

На правах рукописи



Воронин Всеслав Владимирович

**МЕТОДИКА
МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ
РЕКОНСТРУКЦИИ ОПРОКИДЫВАНИЯ ТС
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДОРОЖНО-
ТРАНСПОРТНОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ**

Специальность 05.22.10 – Эксплуатация автомобильного
транспорта

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Васильев Ярослав Владимирович

Официальные оппоненты: **Дорохин Сергей Владимирович**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова»,
автомобильный факультет, декан;

Клявин Владимир Эрнстович
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический
университет», кафедра управления автотранспортом,
профессор.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-
дорожный государственный технический
университет (МАДИ)».**

Защита диссертации состоится «04» октября 2022 г. в 13-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.02 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория №220). Тел./Факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на официальном сайте: <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/voronin-vseslav-vladimirovich>

Автореферат разослан « 29 » августа 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А. В. Терентьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В производстве дорожно-транспортных экспертиз (ДТЭ) в отечественной практике до настоящего времени сохраняется тенденция переходного периода, которой свойствен постепенный переход к модельно-ориентированной реконструкции механизма ДТП. При этом устоявшаяся практика и общие тенденции в области ОБДД уже более 25 лет обособляют и подчеркивают важность ДТЭ в экспертной профилактике ДТП и в обеспечении контроля за исполнением участниками дорожного движения предъявляемых к ним норм регулирования, в частности требований ПДД РФ.

При неизменной значимости ДТЭ в ОБДД, в методологическом пространстве занимаемым методами реконструкции и анализа механизма ДТП сохраняется относительно обширная область условных «белых» пятен, в которых нет научно-обоснованного решения определенных видов задач. Это в отдельных видах исследований в рамках ДТЭ приводит к снижению их эффективности, в частности следует выделить случаи, когда решение не может быть выражено в категоричной форме и когда решение имеет большой диапазон варьирования полученного значения, при этом методы оптимизации не применимы из-за недостаточности исходного объема пространственно-следовой информации (ПСИ), фиксируемой при осмотре места ДТП. Длительность текущего переходного состояния (от комплексной трасолого-автотехнической реконструкции к модельно-ориентированной реконструкции – МОР) в области ДТЭ в настоящее время обусловлена отсутствием научно-методического аппарата для отдельных видов частных исследовательских задач ДТЭ, среди которых особое место занимает анализ и реконструкция ДТП с опрокидыванием ТС.

При этом в общей структуре процессов реконструкции механизма ДТП нет аппарата объединяющего в себе модельно-ориентированный и риск-ориентированный подходы к анализу системы ВАДС при производстве ДТЭ по ДТП с опрокидыванием ТС.

Таким образом, совершенствование научно-методического аппарата ДТЭ реализующего как модельно-ориентированный, так и риск-ориентированный подходы (РОП) к реконструкции механизма ДТП в границах исследовательских задачах ДТЭ, связанных с опрокидыванием ТС является актуальной научной задачей.

Степень разработанности проблемы. Теоретический и практический фундамент научного обеспечения как в целом БДД, так и процедур выполнения ДТЭ, а также методов контроля и управления состоянием системы ВАДС, в том числе в части теоретико-математического обеспечения расчетных

методов в ДТЭ и экспертной профилактике ДТП были заложены в трудах многих отечественных и зарубежных ученых, таких как: Б.Е. Боровский, Э.Р. Домке, С.А. Евтюков, С.С. Евтюков, С.В. Жанказиев, В.А. Иларионов, П.А. Кравченко, Н.М. Кристи, Е.В. Куракина, О.В. Лукошьявичине, В.Н. Никонов, П.А. Пегин, А.М. Плотников, И.Н. В.А. Пучкин, В.В. Сильянов, С.А. Смирнова, А.В. Терентьев, Р. Байэтт, Б. МакГенри, А.Реза, Я.Верчинский, Р. Бранч, Н.Роуз, К. Орловски, А.Эйген, Д. Мартинез и других.

Однако, несмотря на значимые результаты практического внедрения результатов исследований вышеуказанных и многих других отечественных и зарубежных ученых, в настоящий момент в задачах реконструкции механизма ДТП с опрокидыванием ТС наблюдается научно-методическая необходимость повышения категоричности выводов в сложившейся в стране практике производства ДТЭ, ее эффективности и уровня научного обеспечения решения специализированных задач ДТЭ при исследовании ДТП с опрокидыванием ТС.

Цель исследования – повышение эффективности дорожно-транспортных экспертиз за счет совершенствования методов анализа ДТП с опрокидыванием ТС на основе гибридного решения объединяющего модельно-ориентированный и риск-ориентированный подходы.

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

Произвести анализ выполненных ДТЭ за период с 2011 по 2020 и выявить взаимосвязь между категоричностью полученных выводов по результатам исследования, объемом исходной пространственно-следовой информации (ПСИ) и методами решения, а также выявить динамику сужения вариативности выводов относительно различных методов оптимизации применяемых численных методов.

Произвести анализ натуральных краш-тестов на опрокидывание, выполнить анализ банка записей EDR/CDR (БУРС по ГОСТ Р 58840) по данным NHTSA.

Разработать математическую модель перемещений ТС при опрокидывании и внедрить ее в комплексную процедуру модельно-ориентированной реконструкции механизма опрокидывания ТС, реализовав в ней гибридное решение с риск-ориентированным подходом для оценки травмирования водителя и пассажиров при опрокидывании ТС.

Разработать методику учета работ сил на совместное перемещение в контакте и непрерывное изменение угла разворота ТС при его перемещении на стадии отброса.

Уточнить методику расчета работы сил совершаемой при опрокидывании ТС, в зависимости от фактического механизма опрокидывания.

Разработать методику оптимизации расчетного местоположения точки контакта объектов исследования в ДТЭ на основе кооперативных генетических алгоритмов.

Объект исследования – транспортные средства категории М1 и N1 в процессе их опрокидывания при ДТП.

Предмет исследования – причинно-следственные связи между механизмом ДТП при опрокидывании ТС, риском травмирования водителя и пассажиров, состоянием системы ВАДС и категоричностью выводов дорожно-транспортных экспертиз.

Рабочая гипотеза – совместное применение риск-ориентированного подхода при анализе травмирования для задач ДТЭ при МОР ДТП с опрокидыванием ТС может рассматриваться как один из инструментов экспертного анализа и профилактики ДТП в задачах повышения БДД, в том числе снижения травмирования в ДТП с опрокидыванием ТС.

Научная новизна исследования

1. Впервые методами математической статистики исследованы более 2300 ДТЭ, при этом выявлена взаимосвязь между категоричностью полученных выводов по результатам исследования, объемом (качеством) исходной ПСИ и методами решения, а также определен характер динамики сужения вариативности выводов относительно различных методов оптимизации применяемых численных методов и причины обуславливающие это явление.

2. Выполнен комплексный анализ 179 натуральных краш-тестов из базы NHTSA на опрокидывание ТС на разгонной тележке, а также исследованы данные 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).

3. Разработана математическая модель перемещений ТС при опрокидывании в комплексной процедуре модельно-ориентированной реконструкции механизма опрокидывания ТС, использующей гибридное решение с риск-ориентированным подходом для оценки травмирования водителя и пассажиров при опрокидывании ТС.

4. Разработана методика учета работ сил на совместное перемещение в контакте и непрерывное изменение угла разворота ТС при его перемещении на стадии отброса.

5. Уточнена методика расчета работы сил совершаемой при опрокидывании ТС, в зависимости от фактического механизма опрокидывания.

6. Разработана методика оптимизации расчетного местоположения точки контакта объектов исследования в ДТЭ на основе кооперативных генетических алгоритмов.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке и обосновании методики модельно-ориентированной реконструкции ДТП

с опрокидыванием ТС совместно с оценки и прогнозированием риска травмирования водителя и пассажиров в системе ВАДС, путем реализации новых расчетно-аналитических методов, на основе анализа и использования больших объемов информационных баз (EDR и CDR – БУРС по ГОСТ Р 58840, а также натуральных краш-тестов по данным NHTSA).

Практическая значимость работы заключается в возможности применения результатов исследования при производстве ДТЭ экспертами по анализу и реконструкции ДТП с целью повышения категоричности и объективности результатов выполнения ДТЭ, а также органами ГИБДД, следствия, судами и страховыми компаниями при реконструкции механизма ДТП с опрокидыванием.

Методология и методы исследования базируется на анализе статистических данных по ДТП с опрокидыванием ТС, методах и результатах ДТЭ использованных при анализе ДТП с опрокидыванием ТС в РФ и за рубежом, рассмотрении и критической оценке научных трудов и публикаций по ним отечественных и иностранных специалистов, посвященных ДТЭ с опрокидыванием ТС, использовании общепризнанных научных методов исследования: анализа и обработки данных методами математической статистики и методов системного анализа, теории моделирования, регрессионного анализа, методов оптимизации генетическими алгоритмами, а также экспертного прогнозирования и экспериментальных исследований.

Положения, выносимые на защиту.

1. Закономерности изменения категоричности выводов ДТЭ от объема (качества) исходной ПСИ и методов решения, а также изменения вариативности выводов ДТЭ относительно различных методов оптимизации применяемых численных методов расчета;

2. Математическая модель перемещений ТС при опрокидывании в комплексной процедуре модельно-ориентированной реконструкции механизма опрокидывания ТС, использующей гибридное решение с риск-ориентированным подходом для оценки травмирования водителя и пассажиров при опрокидывании ТС;

3. Методика учета работ сил на совместное перемещение ТС в контакте и непрерывное изменение угла разворота ТС при его перемещении на стадии отброса;

4. Методика расчета работы сил совершаемой при опрокидывании ТС, в зависимости от фактического механизма опрокидывания;

5. Методика оптимизации расчетного местоположения точки контакта объектов исследования в ДТЭ на основе кооперативных генетических алгоритмов.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационного исследования обеспечена: аналитическим обоснованием цели и связанных с ней задач исследования, в результате оценки 2329 ДТЭ, выполненных в СЗФО; применением апробированных и общеизвестных методов их решения; полученными результатами оценки эффективности предложенных методик в составе модельно-ориентированной реконструкции ДТП с опровержением с риск-ориентированным подходом к оценке травмирования водителя и пассажиров; публикациями и обсуждением на Российских и международным конференциях; Актами внедрения.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на конференциях: 72-я всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современного строительства» (2019), 14-ой международной научно-практической конференции «Прогрессивные технологии в транспортных системах» (2019), 14-ой международной научно-практической конференции «Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах» (2020), Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте» (2021).

Реализация результатов исследований. Представленные в диссертации результаты исследований внедрены в деятельность по анализу, реконструкции и профилактике ДТП в ФКУ «Упрдор «Каспий», во 2-ом полку ДПС ГУ МВД России по Московской области, в ОГИБДД УМВД России по Центральному району СПб и в САО «РЕСО-Гарантия».

Результаты работы используются в учебном процессе АДФ СПбГАСУ при подготовке студентов и аспирантов по направлениям подготовки 23.03.01 «Технология транспортных процессов»; 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов»; 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства»; 23.04.01 «Технология транспортных процессов»; 23.04.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы» в курсах: «Моделирование сложных процессов», «Основы научных исследований», «Организация и безопасность дорожного движения».

Информационная база исследования. Нормативно-техническая документация, законодательные и правовые акты, базы данных по натурным краш-тестам, банки данных по EDR/CDR (БУРС по ГОСТ Р 58840) 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 с опровержением ТС.

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, реализованный в комплексной процедуре модельно-ориентированной реконструкции механизма опрокидывания ТС, использующей гибридное решение с риск-ориентированным подходом.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности 05.22.10 – «Эксплуатация автомобильного транспорта»: п.5. «Обеспечение экологической и дорожной безопасности автотранспортного комплекса; совершенствование методов автодорожной и экологической экспертизы, методов экологического мониторинга автотранспортных потоков» и п.7. «Исследование в области безопасности движения с учетом технического состояния автомобиля, дорожной сети, организации движения автомобилей; проведение дорожно-транспортной экспертизы».

Публикации. Основные положения диссертации изложены в 7 работах общим объемом – 22,27 п.л. (авторских – 12,38 п.л.), в том числе 4 – в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ, 1 - в Международных индексируемых базах Scopus и Web of Science. Издано 2 – монографий.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 84 наименований. Содержит 173 страницы, 51 иллюстрацию, 46 таблиц и 4 приложения.

Во введении изложена исследуемая проблема и обоснована актуальность выполненных исследований, сформулированы цель и задачи, необходимые для ее решения, отражены полученная научная новизна, теоретическая и практическая значимость выполненных исследований.

В первой главе проведен анализ 2329 ДТЭ методами математической статистики, при этом выявлена взаимосвязь между категоричностью полученных выводов по результатам исследования, объемом исходной ПСИ и методами решения, а также определен характер динамики сужения вариативности выводов относительно различных методов оптимизации изменяемых численных методов и причины обуславливающие это явление.

Во второй главе проведен анализ причин и обстоятельств опрокидывания ТС, представлено теоретическое обоснование оценки положения центра масс ТС, реализуемые при модельно-ориентированной реконструкции в ДТЭ, проведен анализ методов расчета индексов травмирования используемых для задач ДТЭ при исследовании ДТП с опрокидыванием ТС, а также выполнен анализ экспериментальных данных полученных в NHTSA по проектам NASS и CISS.

В третьей главе изложена математическая модель опрокидывания ТС и разработано решение по структурной организации реконструкции ДТП

с опрокидыванием ТС на основе комплексной процедуры модельно-ориентированной реконструкции механизма опрокидывания ТС, использующей гибридное решение с риск-ориентированным подходом для оценки травмирования водителя и пассажиров при опрокидывании ТС, показана модель оценки риска травмирования.

В четвертой главе показаны разработанные в составе комплексной процедуры методики: расчета учета работ сил на совместное перемещение ТС в контакте и непрерывное изменение угла разворота ТС при его перемещении на стадии отброса; расчета работы сил совершаемой при опрокидывании ТС, в зависимости от фактического механизма опрокидывания; оптимизации расчетного местоположения точки контакта объектов исследования в ДТЭ на основе кооперативных генетических алгоритмов.

В пятой главе показаны результаты оценки эффективности разработанных методик в сравнении с действующими методами ДТЭ.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Анализ эффективности ДТЭ и установление связи между категоричностью выводов ДТЭ, объемом исходной ПСИ и методами решения. С целью поиска взаимосвязи между категоричностью полученных выводов по результатам ДТЭ, объемом исходной ПСИ и методами решения, использованными в ДТЭ, а также для оценки эффективности методов анализа и оптимизации решений, используемых в ДТЭ, были исследованы 2329 ДТЭ (за период с 2011 по 2020 годы), выполнявшихся в рамках гражданского, административного и уголовного производства в государственных экспертных организациях Северо-западного федерального округа (СЗФО) РФ.

При этом был выполнен анализ полноты (содержательности) ПСИ по ДТЭ из общей выборки, в которых не были даны категоричные выводы по месту ДТП и по скорости движения объектов исследования, с оценкой исходной ПСИ и всех элементов системы ВАДС (включая отдельными подсистемами Пешехода и Пассажира). Также был выполнен анализ ПСИ по свойствам, определяющим ее качество (репрезентативность, содержательность, точность, устойчивость) по результатам которого установлено, что при стабильно высоких значениях оценки репрезентативности и устойчивости, точность и содержательность ПСИ практически не меняется, т.е. за 10 лет качество ПСИ неизменно остается на среднем уровне, т.к. технологии ее сбора (фиксации и представления) отвечают уровню прошлого

века. Из полученной выборки было определено, что в 68% расчетных случаев область фактического контакта объектов исследования (ОИ) может быть выделена только в области овальной (эллипсоидной) формы, т.е. не имеет категоричного решения.

Далее с учетом вышеуказанной выборки по ДТЭ по СЗФО, была проанализирована категоричность выводов, данных экспертами при решении частных задач реконструкции механизма ДТП с опрокидыванием, а именно случаи: опрокидывания (О), столкновения с последующим опрокидыванием (С + О) и опрокидывания с последующим столкновением (О + С). В частности, по уголовным делам, среди основных (типовых) задач реконструкции механизма опрокидывания, были выделены следующие формулировки типовых задач ДТЭ (индексы приведены в начале формулировки и далее используются по тексту для сокращения описания вида задачи):

А1. Определение лица управлявшего ТС из числа лиц находившихся в салоне. Данная задача ставилась в случаях когда решение путем дактилоскопических и их иных смежных экспертиз не могло быть получено, в следствии разнообразных причин (например, отсутствия сохранности ОИ или невозможности идентификации биоматериала лиц находившихся в салоне ОИ). Такого вида задачи ставились в 97 ДТЭ по случаям О, С + О и О + С;

А2. Определение лица управлявшего ТС из числа лиц покинувших салон. Такого вида задачи ставились в тех же случаях что и А1, при этом это имело место в 124 ДТЭ по случаям О, С + О и О + С;

Б1. Определение тяжести травмирования в случае движения с максимально допустимой в данной ДТС по ПДД РФ скоростью движения ТС (V_d) ТС в котором анализируется травмирование (случаи О и О + С). Данная задача ставилась на исследование более чем в 242 ДТЭ по случаям О и О + С;

Б2. Определение тяжести травмирования в случае движения с V_d ТС которое имело КСВ с ТС, в котором анализируется травмирование. Данная задача ставилась на исследование более чем в 148 ДТЭ по случаям С + О и О + С;

В. Определение находятся ли в причинной связи не применение ремня безопасности водителем или пассажирами с полученными ими травмами. Данная задача ставилась на исследование более чем в 557 ДТЭ по случаям О, С + О и О + С.

В общей выборке ДТЭ использованной в настоящем исследовании был также выполнен анализ категоричности выводов по индексированным задачам ДТЭ при реконструкции опрокидываний (для всех случаев: О, С + О и О + С), результаты которого показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Анализ категоричности выводов по индексированным задачам ДТЭ при реконструкции опрокидываний

Индекс задачи ДТЭ	Количество ДТЭ где ставились индексированные задачи, % из общей выборки ДТЭ	Анализ СМЭ		Вывод по задаче в ДТЭ, % от общего числа			Причины, указанные экспертами в обоснование отказа от вывода
		Наличие СМЭ на момент производства ДТЭ, % от общего числа	Данные СМЭ, достаточны для точной идентификации контактных зон в салоне ТС, % от общего числа	Категоричный	Вероятностный	Отказ от вывода, указано что не представляется возможным установить	
A1	12	98	2	16	34	50	недостаточность исходных данных
A2	10	99	1	9	31	60	недостаточность исходных данных
B1	32	98	85	4	12	84	отсутствие методики
B2	28	99	87	4	17	79	отсутствие методики
B	41	100	95	5	25	70	отсутствие методики

Таким образом, в 67% ДТЭ, в которых решались вышеуказанные задачи индексированные как: A1, A2, B1, B2 и B, был дан отказ от категоричного вывода. Выполненный анализ позволил определить взаимосвязь между категоричностью полученных выводов по результатам исследования, объемом исходной ПСИ и методами решения, откуда следует, что в задачах ДТЭ, связанных с опрокидыванием ТС имеется существенный методический пробел.

2. Математическая модель перемещений ТС при опрокидывании в комплексной процедуре МОР механизма опрокидывания ТС, использующей гибридное решение с риск-ориентированным подходом для оценки травмирования водителя и пассажиров при опрокидывании ТС. В общей выборке исследуемых ДТЭ были отдельно проанализированы заключения ДТЭ по ДТП, где имели место потеря устойчивости и опрокидывание ТС, в этом анализе было использовано 354 заключения по ДТЭ и материалы к ним, были выявлены основные причины опрокидывания, а также определено распределение классов ТС по годам выпуска в ДТП с опрокидыванием, распределение количества четвертей оборота

от скорости движения ТС до начала опрокидывания и установлено распределение величины разворота по вертикальной оси ТС, предшествующего началу опрокидывания.

Также было определено распределение зон травмирования (водителя и пассажира, для случаев пристегнутого и не пристегнутого штатного ремня безопасности) в зависимости от вида опрокидывания в % соотношении от общего числа случаев с травмами выше легких. Было выполнено сравнение распределения частоты зон травмирования при столкновениях в сравнении с опрокидыванием и в сравнении со случаями С + О и О + С. Пример для водителей с пристегнутым ремнем безопасности показан в таблице 2.

Таблица 2 – Распределение повреждений водителей при пристегнутом ремне безопасности

Распределение повреждений в % от всех AIS3+ травм	Вид опрокидывания		С+О	О+С
	Продольное	Поперечное		
Голова	26	15	24	25
Лицо	5	3	7	5
Шея	2	1	2	5
Реберный отдел	8	26	8	9
Верхние конечности	12	17	12	14
Позвоночник	28	5	29	27
Внутренние органы	4	5	4	5
Нижние конечности	15	28	14	15

В ходе анализа структуры дерева причин и обстоятельств опрокидывания ТС при решении основных экспертных задач по исследованию опрокидывания ТС при МОР была обоснована необходимость включения в нее РОП к оценке травмирования для решения задач типа А1, А2, Б1, Б2, В (см. таблицу 1).

Также было установлено, что наиболее полную оценку травмирования при оценке риска в ДТЭ, связанных с реконструкцией опрокидывания ТС (для всех случаев С+О и О+С, применительно к задачам А1, А2, Б1, Б2, В дают индексы AIS (Abbreviated Injury Score) и ASI (Acceleration Severity Index), кроме того индекс ASI рассчитываемый по фиксируемым в БУРС величинам осевых замедлений, позволил также использовать экспериментальную базу данных по EDR в банке NASS EDR Report и по CDR базе проекта CISS.

Для этого были проанализированы 179 тестов из базы NHTSA, а также собраны данные 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) из которых выбраны 378 пакетов данных, которые были обработаны в программе Entree V5, а также средствами MS Excell.

В результате обработки натуральных данных получены регрессионные зависимости, описывающие изменение угловой скорости ТС в зависимости от количества четвертой оборота ТС при перемещении с продольным вращением (таблица 3), а также зависимости (таблица 4) описывающие изменение угловой скорости в зависимости от продольного замедления и состояния покрытия и зависимости дальности перемещений ТС от числа четвертой оборота для трех состояний покрытия (таблица 5).

Таблица 3 – Полученные зависимости изменения угловой скорости от числа четвертой оборота ($n_{\text{чО}}$)

№ п/п	Число четвертей оборота, $n_{\text{чО}}$	Уравнение регрессии	Достоверность аппроксимации
1	Одна ($\pi/2$)	$\Delta\omega = 68,833 n_{\text{чО}}^3 - 838 n_{\text{чО}}^2 + 3139,2 n_{\text{чО}} - 3350$	0,889
2	Две (π)	$\Delta\omega = 8,1414 n_{\text{чО}}^3 - 167,07 n_{\text{чО}}^2 + 974,69 n_{\text{чО}} - 1165,5$	0,923
3	Три ($3\pi/2$)	$\Delta\omega = 1,0894 n_{\text{чО}}^3 - 29,892 n_{\text{чО}}^2 + 198,31 n_{\text{чО}} + 85,667$	0,888
4	Четыре и более (2π)	$\Delta\omega = 0,0627 n_{\text{чО}}^3 - 4,6049 n_{\text{чО}}^2 + 74,366 n_{\text{чО}} + 259,87$	0,857

Кроме того, в рамках реализации РОП были получены зависимости риска получения индекса травмирования водителя и пассажиров (по местам) выше AIS3 и риска летального исхода (для случаев только О и С + О / О + С) от числа четвертой оборота. В таблице 6 показаны зависимости для водителя.

Таблица 4 – Полученные зависимости изменения угловой скорости от продольного замедления (j)

№ п/п	Состояние покрытия	Уравнение регрессии	Достоверность аппроксимации
1	Сухое, $\varphi = 0,7$	$\Delta\omega = -1,4866j^3 + 24,799j^2 - 30,798j + 183,44$	0,809
2	Мокрое, $\varphi = 0,5$	$\Delta\omega = -1,2486j^3 + 28,478j^2 - 31,674j + 106,44$	0,811
3	Гололед, $\varphi = 0,3$	$\Delta\omega = -1,1175j^3 + 27,98j^2 - 24,741j + 58,442$	0,807

Таблица 5 – Полученные зависимости изменения расстояния отброса от числа четвертой оборота ($n_{\text{чО}}$)

№ п/п	Состояние покрытия	Уравнение регрессии	Достоверность аппроксимации
1	Сухое, $\varphi = 0,7$	$\Delta S = 1,0927 n_{\text{чО}}^3 - 15,314 n_{\text{чО}}^2 + 75,445 n_{\text{чО}} - 61,06$	0,872

Окончание табл. 5

№ п/п	Состояние покрытия	Уравнение регрессии	Достоверность аппроксимации
2	Мокрое, $\varphi = 0,5$	$\Delta S = 0,924 n_{\text{чО}}^3 - 14,303 n_{\text{чО}}^2 + 77,759 n_{\text{чО}} - 64,821$	0,861
3	Гололед, $\varphi = 0,3$	$\Delta S = -1,5152 n_{\text{чО}}^3 + 6,8545 n_{\text{чО}}^2 + 27,103 n_{\text{чО}} - 30,624$	0,887

Таблица 6 – Зависимости оценки риска травмирования для водительского сидения при опрокидывании

№ п/п	Вид риска на водительском месте	Уравнение регрессии	Достоверность аппроксимации
1	Риск получения травм с индексом AIS3 и выше для О	$R_{\text{AIS3+}} = 0,0015x^3 - 0,0416x^2 + 0,3877x - 0,2011$	0,897
2	Риск летального исхода для О	$R_{\text{D}} = -3\text{E-}05x^3 + 0,0017x^2 + 0,0644x + 0,0031$	0,912
3	Риск получения травм с индексом AIS3 и выше для О + C/C + О	$R_{\text{AIS3+}} = 0,0013x^3 - 0,0363x^2 + 0,343x - 0,0692$	0,904
4	Риск летального исхода для О + C/C + О	$R_{\text{D}} = 0,0002x^3 - 0,0117x^2 + 0,1975x - 0,0038$	0,914

По данным, содержащимся в FARS и CDS было проанализировано 213 записей о фактических ДТП с AIS3+ (в выборке 2017 по 2020 годы), на основании которых для трех состояний покрытия были получены зависимости скорости опрокидывания $V_{\text{ОПР}}$ от расстояния перемещений на стадии отброса $S_{\text{ОТ}}$, представленные в таблице 7.

Таблица 7 – Полученные зависимости изменения скорости в момент начала опрокидывания $V_{\text{ОПР}}$ от расстояния перемещений ($S_{\text{ОТ}}$)

№ п/п	Состояние покрытия	Полученная зависимость	Достоверность аппроксимации
1	Сухое, $\varphi = 0,7$	$V_{\text{ОПР}} = 7,4391 \cdot S_{\text{ОТ}}^{0,5768}$	0,96
2	Мокрое, $\varphi = 0,5$	$V_{\text{ОПР}} = 4,3797 \cdot S_{\text{ОТ}}^{0,6734}$	0,94
3	Гололед, $\varphi = 0,3$	$V_{\text{ОПР}} = 2,2748 \cdot S_{\text{ОТ}}^{0,774}$	0,93

А также, в части применения РОП в ДТЭ, в процедурах МОР, использование статического коэффициента поперечной устойчивости (СКПУ или $K_{уст}$) как базового компонента риска в логит-модели, позволило выработать методический подход к решению задач типа А1, А2, Б1, Б2 и В. В ходе обработки вышеуказанной экспериментальной базы установлено, были получены зависимости изменения критической скорости движения по условию опрокидывания от СКПУ для различных значений колеи колес ТС и высоты центра тяжести (ЦТ) ТС показаны в таблицах 8 и 9.

Таблица 8 – Зависимость изменения критической скорости от СКПУ для различных значений колеи ТС

№ п/п	Колея ТС, м	Зависимость	Коэффициент детерминации, R ²
1	1,2	$V_{кр} = 6,6855K_{уст} + 7,4401$	0,98
2	1,3	$V_{кр} = 7,759K_{уст} + 6,8966$	0,98
3	1,4	$V_{кр} = 10,085K_{уст} + 5,3368$	0,98
4	1,5	$V_{кр} = 12,481K_{уст} + 3,722$	0,98
5	1,6	$V_{кр} = 14,574K_{уст} + 2,1635$	0,98
6	1,7	$V_{кр} = 16,904K_{уст} + 0,437$	0,98

В результате чего, также было получено выражение зависимости изменения риска опрокидывания на одно ДТП в зависимости от СКПУ с учетом современных данных:

$$\beta_0 = 14,398e^{-3,592K_{уст}} \quad (1)$$

Коэффициент детерминации полученной зависимости составляет $R^2 = 0,95$. При этом было установлено, что использование оценок риска опрокидывания на одно ДТП по действующим методам, существенно завышает риск при значениях СКПУ от 0,9 до 1,3.

Таблица 9 – Зависимость изменения критической скорости от СКПУ для различных значений высоты ЦТ ТС

№ п/п	Высота ЦТ ТС, м	Зависимость	Коэффициент детерминации, R ²
1	0,5	$V_{кр} = 11,788K_{уст} + 1,1239$	0,98
2	0,55	$V_{кр} = 11,645K_{уст} + 2,7154$	0,98
3	0,6	$V_{кр} = 13,344K_{уст} + 1,8718$	0,98
4	0,65	$V_{кр} = 14,693K_{уст} + 1,5927$	0,98
5	0,7	$V_{кр} = 18,427K_{уст} - 1,0766$	0,98
6	0,75	$V_{кр} = 19,86K_{уст} - 1,5851$	0,98

С учетом проведенных исследований обобщенная математическая модель перемещений ТС при его опрокидывании, может быть сведена к следующему виду:

Для практического применения в ДТЭ при расчете скорости движения до опрокидывания ТС следует рекомендовать применение формулы:

$$V_A = 3,6 \sqrt{\frac{2 \cdot E_k + I_o \cdot \omega^2}{m}}, \quad (2)$$

где ΔE_k – потери кинетической энергии, Дж; I_o – момент инерции ТС по направлению опрокидывания, равный:

$$\begin{aligned} I_o = & I_x \cos^2 A + I_y \cos^2 B + I_z \cos^2 C - \\ & - 2I_{xy} \cos A \cos B - 2I_{yz} \cos B \cos C - \\ & - 2I_{zx} \cos C \cos A, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} A = & j \cos(\cos \theta_n \cos \theta_{np}); \\ B = & j \cos(\cos \theta_n \cos(90 - \theta_{np})); \\ C = & 90 - \theta_n; \end{aligned} \quad (4)$$

j – замедление ТС, м/с²;

$I_x, I_y, I_z, I_{xy}, I_{yz}, I_{zx}$ – компоненты момента инерции по соответствующим осям;

θ_n и θ_{np} – углы Брайнта;

$\Delta\omega$ – изменение угловой скорости, рад/с;

m – масса ТС, кг.

Представленная математическая модель была интегрирована в аппарат МОР и позволила реализовать рабочую гипотезу исследования в комплексное гибридное решение.

Схема реализации гибридного решения объединяющего МОР ДТП с опрокидыванием ТС (случаи С+О, О+С и О) с РОП к оценке травмирования водителя и пассажиров представлена на рис.1.

Реализацию РОП в МОР целесообразно основывать на логит-моделях, разрабатываемых в Matlab и корректируемых при процессинге в МОР. Применение такого подхода, позволяет решать задачи типа А1, А2, Б1, Б2 и В, а также выполнять оценку риска в том числе и для задач не только реконструкции, но и для экспертной профилактики ДТП.

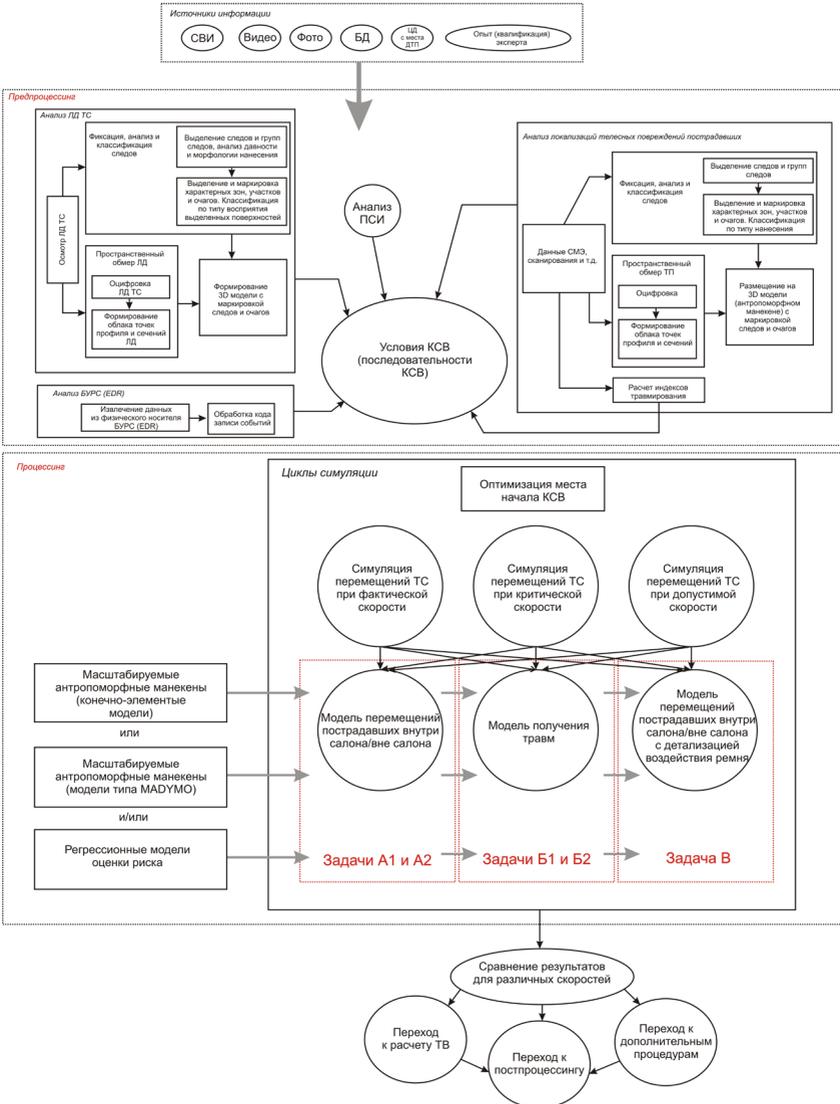


Рисунок 1 – Схема реализации гибридного решения объединяющего МОР и РОП

3. Методика расчета работы сил на непрерывное изменение угла разворота продольной оси ТС при производстве дорожно-транспортной экспертизы. Были предложены расчетные зависимости для расчета работы сил на непрерывное изменение угла разворота продольной оси ТС

против часовой стрелки при его перемещении на стадии отброса. В частности, для любых четырех (и более) случаев попадания угла γ' между направлением перемещения ТС и линией, направленной от его центра масс к середине передней оси, работа сил A_{MR} совершенная на непрерывное изменение угла разворота продольной оси ТС при перемещении на стадии отброса определяется по формулам приведенным в таблице 10.

Таблица 10 – Расчетные зависимости для расчета работы сил на непрерывное изменение угла разворота продольной оси ТС

№ п/п	Фаза угла	Формула для расчета
1	$0 < \gamma' \leq \frac{\pi}{2}$	$A_{MR} = m_T g \varphi' \left[\left(\frac{a-b}{L_n} S_C \frac{1 - \cos \gamma'}{\gamma'} \right) + \left(0,75 \cdot S_C \frac{\sin \gamma'}{\gamma'} + \frac{2ab}{L_n} \gamma' \right) \right]$
2	$\frac{\pi}{2} < \gamma' \leq \pi$	$A_{MR} = m_T g \varphi' \left[\left(\frac{a-b}{L_T} S_C \frac{1 - \cos \gamma'}{\gamma'} \right) + \left(0,75 \left(\frac{S_C^I}{\pi} + \frac{S_C^{II} (1 - \sin \gamma')}{2 \left(\gamma' - \frac{\pi}{2} \right)} \right) + \frac{2ab}{L_T} \gamma' \right) \right]$
3	$\pi < \gamma' \leq \frac{3}{2} \pi$	$A_{MR} = m_T g \varphi' \left[\left(\frac{a-b}{L_T} S_C \frac{1 - \cos \gamma'}{\gamma'} \right) + \left(0,75 \left(\frac{S_C^I}{\pi} + \frac{S_C^{II}}{2} - \frac{S_C^{III} \sin \gamma'}{2(\gamma' - \pi)} \right) + \frac{2ab}{L_T} \gamma' \right) \right]$
4	$\frac{3}{2} \pi < \gamma' \leq 2\pi$	$A_{MR} = m_T g \varphi' \left[\left(\frac{a-b}{L_T} S_C \frac{1 - \cos \gamma'}{\gamma'} \right) + \left(0,75 \left(\frac{S_C^I + S_C^{II} + S_C^{III}}{\pi} - \frac{S_C^{IV} (1 + \sin \gamma')}{2 \left(\gamma' - \frac{3}{2} \pi \right)} \right) + \frac{2ab}{L_T} \gamma' \right) \right]$

где m – масса ТС с учетом загрузки, кг; g – ускорение свободного падения, $g \approx 9,81$ м/с²; a – расстояние от центра масс автомобиля до его передней оси, м; b – расстояние от центра масс автомобиля до его задней оси, м; L_T – колесная база ТС, м; γ – угол между направлением движения автомобиля и лучом, направленным от центра масс автомобиля к середине его передней оси; S_C^i – i -ый участок траектории центра масс автомобиля, на котором угол γ изменился в соответствующей четверти оборота.

С целью верификации предложенного метода расчета работ сил, были отобраны 10 ДТП из экспертной практики ИБДД СПбГАСУ, в которых исследование скорости движения не производилось, но имеющийся объем исходных данных был достаточен для целей данного исследования. Сравнение разработанной методики с действующей показано в таблице 11.

Таблица 11 – Результаты расчета по предложенной и общепринятой методикам

№	Расчет работы сил по действующей общепринятой методике				Расчет работы сил по предлагаемой методике	
	Работа сил на перемещение, Дж	Работа сил на разворот, Дж	Суммарная работа, Дж	Скорость ТС, км/ч	Суммарная работа, Дж	Скорость ТС, км/ч
1	99657,3	26683,4	126340,8	49,3	24553,4	21,7
2	63073,4	35880,6	98954,0	39,2	21523,9	18,3
3	46322,0	13974,7	60296,8	35,5	35049,7	27,1
4	415893,0	145030,0	560923,0	83,2	157013	44,0
5	46756,9	13448,3	60205,2	31,7	35295,1	24,3
6	59152,3	19553,2	78705,6	37,4	44723,6	28,2
7	186607,3	71182,8	257790,1	69,3	65364,3	34,9
8	88985,3	29668,1	118653,4	41,1	67510,8	31,0
9	107794,7	12754,1	120548,9	40,0	81020,8	32,8
10	67431,5	17855,7	85287,2	43,4	34012,9	27,4

Кроме того, были выбраны 12 натуральных краш-тестов для которых известны скорости в момент контакта, а также затраты скорости на деформации и на перемещения и разворот после выхода из контакта, Для всех выбранных тестов были произведены расчеты работы сил по действующей методике и по предлагаемой.

Из результатов сравнения значений расчетной скорости к моменту выхода из контакта (для выбранных случаев), определенных по действующей и предлагаемой методике расчета было получено, что используемая в общей практике производства экспертиз методика расчета работ сил на перемещение и разворот существенно завышает (в среднем на 15÷20 км/ч) фактическое значение скорости в момент выхода из контакта и как следствие оказывает влияние на дальнейший расчет скорости к моменту столкновения.

Сравнение значений полученных по предложенной методике расчета с тестовыми значениями показывает отклонение расчетной скорости к моменту выхода из контакта в пределах 5% от фактического значения.

4. Методика расчета работы сил на опрокидывание ТС при производстве дорожно-транспортной экспертизы. На основе выполненного

анализа экспериментальных данных была разработана методика расчета работы сил на совместное перемещение, разворот и вращение ТС при опрокидывании, использующая следующее выражение расчета полной работы сил:

$$A_{\text{опр}} = A_{MR} + \frac{m \cdot g \cdot \Delta\omega \cdot \varepsilon \cdot k_r^2}{25,92 \cdot r \cdot (\varepsilon \cdot \sin \theta - \cos \theta)}, \quad (5)$$

где A_{MR} , m , g , – см. выше; $\Delta\omega$ – угловая скорость, рад/с; r – радиус обочерчивания контактной зоны (расстояние от центра масс к точке контакта в четверти оборота), м; k_r – радиус гирации, м; ε – коэффициент сцепления в зоне скольжения; θ – угол вращения продольной оси.

Сравнение полученных значений показано в таблице 12.

Таблица 12 – Результаты расчета по предложенной и общепринятой методикам

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

При этом следует отметить, что в 70% расчетных случаев, выбранных для верификации, было установлено, что до опрокидывания имело место превышение максимально допустимой скорости движения, при этом данное превышение не могло быть установлено при расчете действующим методом.

5. Методика оптимизации области фактического расположения места контакта объектов исследования на основе коэволюционных генетических алгоритмов. Коэволюционный генетический алгоритм (КГА) с вертикальным наложением был экспериментально реализован в Matlab R2020b. Реализация предложенного метода к задаче оптимизации области начала КСВ и начала опрокидывания была представлена специализированной

процедурой в рамках МОР, которая ранее не была выделена в процессинге как самостоятельное решение.

Для анализа эффективности предлагаемого метода оптимизации были отобраны 10 ДТП (5 случаев С + О и 5 случаев О + С) в которых место контакта ОИ было определено как область большой площади, внесение которой в масштабную схему места ДТП не позволило дать категоричный вывод о положении точки начала КСВ. Результаты оценки эффективности предлагаемого метода оптимизации, по площади расчетной области и по критерию категоричности вывода о местоположении точки начала КСВ показаны в таблице 13.

Таблица 13 – Результаты оценки эффективности методов оптимизации

№	Вид ДТП	Оптимизация по действующим методикам		Оптимизация КГА с вертикальным наложением популяций	
		Площадь расчетной области, м ²	Категоричность полученного решения	Площадь расчетной области, м ²	Категоричность полученного решения
1	С + О	7,6	нет	0,8	да
2		8,2	нет	1,1	да
3		10,4	нет	2,2	да
4		9,1	нет	1,4	да
5		5,6	нет	0,8	да
6	О + С	9,6	нет	2,7	да
7		12,4	нет	4,1	да
8		16,6	нет	3,4	да
9		24,3	нет	4,2	да
10		16,5	нет	3,4	да

Обобщая полученные результаты, применение предлагаемого метода оптимизации, с применением КГА с вертикальным наложением популяций, показало свою эффективность в сравнении с оптимизацией методами, положенными в базовые алгоритмы PC-Crash, по параметру конечной площади оптимизированной области внутри исходной расчетной, а также по критерию категоричности полученного решения.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основные научно-практические результаты диссертационного исследования:

1. Впервые определены закономерности изменения категоричности выводов ДТЭ от объема (качества) исходной ПСИ и методов решения,

а также изменения вариативности выводов ДТЭ относительно различных методов оптимизации применяемых численных методов расчета;

2. Составлена математическая модель перемещений ТС при опрокидывании учитывая потери энергии при опрокидывании, которая внедрена в новую комплексную процедуру МОР механизма опрокидывания ТС, представленную как гибридное (совмещенное) решение с РОП, позволяющее производить оценку травмирования водителя и пассажиров при опрокидывании ТС;

3. Разработана методика учета работ сил на совместное перемещение ТС в контакте и непрерывное изменение угла разворота ТС при его перемещении на стадии отброса, использование которой в практике производства ДТЭ позволят увеличить точность расчета скорости движения ТС до ДТП (включая расчет скорости на всех стадиях механизма ДТП) на 15–20% по сравнению с действующей методикой;

4. Разработана методика расчета работы сил совершаемой при опрокидывании ТС, в зависимости от фактического механизма опрокидывания, которая позволяет повысить точность пространственно-временного анализа перемещений ТС при опрокидывании и получать более точные значения скорости перемещения ТС перед началом опрокидывания (до 30% по сравнению с действующей методикой);

5. Разработана и апробирована методика оптимизации расчетного местоположения точки контакта объектов исследования в ДТЭ на основе кооперативных генетических алгоритмов, использование которой в экспертной практике позволяет увеличить категоричность выводов ДТЭ при определении места столкновения на 80% (за счет существенного снижения площади области местоположения фактической точки начала КСВ).

6. Применение предлагаемого метода оптимизации расчетной области фактического начала КСВ, с применением КГА с вертикальным наложением популяций, показало свою эффективность по времени выполнения оптимизации (в среднем в 2,6 раза) и по точности получения конечной (оптимизированной) области фактического КСВ (в среднем в 2,4 раза) в сравнении с оптимизацией методами, положенными в базовые алгоритмы PC-Crash.

7. При решении экспертных задач вида А1, А2, Б1, Б2 и В предложенный метод, основанный на гибридном решении МОР с РОП для оценки травмирования водителя и пассажиров при опрокидывании ТС показывает свою эффективность при сопоставимой точности результата за счет сокращения времени производства ДТЭ в 1,3–2,2 раза по предложенным зависимостям оценки риска в сравнении с действующими методами.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ

В изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК РФ

1. Васильев Я. В., Воронин В. В. Методика расчета работы сил на непрерывное изменение угла разворота продольной оси ТС при производстве дорожно-транспортной экспертизы // Вестник гражданских инженеров. 2021. №3 (86). С. 134–138. (0,68 п.л.).
2. Васильев Я. В., Воронин В. В. Применение коэволюционных генетических алгоритмов в задачах установления места контакта объектов исследования в экспертизе ДТП // Вестник гражданских инженеров. 2021. №4 (87). С. 113–121. (0,72 п.л.)
3. Васильев Я.В., Воронин В. В. Методика расчета работы сил на опрокидывание ТС при реконструкции ДТП // Вестник гражданских инженеров. 2021. №6 (89) С. 158–164. (0,72 п.л.).
4. Воронин В. В. Методика расчета базового компонента риска травмирования при опрокидывании автомобиля в частных задачах дорожно-транспортной экспертизы // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 1 (90). С. 130–135. (0,68 п.л.).

В изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Sciens

5. Stanislav Evtukov, Yaroslav Vasilev, Vseslav Voronin and Egor Golov Differentiating the stiffness of the side of the car. MATEC Web Conf., 341 (2021) 00035. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/202134100035> (0,72 п.л.).

Монографии

6. Васильев Я.В., Воронин В.В., Евтюков С.А. Теоретические и практические основы формирования критериев оценки уровней летнего содержания дорог при производстве дорожно-транспортной экспертизы. –СПб.: Издательский дом Петрополис, 2019. – 176 стр. (11 п.л.)
7. Васильев Я.В., Воронин В.В. Концепция риск-ориентированного подхода к производству дорожно-транспортной экспертизы в границах имитационной системы зимнего содержания дорог. СПб: ИД «Петрополис», 2020. – 124 с. (7,75 п.л.).

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 13.07.2022. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 82.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.