение методики расчета затрат скорости на объемные деформации по трехсторонней унифицированной жесткости, за счет выявленных зависимостей изменения коэффициентов жесткости от величины перекрытия (площади контактной зоны) и угла столкновения, позволило получать более точные значения скорости перемещения ТС перед началом КСВ (до 27% по сравнению с действующей методики);

4. Применение определенных зависимости изменения величин работы сил на деформации, энергии деформации и скорости движения ТС до столкновения с учетом условий наступления столкновения в практике производства ДТЭ позволило: уточнить расчетные значения скорости движения ТС до ДТП, определять фактически индексы травмирования при анализе причинно-следственных связей между действиями водителя по выбору скорости движения, с наступившими последствиями ДТП;

5. Предложена методика расчета скорости движения ТС при производстве ДТЭ попутных задних контактов и оценена эффективность ее внедрения на базе полученных зависимостей в процедуры модельно-ориентированной реконструкции механизма ДТП, с разработкой решения по оптимизации траекторий перемещений объектов исследования в ДТЭ на основе генетического алгоритма. Разработано решение по оптимизации траекторий перемещений объектов исследования в ДТЭ на основе генетического алгоритма, использование которого в экспертной практике позволяет увеличить категоричность выводов ДТЭ при реконструкции ДТП на 23% (за счет существенного снижения площади области вариации поперечных и продольных смещений), ее совместное использование с оптимизацией по точке КСВ позволяет увеличить категоричность до 63%.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ:

в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК РФ:

1. Михалёва, Д.С. Основные пути решения проблемы безопасности дорожного движения / Д.С. Михалёва, И.С. Брылев // Мир транспорта и технологических машин. – 2022. – № 1(76). – 69-77 с. – DOI 10.33979/2073-7432-2022-76-1-69-77.

2. Михалёва, Д.С. Модульный принцип обучения водительских кадров по оформлению "Европротокола" / А.Н. Новиков, Д.С. Михалёва // Мир транспорта и технологических машин. – 2022. – № 3-1(78). – 96-108 с. – DOI 10.33979/2073-7432-2022-1(78)-3-96-108.

3. Михалёва, Д.С. Сравнительный анализ эффективности средств фиксации пространственно-следовой информации с места ДТП на примере наездов на дорожные ограждения и элементы дорожного обустройства / Я.В. Васильев, М.Д. Алексеев, А.Н. Новиков, Д.С. Михалёва // Мир транспорта и технологических машин. – 2024. – № 1-2(84). – 81-90 с. – DOI 10.33979/2073-7432-2024-1-2(84)-81-90.

4. Михалёва, Д.С. Методика формирования границ уровней пассивной безопасности в задачах экспертной профилактики ДТП / Я.В. Васильев, М.Д. Алексеев, А.Н. Новиков, Д.С. Михалёва // Мир транспорта и технологических машин. – 2024. – № 1-3(84). – 49-57 с. – DOI 10.33979/2073-7432-2024-1-3(84)-49-57.

5. Михалёва, Д.С. Методические основы применения индексов травмирования в дорожно-транспортной экспертизе / Я.В. Васильев, Д.С. Михалёва, М.Д. Алексеев, И.А. Агапов, А.А. Коломеец // Грузовик. 2024. № 10. – 39-43 с. DOI: 10.36652/1684-1298-2024-10-39-43.

6. Михалёва, Д.С. Методические основы расчета скорости движения при попутных задних контактно-следовых взаимодействиях в дорожно-транспортной экспертизе / А. Н. Новиков, Д. С. Михалёва // Грузовик. – 2025. – № 5. – 35-38 с. – DOI 10.36652/1684-1298-2025-5-35-38. – EDN JNJLZI.

Патенты и программы для ЭВМ, имеющие госрегистрацию:

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025692976. Расчетный модуль учета затрат энергии на объемные деформации при попутных задних ударах «РасЭн»: дата гос.регистрации: 25.11.2025 / Д.С. Михалёва.

Монографии:

8. Научно-практические основы расчета скорости движения ТС на примере попутных контактов: монография / Д.С. Михалёва, А. Н. Новиков, С.А. Евтюков, Я.В. Васильев. – Санкт-Петербург, 2024. – 121 с.

Статьи в других изданиях:

9. Михалёва, Д.С. Оценка индекса травмирования НИС при реконструкции попутных задних столкновений и наездов в экспертизе ДТП / А.Н. Новиков, Д.С. Михалёва // Международная научно-техническая конференция. Современные машиностроительные системы, технологии и инновации (ТМ-09) - 2025. – с. 223-229.

10. Михалёва, Д.С. Методика расчета коэффициентов жесткости для задач реконструкции попутных задних столкновений и наездов ТС / А.Н. Новиков, Д.С. Михалёва // Национальная научно-техническая конференция «Эксплуатация и сервис автомобилей, тракторов и двигателей» - 2025. – с. 90-96.