

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*

**ВАСИЛЬЕВ ЯРОСЛАВ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ И ЭКСПЕРТНОЙ  
ПРОФИЛАКТИКИ ДТП С УЧАСТИЕМ ПЕШЕХОДОВ**

2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант:  
д.т.н., профессор  
Евтюков Сергей Аркадьевич

Санкт-Петербург – 2025 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                                                                                                                                           | 6   |
| ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВ<br>СОСТОЯНИЙ СИСТЕМЫ ОПУС .....                                                                                                                                         | 22  |
| 1.1. Основные проблемы и пути их решения при внедрении ВАТС .....                                                                                                                                                        | 22  |
| 1.2. Оценка готовности транспортной отрасли к цифровой<br>трансформации .....                                                                                                                                            | 29  |
| 1.3. Роль и место МОР в ДТЭ и ЭП ДТП с участием пешеходов,<br>эволюционный прогноз развития от МОР к платформам ЦД.....                                                                                                  | 32  |
| 1.4. Концепция системы сбора и анализа данных о ДТП с наездом на<br>пешехода с применением цифровых технологий моделирования и<br>реконструкции ДТП, при введении количественной оценки<br>неопределенности знаний ..... | 39  |
| 1.5. Теоретический и понятийный аппарат оценки состояний системы<br>ОПУС в эволюции от ВАДС в ОБДД к отображению пространств<br>состояний ОПУС.....                                                                      | 49  |
| 1.6. Онтология предметной области исследования .....                                                                                                                                                                     | 61  |
| 1.7. Принципы цифровизации процессов взаимодействия подсистем с<br>учетом пространства состояний системы ОПУС .....                                                                                                      | 68  |
| 1.8. Выводы по Главе 1 .....                                                                                                                                                                                             | 79  |
| ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩЕГО<br>АППАРАТА АНАЛИЗА ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ В<br>ДТЭ И ЭП ПО ДТП С УЧАСТИЕМ ПЕШЕХОДОВ.....                                                                              | 82  |
| 2.1. Общий анализ выполненных ДТЭ по ДТП с участием пешеходов..                                                                                                                                                          | 82  |
| 2.2. Анализ типовых задач ДТЭ с участием пешехода.<br>Специализированные задачи анализа травмирования .....                                                                                                              | 98  |
| 2.3. Анализ влияния точности методов фиксации ПСИ и погрешности<br>измерений на результаты ДТЭ и ЭП ДТП.....                                                                                                             | 104 |
| 2.4. Методические основы применения индексов травмирования в<br>задачах ДТЭ, ЭП ДТП и ПБ ТС и ЭДО .....                                                                                                                  | 114 |

|                                                                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.5 Выводы по Главе 2 .....                                                                                                                                            | 119 |
| ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ<br>МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОМ ПОДХОДЕ К ДТЭ И ЭП ДТП С<br>УЧАСТИЕМ ПЕШЕХОДОВ.....                                            | 121 |
| 3.1. Критическая оценка существующей методологии сбора и анализа<br>данных по ДТП.....                                                                                 | 121 |
| 3.2. Базовый метод расчета импульса сил в анализе профилей ускорений<br>моделей и натурных объектов .....                                                              | 125 |
| 3.3. Моделирование отбрасывания тела пешехода и критика<br>статистических моделей. Анализ ТВ в ДТЭ .....                                                               | 135 |
| 3.4. Особенности анализа первичного и вторичного травмирования<br>пешеходов .....                                                                                      | 152 |
| 3.5. Имитационная гибридная модель тела человека для анализа<br>травмирования и методика параметризации геометрии факторной<br>группы А для реализации МОР в ДТЭ ..... | 163 |
| 3.6. Сценарии стадии сближения .....                                                                                                                                   | 169 |
| 3.7. Выводы по Главе 3 .....                                                                                                                                           | 172 |
| ГЛАВА 4. КОМПЛЕКС МЕТОДИК ПРОИЗВОДСТВА ДТЭ ПО ДТП С<br>УЧАСТИЕМ ПЕШЕХОДОВ.....                                                                                         | 175 |
| 4.1. Методика расчета затрат скорости на КСВ на базе суррогатных<br>КЭМ.....                                                                                           | 175 |
| 4.2. Методика расчета риска травмирования .....                                                                                                                        | 179 |
| 4.3. Методика оптимизации цифровой модели механизма ДТП<br>выполненной при МОР генетическим алгоритмом.....                                                            | 185 |
| 4.4. Результаты оценки эффективности применения разработанного<br>комплекса методик в сравнении с действующими методами ДТЭ ...                                        | 199 |
| 4.5. Выводы по Главе 4 .....                                                                                                                                           | 206 |
| ГЛАВА 5. КОМПЛЕКС МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ<br>ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭП ДТП И ПБ ТС В ОПУС .....                                                                                     | 207 |

|                                                                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1. Метод оптимизации геометрии продольных и поперечных сечений фронтальной части кузова легковых ТС на базе генетического алгоритма .....                                                | 207 |
| 5.2. Метод расчета оценки удобства обслуживания (безопасности доступа к обслуживанию в состояниях ОПУС) для пешеходов с вариацией факторов оценки.....                                     | 213 |
| 5.3. Метод определения уровней безопасности участка дороги по оценке прогнозируемого времени выхода (ПВВ) .....                                                                            | 219 |
| 5.4. Результаты оценки эффективности применения разработанного комплекса методов в сравнении с действующими методами ЭП ДТП с участием пешеходов .....                                     | 227 |
| 5.5. Выводы по Главе 5 .....                                                                                                                                                               | 232 |
| ГЛАВА 6. ОПИСАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО ПОЛИМОДЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА И ПРОГНОЗ ЭТАПОВ ПЕРЕХОДА К ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЕ ОБДД В РАМКАХ ЭВОЛЮЦИИ ОТ ВАДС К ОПУС .....                                       | 234 |
| 6.1. Функциональная структура универсального полимодельного комплекса на виртуальном полигоне и процедуры МОР для его применения в роли инструмента решения задач ДТЭ, ЭП ДТП и ОБДД ..... | 234 |
| 6.2. Этапы и мероприятия перехода от УПМК к цифровой платформе ОБДД в рамках эволюции от ВАДС к ОПУС .....                                                                                 | 238 |
| 6.3. Роль и место анализа самоподобных состояний в эволюции от УПМК до цифровой платформы ОБДД .....                                                                                       | 247 |
| 6.4. Выводы по Главе 6 .....                                                                                                                                                               | 252 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                                                                                                                           | 254 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....                                                                                                                                             | 258 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....                                                                                                                                                     | 260 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ .....                                                                                                                                                                           | 282 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А (Терминологический аппарат исследования по Главе 1).....                                                                                                                      | 283 |

|                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б (Результаты дешифрации каналов записи натурных тестов по Главе 3).....       | 298 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В (Результаты верификации ГМAM и виртуальных тестов по Главе 3).....           | 325 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г (Модели Matlab/Simulink и коды комплекса программ по Главам 1,3,4 и 5) ..... | 329 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д (Акты внедрения) .....                                                       | 394 |

## ВВЕДЕНИЕ

Исследования в области безопасности дорожного движения (БДД), равно как и исследования в пространстве, образуемом между теоретическими, методическими и технологическими основами производства дорожно-транспортной экспертизы (ДТЭ) и экспертной профилактикой (ЭП) ДТП с участием пешеходов, как правило, занимают особую нишу в научных изысканиях, но при этом в ракурсе на ДТЭ рассматривается преимущественно как обособленный инструмент обеспечения контроля за исполнением участниками дорожного движения предъявляемых к ним норм регулирования, а именно требований ПДД Российской Федерации. На настоящий момент сложилась ситуация, в которой ЭП ДТП с участием пешеходов, основанной именно на результатах производства ДТЭ, не отведено места в разработке мероприятий по повышению пассивной безопасности как конструкций транспортных средств (ТС), так и технических средств обеспечения БДД (ОБДД), направленных в первую очередь на снижение травмирования пешехода. Это вызвано разобщенностью между результатами ДТЭ и исследованиями в области указанных конструкций, так как сформировался устойчивый стереотип о минимальной достаточности весьма общего объема требований, предъявляемых к конструкции ТС и технических средств ОБДД. Поэтому на настоящий момент в РФ профилактику ДТП с участием пешеходов в целом следует отнести к практике сугубо фискального характера, а само понятие ЭП ДТП сильно оторвалось от реальной практики ДТЭ, связанной именно с реконструкцией механизма ДТП.

Наблюдаемый разрыв между фактическим травмированием в ДТП пешеходов и нормативными требованиями к пассивной безопасности ТС по защите пешеходов, особенно ярко проявляется в случаях эксцентричных контактов и движения ТС со скоростью выше допустимой по ПДД РФ. Данная лакуна, в большинстве своем игнорируемая во многих

исследованиях, должна восполняться с учетом развития современных технологий, материалов и средств моделирования наезда и при переходе к высокоавтоматизированных ТС (ВАТС) должна существенно возрасти, но для этого уже сейчас необходимо выработать механизмы решения данной проблемы.

Вместе с тем, следует обратить внимание на то, что в сфере производства ДТЭ сохраняется обширная область методических «белых пятен», где нет научно-обоснованных методик решения конкретных экспертных задач. При этом, общая тенденция в производстве ДТЭ смещена в настоящее время в сторону развития методов анализа видеоматериалов, фиксирующих момент ДТП. На настоящий момент в РФ складывается ситуация, в которой в реальной практике производства ДТЭ доминирующее положение занимают трасолго-автотехнические методики, разработанные более чем 30-40 лет назад. При этом они почти не имеют научно-практического аппарата для целого ряда технологически возможных в 21 веке решений, таких как: учет фактических данных о ДТП, т.к. пространственно-следовая информация (ПСИ) с места ДТП чаще всего имеет ряд неопределенностей, оценки рисков травмирования (оперирование понятием индекса травмирования), использования модельно-ориентированного подхода, применения цифровых двойников для контроля и прогнозирования изменений в системе Участник дорожного движения – Автомобиль – Дорога – Среда (УДДАДС), использования современных методов оптимизации, машинного обучения для формирования стратегий управления эффективностью ДТЭ, ЭП ДТП и пассивной безопасностью (ПБ) ТС и элементов дорожной инфраструктуры (ЭДО).

В этой связи, следует отметить, что система ВАДС, или ВАДС – Пешеход (ВАДСП) на настоящий момент весьма хорошо описана и изучена, имеется существенное количество работ посвященных ей, более того она ротируется как основной концепт состояний в системе ОБДД. В большинстве своем, система ВАДС и ее производные вариации, рассматривается сугубо

как фундаментальная основа, не трансформирующаяся в своей сущности, однако следует признать что формально она устарела еще 10–15 лет назад, так как слои вышележащих систем на этом фундаменте сильно изменились, приобретая новые черты, ранее им не свойственные, в частности при появлении прецедентов цифровизации процессов как внутри, так и снаружи ВАДС. Кроме того, энтропийный подход к оценке ОБДД, основанный на системе ВАДС, также наследует те же признаки и при существенном объеме своей разработанности, уже не отвечает современности, так как не использует оценку анизотропии свойств информации и состояний в ОБДД. Т.е. как правило, уделяется внимание только снижению меры хаоса в системе, но не уделяется внимания мере порядка.

Это порождает назревающую необходимость перехода от композиции систем, основанных на системе ВАДС (ВАДСП или УДДАДС) к новым решениям теоретического описания взаимодействия процессов в ОБДД, для чего требуется не только сформировать новый понятийный аппарат, но и перейти к новому подходу, сменив парадигму и ракурс взгляда на исследуемые процессы, учитывая что при полной цифровой трансформации отрасли и переходе к ВАТС уровня 5 ВАДС должно эволюционировать в систему Объект – Пространство – Условие – Событие (ОПУС). Данная эволюция требует научного теоретического аппарата обоснования и детальной разработки ее перспектив для решения задач повышения эффективности как ДТЭ и ЭП ДТП с участием пешеходов, так и для ОБДД и ПБ ТС и ЭДО.

Цели и задачи, установленные Указом Президента Российской Федерации от 21.07.2020 № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» непосредственно затрагивают необходимость совершенствования ОБДД, которое, среди прочих мер, должно осуществляться путем повышения эффективности ДТЭ и ЭП по ДТП с участием пешеходов, а также путем повышения эффективности мер, направленных как на ПБ ТС и ЭДО, так и на ОБДД в

целом. При этом переход от МОР к УПМК и далее к цифровым платформам в ОБДД, требует разработки нового аппарата оценки состояний, сформированный для системы ОПУС (полисистемы ОПУС), теоретические и методологические средства которой будут направлены как на цифровизацию процессов взаимодействия подсистем в ОБДД с оценкой самоподобия пространств ее состояний, так и в целом на снижение травмирования пешеходов в ДТП. Последнее, имеет весьма важное значение для социально-экономического уровня в РФ в целом, так как по данным ГИБДД РФ ежегодно на дорогах РФ гибнет в среднем более 3,5 тыс. пешеходов – граждан нашей страны и более 33,8 тыс. пешеходов получают травмы, различной степени тяжести, резко снижающие их трудовую и жизненную активность.

Таким образом, актуальность обозначенного направления и тематики исследований крайне высока, так как их проблемная область, охватывая национальный уровень, требует выработки новых научно-обоснованных, комплексных методических решений народно-хозяйственной проблемы, проявляющейся в стабильно высоком уровне травмирования пешеходов в ДТП, что оказывает существенное влияние на состояние системы ОБДД и ее развитие в дальнейшем.

**Степень разработанности проблемы.** В исследование системы ВАДС и спектра проблем ОБДД, а также в исследование методов производства ДТЭ и ЭП ДТП с участием пешеходов существенный вклад внесли следующее отечественные ученые Б.Е. Боровский [1], В.Н. Добромиров [2], Э.Р. Домке [3], С.В. Дорохин [4-5], С.А. Евтюков [6-8], С.С. Евтюков [9-10], С.В. Жанказиев [11-13], П.А. Кравченко [14], Н.М. Кристи [15-16], В.Э. Клявин [17-19], С.В. Кущенко [20], В.Н. Ложкин [21], О.В. Лукошавичене [22], А.И. Петров [23-25], И.Г. Малыгин [26], А.Н. Новиков [27-29], И.А. Новиков [28-31], А.М. Плотников [32], В.В. Сильянов [33], Ю.Б. Суворов [34,35], А.В. Терентьев [36] и другие. Среди зарубежных исследований в области эффективности ДТЭ и ЭП ДТП с участием пешеходов следует отметить

работы таких ученых, как: М. Батиста [37], Д.Сирл [38], Б.Рэнделл [39], А.Мозер [40], Д.Вуд [41,42], Ч. Симс [43,44], А.Реза [45], С. Платини [45]. Однако, указанный выше разрыв между ЭП ДТП и ДТЭ, этими работами не устраняется, при этом в этих работах не рассматривается назревающая необходимость перехода от ВАДС в пространство состояний для системы ОПУС.

**Цель исследования:** разработка научных основ обеспечения эффективности дорожно-транспортной экспертизы, экспертной профилактики ДТП с участием пешеходов и повышения пассивной безопасности ТС на основе цифровизации процессов взаимодействия данных подсистем в ОБДД, с учетом пространства состояний системы ОПУС.

**Задачи исследования:**

1. Разработать систему ОПУС, дать ее описание и выполнить сравнение с системой ВАДС, определить ее границы внутри факторного пространства и связей слоев ДТЭ – ЭП ДТП – ПБ ТС и ЭДО – ОБДД;
2. Разработать теоретический и понятийный аппарат оценки состояний системы ОПУС в условиях ее возникновения при эволюционном переходе от системы ВАДС в обеспечении дорожного движения и определить понятийный аппарат оценки эффективности ДТЭ и ЭП ДТП в онтологии предметной области исследования;
3. Разработать основные принципы информационного взаимодействия подсистем ДТЭ, ЭП ДТП с участием пешеходов и повышения ПБ ТС и ЭДО в ОБДД;
4. Выявить взаимосвязи между категоричностью полученных выводов по результатам ДТЭ, объемом исходной пространственно-следовой информации (ПСИ) и эффективностью применения методик ДТЭ, в условиях перехода к модельно-ориентированной реконструкции (МОР) при ДТЭ и ЭП ДТП с участием пешеходов;
5. Определить зависимости изменения базовых индексов травмирования пешеходов при первичном и вторичном контактно-следовых

взаимодействиях (КСВ), изменения риска травмирования, изменения коэффициентов жесткости фронтальной части транспортных средств, а также выявить классификационные правила при типизации антропоморфных данных в гибридной модели антропоморфного манекена (ГМАМ) и при параметризации геометрии фронтальной части кузова, для формирования суррогатных конечно-элементных моделей (КЭМ);

6. Разработать математический аппарат, определяющий изменение критериев эффективности ДТЭ в условиях развития субпроцедур МОР и формирования универсального полимодельного комплекса (УПМК) для виртуального полигона (ВП), реализующего усовершенствованный комплекс методик производства ДТЭ по ДТП с участием пешеходов;

7. Разработать комплекс методов обеспечения эффективности ЭП ДТП и повышения ПБ транспортных средств в полисистеме ОПУС, включающий: метод оптимизации геометрии продольных и поперечных сечений фронтальной части кузова легковых транспортных средств на базе генетического алгоритма; метод расчета оценки удобства обслуживания (безопасности доступа к обслуживанию для пешеходов); метод определения уровней безопасности участка дороги по оценке прогнозируемого времени выхода (ПВВ) пешехода из опасной зоны.

**Объект исследования:** состояние подсистем ДТЭ, ЭП ДТП и ПБ ТС и ЭДО в ОБДД, основанной на системе ОПУС в процессе формирования цифровой платформы обеспечения безопасности дорожного движения на автомобильном транспорте.

**Предмет исследования:** процессы цифровизации информационной сущности причинно-следственных связей между механизмом стадий сближение – контактно-следовое взаимодействие – отброс в ДТП, сопряженных с травмированием пешехода на этих стадиях, методами их реконструкции в ДТЭ, методами их профилактики и методами определения требований к ПБ ТС и ОТИ, с учетом пространства состояний системы

ОПУС и эффективностью экспертной профилактики ДТП с участием пешеходов.

**Рабочая гипотеза:** реализация механизмов обеспечения эффективности подсистем ДТЭ, ЭП ДТП и ПБ ТС и ЭДО в цифровой платформе обеспечения БДД на автомобильном транспорте РФ, основанной на системе ОПУС, является комплексным средством повышения уровня БДД, пассивной безопасности ТС и ЭДО, а также снижения травмирования пешеходов при ДТП с их участием.

**Научная новизна:**

1. Впервые разработана система ОПУС, дано ее описание и сравнение с системой ВАДС, определены ее границы внутри факторного пространства и связей слоев ДТЭ – ЭП ДТП – ПБ ТС и ЭДО – ОБДД.

2. Впервые разработан теоретический и понятийный аппарат оценки состояний системы ОПУС в условиях ее возникновения при эволюционном переходе от системы ВАДС в обеспечении дорожного движения и определен понятийный аппарат оценки эффективности ДТЭ и ЭП ДТП в онтологии предметной области исследования.

3. Разработаны основные принципы информационного взаимодействия подсистем ДТЭ, ЭП ДТП с участием пешеходов и повышения ПБ ТС и ЭДО в ОБДД.

4. Выявлены взаимосвязи между категоричностью полученных выводов по результатам ДТЭ, объемом исходной ПСИ и эффективностью применения методик ДТЭ, в условиях перехода к МОР при ДТЭ и ЭП ДТП с участием пешеходов;

5. Впервые определены зависимости изменения базовых индексов травмирования пешеходов при первичном и вторичном КСВ, изменения риска травмирования, изменения коэффициентов жесткости фронтальной части транспортных средств, а также выявлены классификационные правила при типизации антропоморфных данных в ГМАМ и при параметризации геометрии фронтальной части кузова, для формирования суррогатных КЭМ.

6. Впервые разработан математический аппарат, определяющий изменение критериев эффективности ДТЭ в условиях развития субпроцедур МОР и формирования УПМК для ВП, реализующего усовершенствованный комплекс методик производства ДТЭ по ДТП с участием пешеходов.

7. Впервые разработан комплекс методов обеспечения эффективности ЭП ДТП и повышения ПБ транспортных средств в полисистеме ОПУС, включающий: метод оптимизации геометрии продольных и поперечных сечений фронтальной части кузова легковых транспортных средств на базе генетического алгоритма; метод расчета оценки удобства обслуживания (безопасности доступа к обслуживанию для пешеходов); метод определения уровней безопасности участка дороги по оценке ПВВ пешехода из опасной зоны.

**Теоретическая значимость** работы содержится в разработанных научных основах обеспечения эффективности дорожно-транспортной экспертизы и экспертной профилактики ДТП с участием пешеходов, с учетом прогнозирования развития системы ВАДС в пространства состояний системы ОПУС, путем формирования комплексного решения, включающего методы и методики, использующие новые и усовершенствованные инструментари, новый понятийный аппарат, реализация которых при переходе от МОР через ВП к цифровым платформам, путем применения универсального полимодельного комплекса, а также теоретического описания пространств состояний и новых принципов информационного взаимодействия исследуемых подсистем, опирается на не применявшиеся ранее к поставленным задачам методические и информационные подходы, такие как теория пространств состояний, суррогатные конечные элементы, нейронные сети в машинном обучении и методы ранжирования.

**Практическая значимость работы** заключается в разработке комплексного методического аппарата, направленного на повышение эффективности ДТЭ и используемого при оценке эффективности мероприятий ЭП ДТП с участием пешеходов, а также реализованного в

УПМК на виртуальном полигоне (ВП), которые могут быть применены как при оценке уровня пассивной безопасности ТС и ЭДО, так и при совершенствовании ОБДД, в частности при разработке и внедрении локальных и комплексных мероприятий по ОБДД и профилактике ДТП с участием пешеходов как государственными, так и частными организационными структурами.

**Методология и методы исследования** основана на данных натурных краш-тестов и численных экспериментов по наездам на пешеходов (на манекены, тела пешехода и на кадавров), а также опирается на анализ результатов, представленных в научно-практических публикациях и исследованиях, выполненных ранее отечественными и иностранными учеными в сфере реконструкции, анализа и профилактики ДТП с участием пешеходов, а также в области оценки эффективности мероприятий по ОБДД, используя методы статистического анализа фактических данных о состоянии подсистем ДТЭ и ЭП ДТП с участием пешеходов, а также используя методы системного анализа, сложных систем, пространств состояний, математического моделирования, нейронных сетей, кластерного и регрессионного анализов.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Система ОПУС, ее описание и границы, прогноз ее возникновения в эволюции от системы ВАДС, внутри факторного пространства и связей слоев ДТЭ – ЭП ДТП – ПБ ТС и ЭДО – ОБДД.

2. Теоретический и понятийный аппарат оценки состояний системы ОПУС в условиях ее возникновения при эволюционном переходе от системы ВАДС в обеспечении дорожного движения и понятийный аппарат оценки эффективности ДТЭ и ЭП ДТП в онтологии предметной области исследования;

3. Основные принципы информационного взаимодействия подсистем ДТЭ, ЭП ДТП с участием пешеходов и повышения ПБ ТС и ЭДО в ОБДД;

4. Взаимосвязи между категоричностью полученных выводов по результатам ДТЭ, объемом исходной ПСИ и эффективностью применения методик ДТЭ, в условиях перехода к МОР при ДТЭ и ЭП ДТП с участием пешеходов;

5. Зависимости изменения базовых индексов травмирования пешеходов при первичном и вторичном КСВ, изменения риска травмирования, изменения коэффициентов жесткости фронтальной части транспортных средств, а также классификационные правила при типизации антропоморфных данных в ГМАМ и при параметризации геометрии фронтальной части кузова, для формирования суррогатных КЭМ;

6. Математический аппарат, определяющий изменение критериев эффективности ДТЭ в условиях развития субпроцедур МОР и формирования УПМК для ВП, реализующего усовершенствованный комплекс методик производства ДТЭ по ДТП с участием пешеходов, включающий: методику расчета затрат скорости на КСВ на базе суррогатных КЭМ; методику расчета риска травмирования; методику оптимизации цифровой модели механизма ДТП выполненной при МОР генетическим алгоритмом;

7. Комплекс методов обеспечения эффективности ЭП ДТП и повышения ПБ транспортных средств в полисистеме ОПУС, включающий: метод оптимизации геометрии продольных и поперечных сечений фронтальной части кузова легковых транспортных средств на базе генетического алгоритма; метод расчета оценки удобства обслуживания (безопасности доступа к обслуживанию для пешеходов); метод определения уровней безопасности участка дороги по оценке ПВВ пешехода из опасной зоны.

**Достоверность и обоснованность** результатов диссертационного исследования определены реализованными целью и задачами в выделенной онтологии предметной области исследования и обеспечиваются полученными практическими результатами исследований, реализующими заложенные в работу теоретические основы, на основе применения методов

статистического, кластерного и регрессионного анализов, моделирования сложных систем, пространств состояний, системного анализа, нейронных сетей и машинного обучения, а также результатами выполненных процедур верификации и валидации УПМК и его отдельных компонентов, отсутствием противоречий с ранее опубликованными исследованиями в области ДТЭ и ЭП ДТП, что также подтверждено публикациями в изданиях ВАК РФ и Scopus (WoS), демонстрацией и обсуждением результатов на отечественных и международных научно-практических конференциях.

**Апробация работы:** основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на 8–16-й Международных конференциях – «Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах» (СПбГАСУ, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018, 2020, 2022, 2024); 6–11-й Международной научно-практической конференции «Реконструкция и экспертиза ДТП», ИБДД (СПбГАСУ, 2014, 2016, 2018, 2020, 2022, 2024); 69-й международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторов «Актуальные проблемы БДД» (СПбГАСУ, 2016); межведомственной научно-практической конференции «Актуальные проблемы управления деятельностью по обеспечению безопасности дорожного движения (состояние, проблемы, пути совершенствования)», Санкт-Петербургский университет МВД России (2018, 2019); 78-й Международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, посвященной 90-летнему юбилею университета, 27-31 января 2020, (Москва); Межведомственной научно-практической конференции «Общественная безопасность в сфере дорожного движения: профессиональная подготовка и организационно-правовые инструментарии», 26-27 февраля 2020, (Санкт-Петербургский университет МВД России, 2020); межведомственном круглом столе «Исследование возможностей применения беспилотных летательных аппаратов для получения первичной информации о ДТП», 19 марта 2020, (Орловский юридический институт Министерства внутренних дел Российской

Федерации имени В.В. Лукьянова); 8-й и 10-й Международной научно-практической конференция «Информационные технологии и инновации на транспорте», Орловский государственный университет им. И.С.Тургенева (2022, 2024).

**Реализация результатов исследований:** подтверждается актами внедрения в процессы выполнения ДТЭ и ЭП ДТП в деятельности организаций: МИП «СПбГАСУ-Дорсервис», ГАИ УМВД РФ по Кировскому району СПб, ООО «Северо-западный региональный центр экспертиз», ООО Ростовский экспертно-правовой центр «ДОН», ООО «Департамент Экспертизы и оценки», СПАО «Ресо-Гаратия», САО «ВСК», АО «Совкомбанк Страхование», АО «АльфаСтрахование». А также результаты диссертационной работы внедрены в образовательный процесс при обучении студентов и аспирантов в: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», о чем также свидетельствуют соответствующие Акты внедрения.

За время подготовки диссертации в учебный процесс также были внедрены результаты работы, вошедшие в комплекс учебно-методических изданий, по которым были получены Премии:

- премия Правительства Санкт-Петербурга в области образования за 2019 год;
- премия Правительства РФ в области образования за 2023 год.

Результаты работы использованы в разработке (под руководством автора) и внедрении следующих национальных стандартов и ОДМ:

ГОСТ Р 59292-2021 Дороги автомобильные общего пользования. Требования к уровню летнего содержания. Критерии оценки и методы контроля

ГОСТ Р 59401-2021 Дороги автомобильные общего пользования. Ограничивающие пешеходные и защитные ограждения. Общие технические условия

ГОСТ Р 59610-2021 Дороги автомобильные общего пользования. Пешеходные переходы в разных уровнях. Общие требования. Правила размещения

ГОСТ Р 71410-2024 Дороги автомобильные общего пользования. Опоры дорожных информационных знаков и стационарного электрического освещения. Общие технические условия

ОДМ 218.4.033-2017 Методические рекомендации по созданию системы опытно-экспериментальных полигонов на действующей сети автомобильных дорог федерального значения для внедрения новых технологий и материалов в дорожном хозяйстве в различных природно-климатических зонах Российской Федерации.

**Информационная база исследования:** опирается на действующую на момент написания работы нормативно-правовую и методическую базу, а также на статистические материалы, результаты натурных краш-тестов с манекенами тела человека и кадаврами, результаты численных экспериментов, данные по фактическим ДТП с участием пешеходов, использовавшиеся при выполнении ДТЭ в охватываемый исследованием период, а также на публикации отечественных и зарубежных ученых в области ОБДД, ДТЭ, ЭП ДТП и ПБ ТС и ЭДО.

**Личный вклад автора** обусловлен формированием онтологии предметной области исследований в границах поставленной цели и задач исследований, в рамках которых предложенные комплексные решения обеспечивают эффективность ДТЭ и ЭП ДТП с участием пешеходов, а также заключается в теоретическом обосновании возникновения условий для перехода от МОР к ВП и далее к цифровым платформам, а также заключается в разработке и реализации комплекса методик ДТЭ, комплекса методов ЭП ДТП, в формировании теоретических основ оценки пространства состояний в системе ОПУС и цифровизации процессов взаимодействия исследуемых подсистем в ОБДД, в разработке УПМК для нужд ЭП ДТП с участием пешеходов.

**Область исследования** соответствует требованиям паспорта научной специальности 2.9.5 «Эксплуатация автомобильного транспорта»: п.1 Место и роль автомобильного транспорта в транспортной системе страны, взаимодействие с природой, обществом, прогнозы и пути развития автотранспортного комплекса страны; 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 67 работах общим объемом 484,4 п.л. (авторских – 176,1 п.л.), в том числе 20 – в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ, 2 – в Международных индексируемых базах Scopus и Web of Science. Издано 17 монографий, 7 учебных пособий; получено 3 свидетельства государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 169 наименований. Содержит 412 страниц, 59 иллюстраций, 56 таблиц и 130 страниц приложений.

Во **введении** представлена актуальность исследования проблем ДТЭ с учетом латентности существующей проблематики слабой связанности результатов ДТЭ с практикой ЭП ДТП и разработки мер по ПБ ТС и ЭДО, а также ОБДД в целом, дано описание народно-хозяйственной проблемы вникающей на острие вовлеченности пешеходов в процессы БДД и высоким уровнем их травмирования в ДТП. Приведены цели и задачи исследования, изложены типовые структурные элементы по ГОСТ 7.0.11.

В **первой главе** представлен теоретический аппарат оценки пространства состояний системы ОПУС, с отображением условий перехода к

ОПУС в эволюции от ВАДС в задачах ОБДД, описана онтология предметной области исследования и определены границы исследования. Показано факторное пространство связей между слоями ДТЭ – ЭП ДТП – ПБ ТС и ЭДО – ОБДД. Изложены принципы цифровизации процессов взаимодействия подсистем дорожно-транспортной экспертизы, экспертной профилактики ДТП с участием пешеходов и повышения пассивной безопасности ТС в ОБДД, с учетом пространства состояний системы ОПУС.

Во *второй главе* отражены результаты обработки данных по фактическим ДТЭ с участием пешеходов, выполненных за период с 2010 по 2024, позволившие выявить взаимосвязи между категоричностью полученных выводов по результатам ДТЭ, объемом исходной пространственно-следовой информации (ПСИ) и эффективностью применения методик ДТЭ, в условиях перехода к МОР при производстве ДТЭ и разработке мероприятий по ЭП ДТП с участием пешеходов. Показаны общие теоретические положения по реконструкции механизма ДТП с участием пешеходов.

В *третьей главе* выполнено формирование имитационной гибридной модели тела человека для анализа травмирования, определены сценарии сближения на базе анализа фактических ДТЭ. Представлены результаты по численным экспериментам по комплексному набору сценариев сближения пешехода и ТС и определены зависимости изменения базовых индексов травмирования (ASI, AIS, NIC) пешеходов при первичном и вторичном травмировании. Показаны результаты натурных экспериментов по определению времени реакции пешеходов, приведены уточненные зависимости изменения темпа движения в различных ДТС.

В *четвертой главе* изложен комплекс из 3 методик производства ДТЭ по ДТП с участием пешеходов, показан аппарат комплекса, его практические приложения и результаты применения методик в сравнении с действующими (общепринятыми) в производстве ДТЭ.

В *пятой главе* представлен комплекс из 3 методов обеспечения эффективности ЭП ДТП и ПБ ТС и ЭДО в ОПУС, обоснована эффективность его применения ЭП ДТП с участием пешеходов.

В *шестой главе* обосновано создание универсального полимодельного комплекса (УПМК) для виртуального полигона для оценки ПБ ТС, в роли инструмента решения задач ДТЭ, ЭП ДТП и ОБДД, представлены этапы и мероприятия перехода от УПМК к цифровой платформе ОБДД в рамках эволюции от ВАДС к ОПУС, определены роль и место анализа самоподобных состояний в эволюции от УПМК до цифровой платформы ОБДД.

В *заключении* представлены основные научно-практические результаты выполненных исследований, отражающие результаты практического применения комплекса из 3 методов и комплекса из 3 методик, применения УПМК на ВП, а также даны общие рекомендации к применению и дальнейшему развитию нового направления научных исследований по оценке состояний на принципах редукции самоподобия и анизотропности/изотропности пространств полисистемы ОПУС в контексте как разработанных научных основ обеспечения эффективности ДТЭ и ЭП ДТП с участием пешеходов, так и методов управления БДД.

В *приложениях* приведен разработанный терминологический аппарат исследования по Главе 1, показаны результаты дешифрации каналов записи натурных тестов по Главе 3, приведены результаты верификации ГМАМ и виртуальных тестов по Главе 3, отражены блок-схемы моделей Matlab/Simulink, а также коды комплекса программ на языке Python по Главам 1,3,4 и 5, а также показаны копии Актов внедрения.

## **ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВ СОСТОЯНИЙ СИСТЕМЫ ОПУС**

### **1.1. Основные проблемы и пути их решения при внедрении ВАТС**

Разработка и ввод в эксплуатацию на дорогах общего пользования автономных транспортных средств в первую очередь отвечает цели и основным задачам Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, установленным Указом Президента Российской Федерации от 01.12.2016 № 642, учитывает приоритетные направления государственной политики в сфере транспорта, закрепленные в Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года [46].

Автомобильный транспорт является комплексной и динамично развивающейся отраслью народного хозяйства, в которой реализуются передовые научно-технические достижения. Внедрение инновационных технологий автономного управления транспортными средствами уже в ближайшем будущем может коренным образом изменить состояние дел в автомобильной индустрии и перевозках.

Высокий уровень аварийности и тяжести последствий дорожно-транспортных происшествий (далее - ДТП) наряду с повышением уровня загрузки автомобильных дорог являются наиболее острыми проблемами в сфере дорожного движения, препятствующими устойчивому развитию транспортной системы Российской Федерации. Одним из перспективных направлений повышения безопасности дорожного движения и улучшения организации дорожного движения является внедрение технологий автономных ТС.

Ряд крупных зарубежных автопроизводителей объявили, что к уже 2020–2025 году планируют вывести на рынок серийные полностью автономные ТС. Ведущие мировые концерны IT-отрасли ведут активные разработки и исследования в сфере программного обеспечения и сетевого

взаимодействия автономного транспорта. Министерство транспорта США осуществляет разработку основных положений законодательства о допуске к участию в дорожном движении автономных ТС в 2016–2020 гг.

В частности, согласно доклада Арьяна ван Влиет, представителя департамента планирования организации RDW (Королевство Нидерланды) в ближайшие двадцать лет с автомобилем произойдёт гораздо больше изменений, чем за последние сто лет. В первую очередь это будет связано с развитием автономных ТС и передачей функций управления автомобилем от водителя к искусственному интеллекту [47].

В качестве примера можно привести проект European Truck Platooning Challenge, целью которого является пропаганда беспилотных грузовиков, то есть наглядная демонстрация возможности эксплуатации автономных ТС на дорогах общего пользования. Грузовики шести крупнейших производителей выехали из трёх европейских стран (Германии, Бельгии и Швеции), чтобы объединиться в одну колонну и, проехав через всю континентальную Европу, достигнуть конечной точки маршрута – порта Роттердама (Нидерланды). Общая протяжённость маршрута должна была составить 2 100 км. Рулевым, то есть управляемым человеком, был первый грузовик в колонне, который по сети Wi-Fi взаимодействовал с остальными машинами, не имевшими водителей, задавая им необходимые параметры движения. Установленное на всех грузовиках программное обеспечение позволяло организовать чёткое и слаженное движение по трассам в соответствии с законодательством той или иной страны [47].

В России существует целый ряд нерешенных вопросов, которые касаются не только технического, но также организационного и нормативного правового обеспечения внедрения новых технологий, выявления, оценки и снижения вероятных рисков, включая прогнозирование и анализ социально-экономических рисков и последствий для автотранспортной отрасли при массовом внедрении автономных и беспилотных транспортных средств.

Очевидно, что на настоящий момент необходимо подготовить и внести предложения по изменению и дополнению действующего законодательства для развития и внедрения технологий автономных ТС и связанной с ними дорожно-транспортной инфраструктуры. При этом, важным вопросом являются исследования возможных изменений в принципах работы общественного транспорта с учетом развития сервисов совместного (кооперативного) использования автомобилей с автономным управлением.

Для внедрения автономных ТС в сферу коммерческих перевозок пассажиров и грузов первую очередь должны быть разработаны предложения по оптимальным и эффективным методам внедрения инноваций в автотранспортной сфере, необходимых для обеспечения ускоренного развития транспортно-технологической инфраструктуры и повышения конкурентоспособности транспортной системы Российской Федерации в целом; разработаны проекты документов, необходимые для внесения соответствующих изменений в Транспортную стратегию Российской Федерации на период до 2030 года, а также предложения по совершенствованию законодательства на федеральном и региональном уровнях; предложена дорожная карта мероприятий по развитию перспективного направления автономных ТС.

Очевидно, что внедрение должно сопутствовать разработке систем управления, и может быть реализовано только поэтапно.

Поэтапный переход от классического управления к автономному предполагает [47]:

- постепенное насыщение ТС разрозненными электронными системами;
- объединение всех систем, узлов и агрегатов в организационную структуру и единое информационное поле;
- распространение интеллектуальных систем, способных более интенсивно вмешиваться в процесс управления и принимать решения за

водителя, а также более глубокое встраивание ТС в единую интеллектуальную транспортную сеть;

– планомерное развитие всех вышеперечисленных этапов до уровня беспилотного адаптивного управления ТС.

При этом поэтапное внедрение автономных ТС (ВАТС) в сферу автомобильных перевозок пассажиров и грузов будет способствовать:

– повышению безопасности перевозочного процесса из-за снижения рисков возникновения ДТП по причине «человеческого фактора» путем исключения ошибок и невнимательности, вождения в состоянии усталости, алкогольного и наркотического опьянения;

– улучшению организации дорожного движения путем повышения равномерности загрузки улично-дорожной сети, увеличения интенсивности транспортных потоков и скоростей движения, снижения потребления топлива и уровня вредных выбросов, сокращения простоев автомобилей;

– повышению комфорта и мобильности для тех групп населения, которые не могут управлять обычными автотранспортными средствами, или использовать традиционные средства передвижения.

Сдерживающими факторами широкого применения автономных транспортных средств являются [47]: сложность и высокая стоимость управляющего устройства, вынужденного учитывать множество объектов на дороге; невозможность в настоящее время использовать автономные ТС в условиях плохой видимости и экстремальных погодных условиях; юридические и организационные проблемы; необходимость защиты от кибервмешательства.

Но в качестве одной из ключевых проблем, препятствующих активному развитию автономных ТС в России, можно также указать отсутствие в нашей стране собственных промышленных технологий по программному обеспечению и аппаратной части. Кроме этого, актуальными являются следующие проблемы: отсутствие на территории РФ «умных» дорог – невозможность реализации технологий V2V и V2X; отсутствие

законодательного регулирования производства и эксплуатации автономных автомобилей (РФ, ЕАЭС, СНГ); отсутствие специализированного полигона и специального оборудования для корректного и полноценного испытания автономных автомобилей; отсутствие отечественной компонентной базы и промышленных программных решений для автономно и дистанционно управляемых автомобилей [47].

Таким образом, анализ имеющихся ограничений формирования, обеспечения безопасного функционирования и устойчивого развития автотранспортного комплекса Российской Федерации с учетом поэтапного внедрения автономных ТС должен включать:

- анализ мирового опыта и ключевых тенденций в разработке, опытной и коммерческой эксплуатации автономных ТС, разработку понятийного аппарата и системных подходов, обеспечивающих широкое внедрение автономных ТС и современных систем помощи водителям;

- анализ возможных вариантов развития автотранспортной системы Российской Федерации при поэтапном внедрении технологий автономного транспорта, выявление перспективных областей использования автономных ТС и основных препятствий для применения автономных ТС в перевозочном процессе;

- анализ существующих и разрабатываемых международных нормативных правовых актов в сфере автономного автомобильного транспорта с целью оценки возможности использования их идеологии и основных положений в законодательстве Российской Федерации либо внесения соответствующих изменений;

- разработку структурной модели безопасного функционирования и устойчивого развития автотранспортной системы Российской Федерации с использованием автономных ТС, включающей перечень областей, в которых необходимо обеспечить регламентацию использования автономных ТС (допуск к эксплуатации, административная ответственность, автострахование

и др.) с целью выработки предложений по разработке или актуализации соответствующих нормативных правовых актов;

– выявление, классификацию и предварительную оценку рисков поэтапного внедрения автономных ТС, их влияния на безопасное функционирование автомобильного транспорта, оценку повышения экономической эффективности отрасли при поэтапном внедрении автономных ТС, предварительную оценку социальных и общественных аспектов массового появления автономных ТС.

И соответственно, при разработке научно-обоснованных предложений по формированию нормативной правовой базы для поэтапного внедрения автономных транспортных средств в автотранспортный комплекс Российской Федерации должны включать:

– предложения по структуре и содержанию концепции безопасного взаимодействия автономных ТС с другими участниками дорожного движения, научно обоснованных предложений по установлению механизмов ответственности разработчиков, владельцев и операторов автономных ТС на основании различных сценарных вариантов внедрения и развития автономных ТС;

– план первоочередных мероприятий по развитию автономных ТС (перечень основных мер законодательного регулирования, исследование возможностей серийного производства и коммерческого использования автономных ТС с привлечением венчурных инвестиций и механизмов государственно-частного партнерства);

– предложения по структуре и содержанию нормативных правовых документов, регламентирующих порядок тестирования и условия опытной эксплуатации автономных ТС в реальных дорожных условиях;

– предложения по нормативному закреплению особенностей организации движения автономных ТС в городских условиях, за городом и на автомагистралях, включая поправки в Правила дорожного движения и Венскую Конвенцию о дорожных знаках и сигналах (1968г.) в части

установления дополнительных требований к дорожным знакам и дорожной разметке, научно-обоснованные предложения по учету использования систем автономного и автоматического вождения при разработке программ комплексного развития транспортной инфраструктуры и комплексных схем организации дорожного движения;

- предложения по разработке порядка допуска автономных ТС к коммерческой эксплуатации на дорогах общего пользования, учитывающего требования к дорожной инфраструктуре и интеллектуальным транспортным системам, обеспечивающим функционирование автономных ТС;

- предложения по разработке требований к профессиональной подготовке операторов автономных ТС, включая требования, регламентирующие использование автономных ТС гражданами с ограниченной мобильностью;

- предложения по развитию сервисов совместного использования автономных ТС для эффективного использования дорожного пространства, увеличения пассажиропотока и комфорта пользователей.

Согласно Прогноза научно-технологического развития России [48], уровень разработанности данного направления перспективного развития автотранспорта в РФ можно оценить как 3 из 5, это означает, что в РФ уже имеются отдельные конкурентоспособные коллективы [49], осуществляющие исследования на высоком уровне и способные на равных сотрудничать с мировыми лидерами.

В связи с чем, для выполнения вышеизложенных первоочередных задач, необходимо выполнить пробное имитационное моделирование (методами системной динамики и с созданием дискретно-событийных моделей в рамках сценариев) и окончательное имитационное моделирование (с учетом результатов первых результатов апробации на дорожной сети общего пользования), с составлением графического (хронологического) отображения сценариев развития в системной динамике, а также выполнить работы по экспертному опросу с обработкой методами математической

статистики, с составлением плана моделирования. При создании структурной модели необходимо выполнить дополнительно работы по анализу топологии систем (взаимосвязи и форм влияния) объектов и областей регламентации, с определением и составлением таблицы, раскрывающей перечень факторов сдерживания внедрения в действующих нормативных и правовых актах;

При чем еще до создания предложений по разработке порядка допуска автономных ТС к коммерческой эксплуатации на дорогах общего пользования дополнительно необходимо выполнить работы по разработке требований к опытно-экспериментальным участкам на действующей сети автодорог, а также при разработке предложений по развитию сервисов совместного использования автономных ТС необходимо дополнительно выполнить системный анализ опыта внедрения каршеринга частными компаниями в РФ, а также выполнить экспертный опрос и моделирование, для оценки психо-социальной подготовленности населения к таким сервисам, а также самому явлению автономных ТС.

## **1.2. Оценка готовности транспортной отрасли к цифровой трансформации**

В декабре 2021 года премьер-министр Михаил Мишустин подписал распоряжение, которым утвердил стратегию цифровой трансформации транспортной отрасли до 2030 года. В рамках стратегии цифровой трансформации транспортной отрасли в нее будут внедрены технологии виртуальной и дополненной реальности, искусственного интеллекта, обработки больших данных и информационного моделирования, блокчейна и др. Эти технологии среди прочего будут применяться:

- при анализе дорожного трафика, формировании цифровых моделей транспортной обстановки и оптимального построения маршрутов транспортных средств;
- при создании системы сквозного обмена электронными перевозочными документами, создании национального цифрового контура

логистики экосистемы цифровых транспортных коридоров Евразийского экономического союза; единого центра управления транспортным комплексом, в том числе решений для сбора обращений граждан; цифровых двойников существующих и новых объектов транспортной инфраструктуры с использованием продвинутых технологий визуализации (виртуальная и дополненная реальность); системы моделирования транспортных потоков;

- при создании и эксплуатации информационной системы учёта и планирования работ (затрат) на проектирование, строительство, ремонт и содержание объектов транспортной инфраструктуры (в том числе предиктивная аналитика технического обслуживания и ремонта объектов транспортной инфраструктуры).

Среди шести главных проектов цифровой трансформации транспортной отрасли в регионах, которые выделило Министерство Транспорта РФ, значатся:

- цифровое управление транспортной системой РФ. Этот проект призван повысить эффективность и безопасность транспортного комплекса. Инструменты достижения задачи:
  - ситуационно-информационный центр Минтранса (СИЦ);
  - онлайн мониторинг транспортных средств, включая беспилотники;
  - онлайн мониторинг объектов транспортной инфраструктуры;
  - интеграция с национальной системой управления данными.
- цифровизация транспортной безопасности. Задача заключается в том, чтобы повысить информационную безопасность транспортного комплекса. Это обеспечит контроль и анализ состояния защищённости транспортного комплекса в онлайн-режиме.
- цифровые двойники объектов транспортной инфраструктуры. Задача инициативы – мониторинг состояния объектов транспортной инфраструктуры. Для этого необходимо создать 3D модели всех объектов транспортной инфраструктуры; перейти на систему

планирования строительства и содержания объектов транспортной инфраструктуры с применением BIM-технологий (Building information modeling).

21 июня 2023 года президент РФ Владимир Путин провел совещание с членами Правительства РФ, на котором министр транспорта Виталий Савельев доложил главе государства о работе по цифровизации транспортного комплекса страны. Как заявил глава Минтранса РФ, в условиях санкционного давления ведомство в ускоренном режиме предприняло меры по переходу отрасли на отечественные цифровые решения. По словам министра транспорта РФ, «цифровизация транспорта осуществляется на уровне лучших мировых трендов и технологий. Мы обладаем колоссальным потенциалом в этой сфере, и я абсолютно уверен, что наши специалисты будут и дальше демонстрировать высокий профессионализм и уровень компетенций [50].

Building Information Modeling (BIM), в России также известный как технология информационного моделирования (ТИМ) – это целостная концепция, включающая технологии и процессы управления данными какого-либо проекта (процесса) в цифровом формате на протяжении всего жизненного цикла этого проекта (процесса). Это интегрированная методология цифрового исследования как физических, так и функциональных характеристик объектов проекта (процесса), основанная на использовании многомерной цифровой модели, для решения задач организации, хранения и использования данных для различных целей на всех стадиях жизненного цикла проекта (процесса). Такая технология способствует более быстрому и экономичному анализу процесса, сводя к минимуму воздействие на окружающую среду, риски для безопасности труда и вытекающие из этого риски. ТИМ позволяет получить не только с 3D модель, но и с базу данных о технических, технологических, экономических, инженерно-строительных, архитектурных, сметных характеристиках объектов-участников процесса, что позволяет в любой момент времени

получать полную актуальную информацию и документацию. Кроме того, скоординированная и последовательная информация обеспечивает инновационный дизайн, лучшую визуализацию и моделирование реальных условий, создание более точной документации, а также облегчает планирование, управление и мониторинг.

В основе технологии информационного моделирования лежит параметрическое моделирование, ускоряющее создание и модификацию модели, позволяя анализировать и оценивать результаты на основе верификации и валидации.

ТИМ как платформа совместного управления, основанная на 3D моделях, может оптимизировать процедуры управления и повысить эффективность мер по контролю качества и безопасности, а также повысить степень и эффективность управленческой информации. Методология ТИМ может успешно применяться для планирования безопасности и предотвращения несчастных случаев и, следовательно, для управления безопасностью.

### **1.3. Роль и место МОР в ДТЭ и ЭП ДТП с участием пешеходов, эволюционный прогноз развития от МОР к платформам ЦД**

На настоящий момент в РФ, как и целом в мире, действующий методический аппарат, а также реализующее его программное обеспечение (ПО) для анализа видеозаписей момента ДТП при производстве дорожно-транспортных экспертиз (ДТЭ) в условиях перехода к модельно-ориентированной реконструкции (МОР) механизма ДТП не использует возможности проверки сходимости модели с фактическими перемещениями объектов исследования (ОИ) в механике ДТП.

Вышеуказанное явление связано в первую очередь с отсутствием готовых решений по формированию единой цифровой платформы для производства экспертного анализа и профилактики ДТП. При этом, также

следует обратить внимание, что уровень цифровой инфраструктуры в области ДТЭ в целом следует отнести к незрелому уровню, так как фактически мы имеем дело с не связанной инфраструктурой, в которой практически нет цифровизации даже отдельных процессов. Таким образом, можно сказать что в РФ, на настоящий момент в области экспертной деятельности по ДТП (производство ДТЭ и выполнение экспертной профилактики ДТП) еще не завершился полностью этап автоматизации отдельных процедур исследования, который является необходимой ступенью в переходе к цифровизации и от нее к цифровой трансформации. В этой связи, переход к МОР существенно ограничен в текущих условиях и сильно сдерживается отсутствием комплексных научно-методических решений по цифровизации не только применяемых процедур МОР, но в области разработки новых решений по производству ДТЭ и разработке мероприятий при экспертной профилактике ДТП.

Методические разработки, посвященные анализу видеозаписей при производстве ДТЭ, в большинстве своем основаны на базовых принципах фотограмметрии, применяемой по кадрам. Следует обратить внимание, что оценке погрешности измерений расстояний и скорости перемещений наблюдаемых на видеозаписи объектов как правило, не уделяется должного внимания, либо такие оценки отсутствуют вообще.

Среди имеющихся зарубежных публикаций следует отметить [51], однако в данной работе нет полноты раскрытия потенциала применения верификации модели с видеозаписью моделируемого ДТП, а также нет интеграции с данными получаемыми при фотограмметрии, при цифровом сканировании ОИ и места ДТП. Кроме того, в большинстве своем в этих работах полностью отсутствует математическое описание предложенных процедур.

Как правило, все методики, используемые для анализа видеозаписей событий ДТП, реализованы в специализированном ПО, имеющим широкий арсенал работы с кадрами записи и их воспроизведением, обработкой,

анализом, но которое не позволяет сравнить результаты моделирования с наблюдаемым событием (ДТП) по пространственно-временным характеристикам перемещений объектов исследования.

Сугубо общий анализ публикаций в данной области [52-59], позволяет отметить, что имеющееся ПО для анализа видеозаписей момента ДТП, имеет следующие общие черты: как правило, такое ПО обособлено в отдельный, весьма узко специализированный продукт, который не интегрируется в среды численного моделирования перемещений ОИ ДТЭ и не имеет собственного аппарата для моделирования, таким образом, нет возможности одновременно использовать внешние данные ГИС, облака данных сканирования места ДТП и результатов модельных построений совместно с видеорядом; инструментарий такого ПО не позволяет производить наложение нескольких записей (например, кодированных в MPEG4); в арсенале средств такого ПО нет возможности использовать в по-кадровом анализе объемных данных, например полученных при лазерном сканировании ОИ и/или места исследуемого ДТП. Фактическое отсутствие единой цифровой платформы для проведения ДТЭ приводит к необходимости использовать не менее трех-четырех отдельных программных продукта при реконструкции одного ДТП.

Соответственно в случае полностью адекватной воспроизводимой реальности МОР ДТП наложение модельного множества на область наблюдаемого должно полностью совпасть в границах ракурса и условий съемки наблюдаемого в видеоряде.

Тогда задачу верификации модели относительно имеющейся видеозаписи момента ДТП можно свести к задаче минимизации разности между маркерами видеоряда момента ДТП и видеоряда МОР.

Методология МОР представляет собой современный подход к анализу ДТП, основанный на компьютерном моделировании и интеграции разнородных данных. В отличие от традиционных методов, МОР позволяет минимизировать субъективность за счет строгой формализации процессов и

использования математического аппарата для оценки точности. Ключевые проблемы существующих методик – нечеткость пространственно-следовой информации (ПСИ), отсутствие оценки погрешностей и фрагментарность данных – решаются в МОР через системную обработку информации и верификацию моделей.

Как отмечалось выше стремительный рост видеофиксации событий ДТП, в настоящее время приводит к доминированию выводов по скорости движения ТС до ДТП на основании видеотехнических исследований, что фактически следует признать сдерживающим фактором для перехода к МОР и развития его методов. В свою очередь, на настоящий момент для МОР по [9] нет описания процедур верификации моделей реконструкции ДТП.

В этой связи введем базовые теоретические принципы верификации результатов МОР ДТП путем сравнения МОР с данными видеозаписей ДТП, а именно за счет наложения кадров видеозаписи на модельную сцену и сравнение ошибки между положением маркерных точек на объектах исследования (в частности ТС и пешеходе) модели относительно видеозаписи. При этом процедура верификации должна включать следующие этапы: устранение дисторсии на записи, сведение кадрирования сцены МОР и видеозаписи программными видеотехническими средствами, наложение кадров видеозаписи на модельную сцену, выделение маркерных точек (например, углы ТС, суставы пешехода и т.д.), расчет ошибок позиционирования и корреляции траектории перемещений для выбранных стадий в механизме ДТП (например, КСВ, отбрасывание тела), коррекция модели при оценке сходимости ниже 0,8.

Для количественной оценки точности МОР в сравнении с видеозаписями ДТП предлагается использовать следующие метрики:

Ошибка позиционирования маркерных точек:

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( (x_i^{mod} - x_i^{vid})^2 + (y_i^{mod} - y_i^{vid})^2 \right)}, \quad (1.1)$$

где  $x_i^{mod}, y_i^{mod}$  – координаты точек в модели,

$x_i^{vid}, y_i^{vid}$  – координаты на видео,

$N$  – число контрольных точек.

Коэффициент корреляции траекторий:

$$R = \frac{Cov(T_{mod}, T_{vid})}{\sigma_{T_{mod}} \cdot \sigma_{T_{vid}}}, \quad (1.2)$$

где  $T_{mod}$  и  $T_{vid}$  – траектории объектов в модели и на видео,

$Cov$  – ковариация,

$\sigma$  – стандартное отклонение.

Тогда интегральная оценка достоверности МОР (сходимости):

$$D = 1 - \frac{\sum \Delta_i + (1-R)}{2}, \quad (1.3)$$

где  $D \in [0;1]$  ( $1$  – полное совпадение).

Объединенная процедура МОР для ДТЭ с учетом введенных оценок будет включать:

Сбор данных (ПСИ (следы, деформации), видео, показания участников ДТП, параметры ТС и дороги, фотограмметрия для устранения неточностей первичного осмотра.

Предпроцессинг: построение 3D-сцены с учетом подсистем: ТС, пешеход, дорога, а также трасологический анализ для определения зоны контакта.

Процессинг: итеративное моделирование с вариацией параметров (скорость, угол удара), оценка технической возможности избежать ДТП.

Постпроцессинг: сравнение с видеоданными через метрики  $\Delta$ ,  $R$ ,  $D$ , формирование выводов о причинах ДТП и травматизма.

Следует отметить, что накопление данных по результатам МОР формирует базу для прогнозирования ДТП и разработки превентивных мер в рамках ЭП ДТП. Ограничением применения также являются: высокая зависимость от качества исходных данных и вычислительных ресурсов. Таким образом, МОР ДТП – это обязательный инструмент для ДТЭ и ЭП ДТП, но ее эффективность напрямую зависит от строгости методологии и интеграции с объективными данными, такими как видеозаписи. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию алгоритмов верификации и расширение базы параметров для моделирования.

С другой стороны, в ракурсе на переход от реконструкции ДТП к предикативному цифровому отражению событий (в том числе ДТП), рассмотрим переход и интеграцию методологии ДТЭ, основанной на МОР, в платформу ЦД.

Современная МОР представляет собой реактивную систему, где цифровая модель ДТП создается постфактум на основе собранных данных (ПСИ, видео, показаний). Однако развитие технологий Интернета вещей, периферийных вычислений и распределенных баз данных открывает путь к проактивной парадигме – платформе цифровых двойников (ЦД), где ДТП будет фиксироваться в реальном времени как состояние системы «Транспортная среда».

Этапы перехода:

1. Интеграция датчиков и Интернета вещей в транспортную инфраструктуру. Оснащение ТС, дорожного покрытия и пешеходов сенсорами (лидары, камеры, IMU-датчики). Примеры: датчики деформации в бамперах автомобилей фиксируют параметры удара (сила, угол) в момент столкновения; «умные» дорожные покрытия регистрируют следы перемещения / торможения через тензометрические сети.

2. Реализация динамических ЦД участников дорожного движения. Каждый объект (ТС, пешеход) имеет цифрового двойника, обновляемого в реальном времени. Данные передаются через V2X (Vehicle-to-Everything):

состояние ТС: скорость, ускорение, угол руля – из CAN-шины, пешеходы: траектория и скорость – с камер и смарт-устройств.

Событие ДТП моментально фиксируется как «снимок» состояний ЦД. При аварии платформа автоматически сохраняет: точные координаты и векторы движения всех объектов за 5–10 сек до/после события; параметры дорожных условий (коэффициент сцепления, освещенность); исключается этап реконструкции - данные уже являются цифровой моделью (ЦМ). При этом верификация может осуществляться через блокчейн-реестр, а для предотвращения манипуляций данные с датчиков записываются в распределенный леджер с временными метками, соответственно алгоритмы консенсуса гарантируют неизменность информации.

Ключевые отличия рассмотрения ДТП как события (состояния в процессе ДД) в МОР и при развертывании ЦД показаны в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Ключевые отличия рассмотрения ДТП как события (состояния в процессе ДД) в МОР и при развертывании ЦД

| № п/п | Критерий         | МОР                                        | Платформа ЦД                      |
|-------|------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|
| 1     | Временной режим  | Постфактум (реконструкция)                 | Реальное время (фиксация события) |
| 2     | Источник данных  | Ручной сбор ПСИ                            | Автоматизированные датчики        |
| 3     | Точность         | Зависит от качества ретроспективных данных | Погрешность $\leq 2\%$ (сенсоры)  |
| 4     | Скорость анализа | Часы/дни                                   | Минуты (автоматизированный отчет) |
| 5     | Функционал       | Установление причин ДТП                    | Предикативная аналитика рисков    |

Вышеизложенное, позволяет в прогнозируемой перспективе считать, что ЦД исключают необходимость реконструкции ДТП, превращая каждое событие в «цифровой слепок» реальности. Это явление будет иметь юридические последствия, а именно то, что данные ЦД станут неоспоримым доказательством в судах, требуя новых стандартов сертификации датчиков.

При этом возникнут этические риски: проблема приватности (отслеживание пешеходов) и зависимости от компаний поставщиков/обработчиков данных.

В целом блажащее будущее МОР ДТП видится в трансформации в инструмент для тренировки ИИ-алгоритмов ЦД на исторических данных.

Таким образом, переход к ЦД – неизбежный этап цифровизации транспорта. Уже сегодня необходимо разрабатывать нормативную базу и тестовые виртуальные полигоны для отработки технологий, чтобы к 2030-м годам обеспечить бесшовную интеграцию цифровых двойников в глобальную систему безопасности дорожного движения.

Резюмируя, можно сделать вывод о том, что проведение экспертизы ДТП преследует те же цели, что и ЭП ДТП и разработка мер по повышению ПБ ТС и ЭДО, в конечном итоге формирующие заключения по конкретным ДТП и накапливающая БД для дальнейших исследований. Однако наличие множества вовлеченных лиц, информации и факторов, влияющих на ее достоверность и полноту, усложняет процесс проведения работ, что выражается в сроках и достоверности полученных результатов. В связи с этим возникает первостепенная необходимость в цифровом сборе ПСИ с места ДТП и ОИ для полного перехода к МОР.

#### **1.4. Концепция системы сбора и анализа данных о ДТП с наездом на пешехода с применением цифровых технологий моделирования и реконструкции ДТП, при введении количественной оценки неопределенности знаний**

В обобщенном виде пространственно-следовая информация (ПСИ), предоставляемая на исследование судебному автотехническому эксперту, может быть охарактеризована как условно-определенная в минимально-достаточном для расчета объеме. Свойство ее условной определенности возникает из размытости и нечеткости категорий определения таких важных для расчета значений как, например, коэффициент сцепления, дальность

конкретной видимости и многих других, в том числе и повреждений ТС (в первичных документах оформляемых ГИБДД или следствием обычно это просто перечень, не всегда полный и не описывающий повреждение, который не достаточен для исследования, если ТС на момент исследования продано, утилизировано или отремонтировано, а фотоматериал по нему отсутствует).

Минимальная достаточность возникает из скудности технического оснащения и точности применяемых средств измерения при первоначальном процессе собора ПСИ (осмотр места ДТП, осмотр объектов исследования, выполнение следственных экспериментов и т.п.), при этом часто в представляемом на исследование судебному эксперту объеме ПСИ отсутствуют дополнительные данные влияющие на расчеты: величины фактических уклонов в месте ДТП, местоположения тела пешехода после ДТП и т.п.

При этом как в практике государственных судебных экспертов, так и практике коммерческих организаций, выполняющих дорожно-технические судебные экспертизы, фактически нет практики оценки погрешности вычислений, основанных на нечетких данных, выполняемых в рамках проведенных исследований экспертами, что формально не отвечает требованиям федерального закона 73-ФЗ [60], в части оценки достоверности результатов исследования. Накопление расчетной ошибки, связанной с изначальной погрешностью измерений при осмотре места ДТП, например, при расчете скоростей движения объектов исследования может приводить к результирующим значениям, сильно отличным от фактических [61,62].

В части задач, лежащих в области анализа и выявления места начала контактно-следового взаимодействия (КСВ) при расчетных значениях скоростей, накопление ошибки вычислений приводит к варьированию значений определяемых границ области фактического местоположения точки начала контакта. Кроме того, в большинстве случаев экспертами не уделяется должного внимания пути совместных перемещений объектов

исследования, коэффициентам восстановления и трения в контактной зоне (при моделировании в программных средах типа PC-Crash) при реконструкции ДТП, что также оказывает влияние на точность рассчитываемых значений пространственно-временных характеристик стадий механизма ДТП [61,62].

Ранее в [63-68] реализация типовой структуры исследований ДТП с участием пешеходов учитывала направления передачи информации и направления движения от подпроцессов внутри этапов, при этом этапы III и IV взаимосвязаны (путь в обе стороны), что подразумевает выполнение аналитических и моделирующих действий до достижения адекватности исследуемой ДТС) и накапливать информационную базу и опыт.

Мировая практика показывает, что методы нечеткой логики (МНЛ) получили широкое применение в автоматизированных системах управления автотранспортными средствами, а также в интеллектуальных транспортных системах (ИТС), управляющими дорожным движением в крупных городах. При этом, применительно к процессам анализа безопасности дорожного движения (БДД) целесообразно классифицировать применение МНЛ на решение задач управления сложными системами, имеющими множество факторов влияния, сложно прогнозируемых и/или имеющих множества неопределенных исходных данных (например: распознавание объекта контакта – «пешеход - иной объект» в системах пассивной безопасности, предназначенных для защиты пешехода при наезде) и на решение задач помощи в принятии решения, например, устранение искажений при фотограмметрическом определении фактического объема деформаций ТС. Наиболее описаны и успешно применяются электронные контроллеры на нечеткой логике, а также гибридные регуляторы, включающие контроллеры на нечеткой логике и нейронные сети в управлении транспортными потоками, двигателем ТС, его курсовой устойчивостью, ассистанс-системами ТС и в управлении элементами пассивной безопасности ТС (для задач определения начала события в случаях перехода опасной ДТС к аварийной,

определяемой для случаев опрокидывания, съезда (падения) в кювет и т.п. [69-71].

Кроме этих задач в анализе БДД, на настоящий момент имеется достаточно обширный опыт применения методов нечеткой логики в решении как прикладных, так и общетеоретических задач при реконструкции механизма ДТП [72-74]. Основными преимуществами применения математического аппарата теории нечетких множеств при реконструкции механизма ДТП является возможность оперировать как качественными, так и количественными показателями в условиях неопределенности, а именно неточности (фактический коэффициент сцепления в условиях места ДТП при оформлении происшествия не определяется, указывается состояние покрытия, при этом износ покрышек в протоколах места ДТП не указывается, что может давать разброс значений фактического замедления ТС при его торможении в расчетах эксперта до  $\pm 35\%$ [75]) и недостаточность исходных данных (например, наиболее часто встречающаяся ситуация, когда один или несколько объектов с места ДТП убраны, а на схеме ДТП указаны точки контакта со слов водителей, при этом трасологические признаки также не зафиксированы). Уровень полноты, качества и точности исходных данных можно в целом охарактеризовать как крайне низкий, создающий возможность внесения в процесс исследования субъективных искажений и полностью лишить точности инструментальный (цифровой) сбор первичной пространственно-следовой информации. В связи с тем, что при осмотре места ДТП сотрудниками полиции на настоящий момент все измерения производятся, как правило, в ручную, цифровые данные с места ДТП и с объектов исследования не снимаются и в большинстве случаев к моменту начала исследования, эксперту приходится оперировать с недостаточным объемом первичной информации, что связано, в первую очередь, с низким техническим оснащением процесса сбора (осмотра) информации с места ДТП и объектов исследования.

В условиях недостаточности исходных данных, а именно некачественного и неполноценного осмотра места ДТП и отсутствия объектов исследования в неизменном состоянии к моменту реконструкции ДТП автотехническим экспертом, существующие расчетные, включая итерационные, решения определения фактического местоположения точки контакта ТС в большинстве случаев не применимы.

Например, в наиболее распространенных случаях перекрестных ударов фактическая точка соударения не определяется экспертным путем, т.к. в первичном материале отсутствуют трасологические признаки, а расчет позволяет выделить доверительную зону большой площади, что приводит к разбросу значений скоростей ТС до  $V_{tc} = (\pm 20)$  км/ч в момент контакта [75]. В некоторых случаях это приводит к невозможности однозначно подтвердить или опровергнуть превышение максимально допустимой по ПДД скорости движения одним из водителей (в таком случае не представляется возможным определить находится ли превышение скорости движения в причинной связи с ДТП).

Например, при встречных контактах, когда известно конечное положение ТС, классические методы расчета, основанные на законе сохранения количества движения показывают высокую чувствительность к значениям исходных данных и при итерационном подборе точки пространства, столкновение в которой приводит к занятию зафиксированного после ДТП конечного положения, вывод в большинстве случаев не бывает категоричным, или возможен только в условиях решения краевой задачи, т.е. в минимальных значениях, т.к. методы оптимизации решения приводят к выделению некоторой условной области в границах проезжей части. Ее площадь существенно увеличивается в случае длительных фаз разлета и/или при наличии вторичных контактов.

При расчете  $V_{tc}$  в терминах работы сил на перемещение в этапах «сближение – контакт – разлет» многочисленные исследования позволяют говорить о высокой чувствительности данного метода расчета к точности определения коэффициента сцепления (особенно на стадии разлета, например, когда удар эксцентричен и, например, в ходе контакта одного из

колес заблокировано в деформированной зоне и/или разрушено вместе с подвеской). Позволяет говорить также о высокой чувствительности данного метода к точности определения фактической точки контакта, масс ТС, угла их взаиморасположения.

Вышеизложенное, делает целесообразной задачу расширения методологии реконструкции ДТП путем создания комплексного метода исследования механизма ДТП с использованием МНЛ, позволяющего эксперту в процессах анализа механизма ДТП учитывать и принимать решения в условиях неопределенности исходных данных. В этом случае она позволяет устранение недостатков действующих методов расчета перемещений объектов исследования при реконструкции ДТП. Такую задачу предложено включить в процессы анализа ДТП (получение – обработка – моделирование – представление) как аппарат МНЛ на этапах обработки и моделирования, для поддержки принятия решения экспертом. Схема определения области использования МНЛ в процессах реконструкции ДТП показана на рис.1.1.

Соответственно в рамках предлагаемой концепции количественной оценки неопределенности знаний в процессах обработки первичной информации и в процессах моделирования при реконструкции ДТП математические методы теории нечетких множеств могут быть использованы для решения следующих частных задач экспертных исследований:

- определение фактического значения коэффициента сцепления ( $\varphi$ ), с определением следующих функций принадлежности: состояния покрытия (сухое, мокрое, снег), его износа, износа покрышек колес, давления воздуха в шинах, угловой скорости вращения колес, скорости движения ТС ( $V_{\text{ТС}}$ ) [73-76];

- определение  $V_{\text{ТС}}$  при наезде на пешехода для случаев фронтальных контактов, позволяющих учитывать дальность отброса тела ( $L_{\text{от}}$ ) с определением следующих функций принадлежности: угол отброса, соотношение центра тяжести пешехода и высоты передней части капота, дальность отброса, массы и скорости пешехода ( $V_{\text{п}}$ ) и т.д.[77];

– определение  $V_{тс}$  при наездах на велосипедистов, движущихся попутно, в случаях когда удар носит хлыстовой характер, т.е. происходит между кузовными элементами правой стороны ТС и левой частью заднего колеса велосипеда и/или левыми частями тела велосипедиста (включая удары зеркалом заднего вида по кисти руки, левому локтю или по левой задне-боковой части груди, с определением следующих функций принадлежности: угол отброса тела и велосипеда, соотношение центра тяжести велосипедиста к высоте передней части капота,  $L_{от}$  и велосипеда ( $L_v$ ), массы и скорости велосипедиста ( $V_v$ ), режима движения ТС (в заторможенном состоянии или без него);

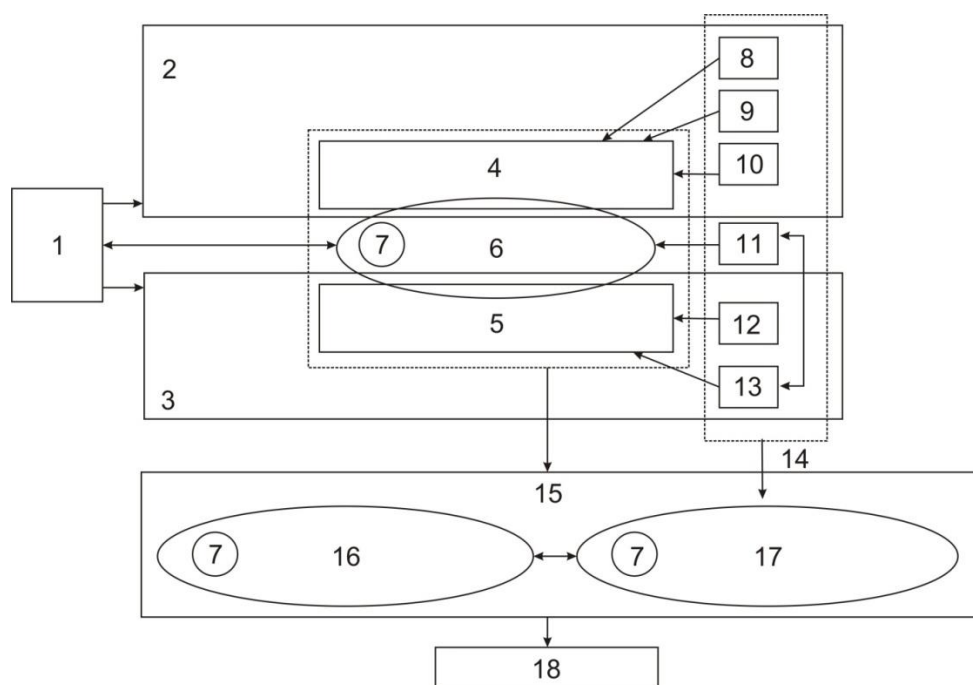


Рисунок 1.1 – Схема определения области использования МНЛ в процессах анализа (реконструкции) ДТП: 1 – Первичная пространственно-следовая информация с места ДТП; 2 – Обработка пространственно-следовой информации с места ДТП; 3 – Обработка пространственно-следовой информации с объектов исследования; 4 – Построение масштабного плана места ДТП; 5 – Построение масштабных моделей ТС; 6 – Отограмметрические процессы; 7 – МНЛ; 8 – Данные геоинформационных систем; 9 – Данные интеллектуальных транспортных систем; 10 – Спутниковые снимки, облака точек данных трехмерной съемки; 11 – База облаков данных не деформированного состояния; 12 – Данные EDR; 13 – База технических данных; 14 – Базы данных и знания (опыт) эксперта; 15 – Формирование оптимального решения (адекватная реальности модель перемещений объектов исследования в известном и уточненном объеме пространственно-следовой информации с места ДТП; 16 – Определение значений величин, обладающих исходной неопределенностью; 17 – Определение области пространства фактического контакта; 18 – Реконструкция (визуальное отображение полученной модели) перемещений в фазах (сближение – контакт – разлет) и представление результатов

- устранение шума, определение коррелирующих элементов локальной зоны деформаций ТС при установлении узловых вершин смятий и следов в контактной зоне для сопоставления с базовым снимком локальной зоны деформаций ТС, полученных с разных ракурсов и при установлении фактического объема деформаций фотограмметрической обработкой для задачи расчета затрат энергии на деформацию элементов конструкции ТС;
- определение параметров ударных воздействий и перемещений ТС при моделировании столкновения, в частности, для тех составляющих импульса, для которых получение точной математической модели весьма затруднительно из-за множества трудноучитываемых факторов;
- расчет колебаний центра тяжести ТС при моделировании (реконструкции перемещений, в частности, при опрокидывании);
- перерасчет (уточнение) затрат энергии на деформацию при эксцентричных ударах (ударах не попадающих в стандартные тесты принятые для расчета по ESS), т.к. из многочисленных зарубежных исследований и из опыта исследований, выполненных на базе института БДД СПбГАСУ установлено, что метод расчета затрат энергии на объемные деформации, основанный на теории трехсторонней унифицированной жесткости кузова (алгоритм Crash3) применим преимущественно только для случаев центральных ударов и при перекрытии от 75%, а при эксцентричных косонаправленных ударах, наездах на цилиндрические тела (на столбы, деревья и т.п.), наложенных ударах, перекрестных ударах в колесо погрешность расчета существенно возрастает (причем во многих случаях в сторону уменьшения итогового значения затрат).

Таким образом, в основе методики использования МНЛ в процессах реконструкции механизма ДТП существующая структурная граф-схема, представленная в [68], с учетом вышеизложенного может быть представлена в виде блок-схемы комплексного алгоритма реконструкции механизма ДТП, использующего математический аппарат теории нечетких множеств, показана на рис.1.2.

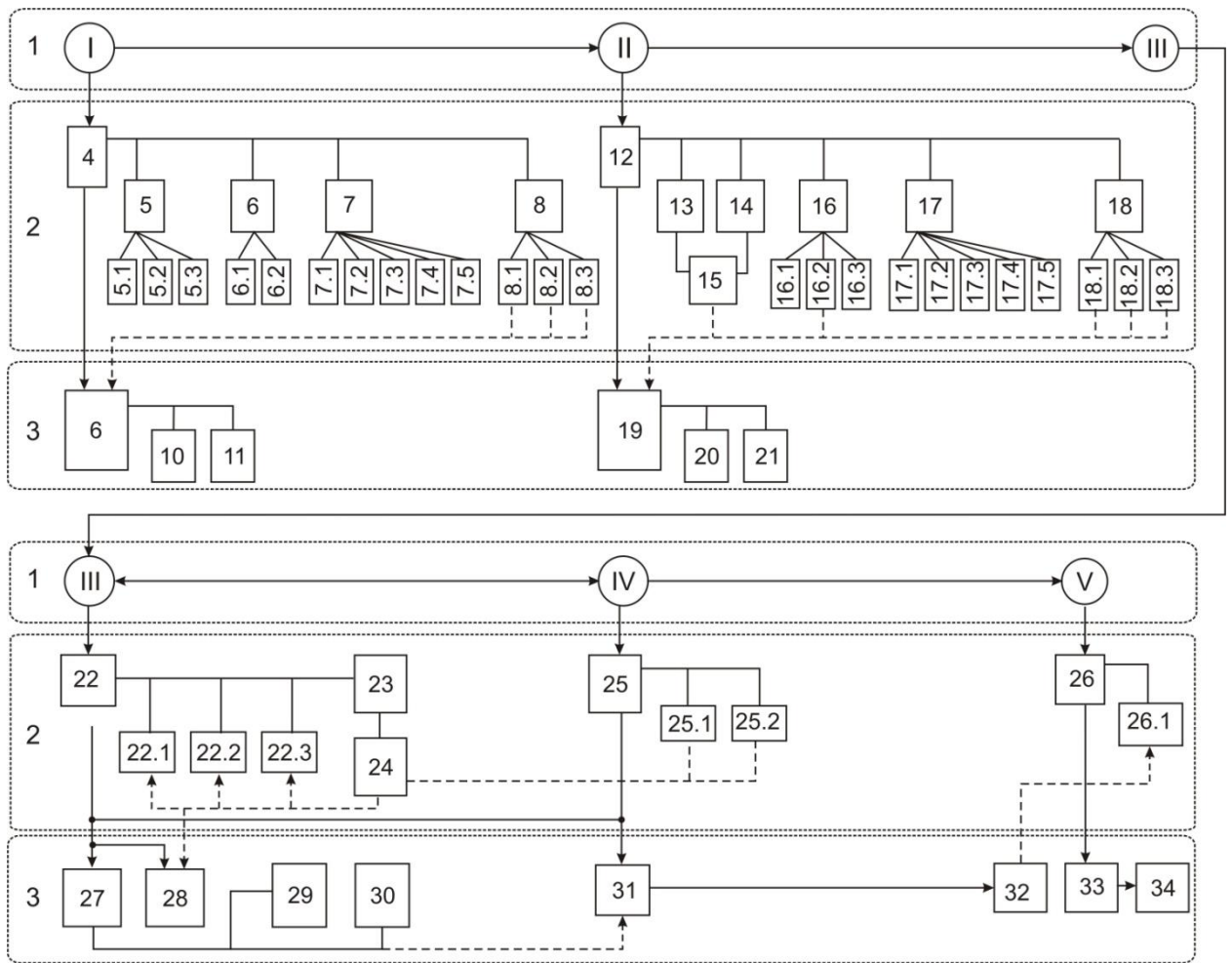


Рисунок 1.2 – Блок-схема комплексного алгоритма реконструкции механизма ДТП, с использованием математического аппарата теории нечетких множеств: 1 – Этап; 2 – Содержание и сопутствующая характеристика этапа; 3 – Результат этапа; 4 – Осмотр места ДТП; 5 – Временная характеристика осмотра; 5.1 – Первоначальный; 5.2 – Повторный; 5.3 – Дополнительный; 6 – Пространственная характеристика осмотра; 6.1 – С привязкой к внешним объектам; 6.2 – С привязкой в полярных координатах; 7 – Способ проведения осмотра; 7.1 – Концентрический; 7.2 – Эксцентрический; 7.3 – Узловой; 7.4 – Фронтальный; 7.5 – По квадратам; 8 – Средства проведения осмотра; 8.1 – GPS позиционирование объектов; 8.2 – Лазерное сканирование; 8.3 – Масштабное фотографирование; 9 – Получение опорного плана местности; 10 – Фотоплан, цифровые масштабные изображения; 11 – Графический план, векторные многослойные масштабные изображения, облако цифровых данных; 12 – Осмотр ТС; 13 – Следовая информация; 14 – Пространственная информация; 15 – Отчет в электронной форме; 16 – Техническая информация; 16.1 – Базы данных по ТС; 16.2 – Данные EDR; 16.3 – Данные краш-тестов; 17 – Способ проведения осмотра ТС; 17.1 – Концентрический; 17.2 – Эксцентрический; 17.3 – Агрегатно-узловой; 17.4 – Фронтальный; 17.5 – По зонам; 18 – Средства представления информации; 18.1 – Векторные (многослойные) масштабные модели; 18.2 – Конечно-элементные модели разной детализации; 18.3 – Фотографические масштабные изображения; 19 – Построение модели ТС; 20 – Модели с заданными свойствами и кинематикой элементов; 21 – Фотопланы, объемная доля деформаций, облако цифровых данных; 22 – Анализ столкновения и дорожно-транспортной ситуации;

22.1 – Исследование по методу установления факта контактно-следового взаимодействия; 22.2 – Установление кинематических и динамических характеристик удара; 22.3 – Исследование отдельных факторов и параметров движения ТС на всех исследуемых стадиях; 23 – Математический аппарат теории нечетких множеств; 24 – База знаний эксперта (опыт эксперта); 25 – Моделирование; 25.1 – Пространственное; 25.2 – Математическое; 26 – Формирование пространственной сцены и отчета; 26.1 – Покадровая реконструкция ДТП; 27 – Исследование инструментами существующих программных средств; 28 – Исследование инструментами специально разработанных (под задачу и/или под модель) программных средств; 29 – Графики и схемы в форматах: \*.dwg, \*.3ds, \*.xls, \*.jpg, \*.tif; 30 – Отчеты по расчетам в форматах: \*.doc, \*.txt, \*.pdf; 31 – Визуализация модели движения каждого из ТС; 32 – Визуализация модели ДТП на всех стадиях; 33 - Рендеринг видеороликов в формате \*.avi, \*.mov, \*.mpg; 34 - Конечное редактирование и компоновка отчета экспертом в форматах: \*.doc, \*.rtf, \*.pdf

Детальное исследование импульсов возникающих сил при контакте объектов исследования с использованием МНЛ позволяет также решать и прямые задачи обеспечения транспортной безопасности, а именно определить конструктивные решения по повышению безопасности водителя и пассажиров, так как практика проектирования сейчас строится на базе существующих знаний (а именно результатов натурных и виртуальных краш-тестов), которые ограничиваются в своем большинстве случаями центральных ударов и в которых очень мало представлены данные о кинематике реальных ДТП (например, в практике экспертных исследований встречные столкновения с полным перекрытием встречаются редко, в большинстве случаев – это удары с перекрытием порядка 50%, следовательно поглощение энергии на деформации, отброс и перемещения тел водителя и пассажиров в салоне автомобиля и их травмирование носят существенно отличный от полученных данных с ТС и манекенов в известных тестах).

Применение математического аппарата теории нечетких множеств существенно расширяет методологию реконструкции ДТП, а именно уточняет методический аппарат автотехнического эксперта и способствует повышению достоверности и точности (категоричности) выводов эксперта по результатам исследования ДТП.

### **1.5. Теоретический и понятийный аппарат оценки состояний системы ОПУС в эволюции от ВАДС в ОБДД к отображению пространств состояний ОПУС**

Как отмечалось ранее, актуальная проблемная область повышения категоричности экспертного исследования при реконструкции механизма ДТП может быть формализована до подобластей однородной проблемной тематики, взаимно пересекающихся в участках использования смежной для подобластей информации. При этом именно информация в реконструкции ДТП, а именно ее полезный объем, объективность (достоверность) определяет категоричность получаемых выводов, т.е. фактически не столько на выводы влияет применяемый метод исследования, сколько какая исходная информация и с какими свойствами обрабатывается.

Таким образом, места пересечения подобластей весьма широки в проблемном охвате: отсутствие возможности определить место контакта вносит ограничения в исследование и в некоторых случаях делает невозможным определение скорости движения ТС, а следовательно при отсутствии решений в вышеуказанных подобластях, решение в части определения причинной связи между скоростью ТС и ДТП, наличием у водителя ТВ и т.д. также становятся не определяемыми или не конкретными (категоричными), основанными на субъективных исходных данных, которые не могут быть верифицированы.

В ранее опубликованных работах [9,78-83] отмечалось, что под категоричностью экспертного исследования следует понимать меру полноты выводов, не допускающих существование иных, отличных от полученного, при ракурсе на результаты одной или нескольких примененных процедур исследования со стороны позиции лица назначившего экспертизу, при ракурсе со стороны эксперта, категоричность есть комплексная мера достижения конечности исследовательских задач, при выполнении которых цель исследования достигнута без допущений или вероятностных суждений.

В развитие указанного, следует особо отметить, что в настоящем исследовании и формируемых научных основах, намеренно не применяется к слоям ДТЭ – ЭП ДТП – ПБ ТС – ОБДД понятие качества, так как в иерархии указанных слоев, результаты ДТЭ, лежащие в информационном базисе вышележащих слоев, а значит и любое экспертное исследование должно быть качественным (в понимании полноты и наглядности и пр. по ФЗ №73) без каких-либо категорий это условное качество характеризующих (высокое, низкое и т.п.). В этом ключе, любые указания, часто встречающиеся в среде юридического анализа результатов экспертных исследований, окрашенные словами качественного превосходства или недостаточности, являются де-факто тавтологий и неким почти «литературным» приемом оценки категоричности, средствами категорий, лежащих вне состояний системы, реализующей жизненный цикл судебной экспертизы.

С позиций понятий качества необходимо оценивать не результат производства ДТЭ (т.е. саму экспертизу), а информационное поле в котором выполняется ДТЭ, однако и ему можно дать более четкие границы мер измерения: полнота, достаточность, точность и т.п.

С учетом вышеизложенного, в данной работе вводятся понятия:

**Эффективность ДТЭ (при МОР):** мера оценки результата применения методов ДТЭ, при котором совокупность свойств ДТЭ, измеряемых комплексом показателей, приводит к достижению целей ДТЭ, содержит в себе объем данных достаточный для применения в ЭП ДТП и дальнейший поиск значений этих показателей приводит к снижению полноты и категоричности выводов в ДТЭ.

**Эффективность ЭП (при МОР):** мера оценки результата применения методов ЭП ДТП, при котором совокупность свойств ЭП, измеряемых комплексом показателей, приводит к достижению целей ЭП, содержит в себе объем данных достаточный для применения в ОБДД и дальнейший поиск значений этих показателей с учетом цели ЭП не приводит к улучшению одного или нескольких показателей комплекса, без ухудшения других.

Для этого также определим:

**Адекватность модели (в ДТЭ, ЭП ДТП и в ОБДД):** степень соответствия свойств используемой модели воспроизводимым ею свойствам реальных объектов или процессов, свойствам их взаимодействия.

**Достоверность результатов ДТЭ:** мера оценки возможности проверки результатов ДТЭ при том же объеме ПСИ использованной при ее производстве в МОР.

**Категоричность (в ДТЭ):** мера оценки применения процессов МОР и оценки полученных результатов ДТЭ, определяемая размером погрешности выполненных вычислений (моделирования), не допускающая при этом вероятностях и условных выводов при обеспечении достоверности. Категоричность также – свойство ДТЭ, определяемое примененными методами и объемом исходной ПСИ, определяющее нахождение решения с наименьшим количеством показателей имеющих вариативные значения, в более узком виде: минимальная компактность множества, образуемого полученными выводами на исходном множестве использованных в ДТЭ данных.

**Полнота (в ДТЭ):** свойство ДТЭ отражающее достаточность применения методов для поиска решения, если оно существует в составе ПСИ.

**Сходимость (в ДТЭ):** мера оценки адекватности модели, определяемая величиной смещения результатов моделирования относительно фактических данных первичной ПСИ при модельно-ориентированной реконструкции в ДТЭ.

Обобщая введенный понятийный аппарат исследования, также следует указать, что механизмом обеспечения эффективности ДТЭ и ЭП ДТП должна являться совокупность примененных процессов производства ДТЭ в МОР, а именно методология ДТЭ и ЭП ДТП, при практическом применении приводящая к максимальным значениям по показателям достоверности, категоричности, полноты и сходимости, при котором скорость выполнения

процедур ДТЭ или ЭП ДТП, а также затраты на их выполнение являются минимальными.

Возвращаясь к указанному ранее во введении, при всей очевидной всесторонности и глубине ныне достигнутой исследованности процессов внутри системы ВАДС, при развитии автомобильного транспорта в сторону перехода к замене ТС на ВАТС, т.е. к полному исключению человека из процесса обеспечения БДД, система ВАДС не сможет отвечать требованиям и условиям эксплуатации ВАТС. Рассматривая настоящее время как отправную точку для эволюции от ТС к ВАТС, дадим определение системе ВАДС в текущем состоянии.

Система ВАДС на текущем этапе эволюции – неразрывно связанная система, образуемая подсистемами: Водитель, Автомобиль, Дорога и Среда, взаимодействие между которыми определяет состояние **безопасности дорожного движения**. В которой, при эксплуатации автомобильного транспорта, контроль за процессами управления имеет антропоцентрическую сущность, осуществляется человеком и направлен на снижение числа ДТП и тяжести их последствий.

При этом ОБДД в ВАДС, в настоящее время, даже при цифровизации отдельных процессов, не пригодно для полной цифровой трансформации. При этом само понятие безопасность как мера гарантии не возникновения опасных отклонений (отказов в подсистемах ВАДС) не имеет широты, то есть не включает в себя киберфизическую защищенность процессов передачи информации, не определяет уровни функциональной защищенности, устойчивости транспортного процесса в целом.

Рассматривая МОР как фундаментальный принцип реализации механизма обеспечения эффективности ДТЭ и ЭП ДТП по мере интеграции информационного пространства из ПСИ в КФИ и перехода от КФИ к КФС, изложим концепцию эволюции систем с целью формирования теории оценки состояний, пригодного на настоящем этапе эволюции для обеспечения условий дальнейшего перехода по оси развития и для решения цели

настоящего диссертационного исследования (обеспечение эффективности). Для этого определим, что **система ОПУС (полисистема ОПУС)** это неразрывно связанная система, образуемая подсистемами: Объект, Пространство, Условие и Событие, взаимодействие между которыми определяет состояние **функциональной, пользовательской и киберфизической безопасности дорожного движения**. В которой, при эксплуатации автомобильного транспорта, контроль за процессами управления имеет антропоцентрическую и информационную сущности, с сетевой масштабируемой иерархией, осуществляется без участия человека и направлен на исключение травмирования пассажира.

При описании с позиции оценки и управления рисками, определим:

**Функциональная безопасность дорожного движения:** состояние, характеризующее отсутствием недопустимых уровней риска, связанного с отказами, вызванными некорректным функциональным поведением компонентов системы ОПУС.

**Пользовательская безопасность дорожного движения:** состояние, характеризующее отсутствием недопустимых уровней риска, связанного с отказами, непосредственно влияющими на возникновение индекса травмирования из-за отказа в подсистемах системы ОПУС.

**Киберфизическая безопасность дорожного движения:** состояние, характеризующее отсутствием недопустимых уровней риска, связанного с отказами, вызванными нарушениями информационного пространства системы ОПУС.

В развитие данного положения были введены новые определения отказов в подсистемах ОПУС:

**Отказ (нарушение) в подсистеме Объект системы ОПУС:** нарушение работоспособности объекта (активного или пассивного), находящегося в дорожном движении, при котором его гарантии функциональной безопасности снижены, а его перемещение на сети

невозможно или может происходить со скоростью ниже средней скорости транспортного потока на участке сети. Эволюционно возникает из подмножества взаимодействий между участниками дорожного движения в системе ВАДС.

**Отказ (нарушение) в подсистеме Пространство системы ОПУС:** нарушение одной или нескольких сетей, влекущее за собой полную или частичную потерю за контролем над управлением объектами и процессами БДД. Эволюционно возникает из подмножества сочетаний условий и состояний относящихся к свободным ДТС в ВАДС.

**Отказ (нарушение) в подсистеме Условия системы ОПУС:** нарушение требований к процессам перемещения и их защищенности (гарантия функциональной безопасности) при котором эксплуатация объекта и/или сети невозможно или может происходить со скоростью ниже средней скорости транспортного потока на участке сети. Эволюционно возникает из подмножества сочетаний условий совершения текущих событий в ВАДС.

**Отказ (нарушение) в подсистеме Событие системы ОПУС:** возникновение в подсистеме Событие системы ОПУС независящих от других подсистем факторов, формирующих условия для смены состояния полисистемы ОПУС от самоподобного к обособленному, оказывающих влияние на состояние других подсистем. Эволюционно возникает из подмножества сочетаний событий и состояний, относящихся к сложным ДТС в ВАДС.

В приложении А приведен полный список введенных и переформулированных терминов и определений к ним, используемых в настоящей работе.

В таблице 1.2 показано сравнение систем (полисистем) ВАДС и ОПУС.

Изложенный терминологический аппарат является базовым фундаментом описания эволюции систем, формирующих состояния в

обеспечении БДД. При этом под состоянием (как в системе ВАДС, так и в системе ОПУС) следует понимать: конечное множество значений показателей компонентов системы формирующих область в n-мерном пространстве и отображающих ее в любой момент времени.

Таблица 1.2 – Сравнение систем ВАДС и ОПУС

| №<br>п/п | Характеристика                                                      | ВАДС                                                                            | ОПУС                                                                            |
|----------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | Наблюдаемость процессов во времени                                  | Ретроспективно                                                                  | Непрерывно                                                                      |
| 2        | Форма источника гарантии БДД                                        | От иерархии управляющих воздействия с откликами на один слой                    | От сети самоподобия с саморегуляцией и откликами между всеми целевыми объектами |
| 3        | Форма иерархии управления                                           | Пирамидально-древовидная                                                        | Сетевая                                                                         |
| 4        | Наличие цифровых двойников (ЦД) подсистем или компонентов подсистем | ЦД нет                                                                          | Все О размещенные на П сетей имеют ЦД                                           |
| 5        | Вид представления графа                                             | Взвешенный мультиграф                                                           | Циклический мультиграф                                                          |
| 6        | Базовая метрика порядка                                             | Энтропийная                                                                     | Анизотропийная                                                                  |
| 7        | Информационная связанность                                          | Локальная                                                                       | Глобальная                                                                      |
| 8        | Доминант направленности                                             | Исключение ДТП и их последствий                                                 | Исключение состояний с риском индекса травмирования выше 0                      |
| 9        | Доминант регуляции                                                  | Антропоцентричный к действиям человека (ограничительные меры в управлении)      | Антропоцентричный к состоянию человека (комфорт услуги транспорта)              |
| 10       | Процессы обработки обратной связи от подсистем                      | Накопительные, с запаздыванием                                                  | В реальном времени                                                              |
| 11       | Возможность масштабирования                                         | В любом направлении с абстракцией, т.е. микро и макро уровни сильно неоднородны | В любом направлении без абстракции                                              |

| №<br>п/п | Характеристика                            | ВАДС                                                                                                                                                                                  | ОПУС                                                                 |
|----------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 12       | Возникновение самоподобных состояний      | Априорно должны возникать в системе при отсутствии отказов. Не имеют средств для поддержки (обеспечения устойчивости) и не могут быть тиражированы от системы к системе внутри группы | Поддерживаются в системе постоянно. Могут передаваться внутри группы |
| 13       | Длительность самоподобных состояний       | Низкая                                                                                                                                                                                | Высокая                                                              |
| 14       | Регуляция возникновения отказов           | Пассивная, превентивные и ограничительные меры                                                                                                                                        | Активная, предиктивные меры                                          |
| 15       | Определитель оси развития                 | Эволюция ТС и его бортовых систем                                                                                                                                                     | Эволюция сетей и интерфейсов                                         |
| 16       | Доля участия иных участников ДД в системе | Неравная, зависимая                                                                                                                                                                   | Равная, независимая                                                  |
| 17       | Возможность внедрения ИИ                  | Локальная                                                                                                                                                                             | Глобальная                                                           |
| 18       | Чувствительность к потере устойчивости    | Высокая / бифуркации                                                                                                                                                                  | Низкая                                                               |
| 19       | Автономность и саморегуляция              | Низкая, стохастическая                                                                                                                                                                | Высокая, детерминированная                                           |
| 20       | Целеполагание обеспечения БДД             | По удельным и относительным показателям                                                                                                                                               | По абсолютным показателям                                            |

Классифицируем состояния в системе ОПУС:

Самоподобное состояние – состояние полисистемы в котором внутренний состав систем и подсистем, взаимодействия между ними и уровни функциональной, пользовательской и киберфизической БДД демонстрируют одинаковые статистические свойства при любом масштабе времени, т.е. обладают масштабной инвариантностью.

Обособленное состояние – состояние полисистемы в котором внутренний состав систем и подсистем, взаимодействия между ними и уровни функциональной, пользовательской и киберфизической БДД демонстрируют не одинаковые статистические свойства при любом масштабе времени, т.е. не обладают масштабной инвариантностью.

Многомасштабность сети и моделей на оси развития эволюции достигается только за счет перехода в ЦП через УПМК на ВП.

Описанные концептуальные решения представлены на рис.1.3 в виде схематичного отображения эволюции от ВАДС к ОПУС с переходом от МОР через ВП к цифровой платформе ОБДД.

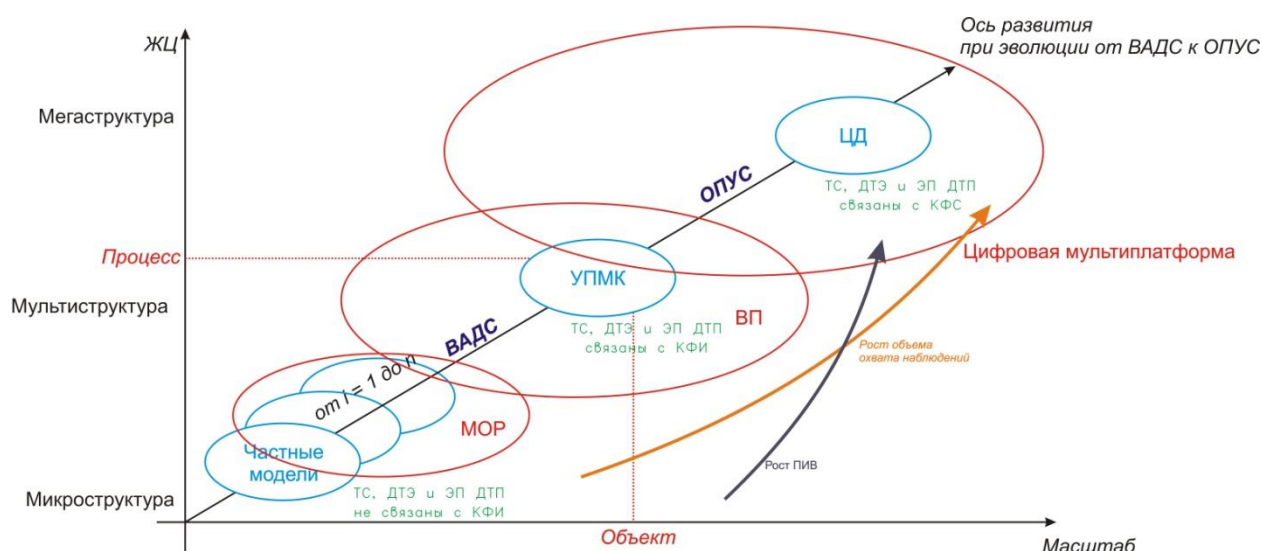


Рисунок 1.3 - Эволюция систем от ВАДС к ОПУС на рассматриваемой оси переходов

Эволюция систем от ВАДС к ОПУС будет сопровождаться значительными изменениями в их структуре, управлении и взаимодействии. Эти изменения с учетом таблиц 1.1-1.2 и рис.1.3, можно описать с помощью следующих концептуальных положений по аппарату их математических моделей (по подходу к нему):

### 1. Графовые модели

ВАДС: Используется взвешенный мультиграф, где вершины представляют элементы системы (водитель, автомобиль и т.д.), а рёбра отражают взаимодействия с весами, характеризующими интенсивность или важность связей. Граф иерархичен и древовиден.

ОПУС: Применяется циклический мультиграф, где связи образуют сеть с возможными циклами, что отражает глобальную связанность и саморегуляцию. Граф сетевой, без жёсткой иерархии.

### 2. Динамика систем

ВАДС: Моделируется с помощью дифференциальных уравнений или стохастических процессов, где эволюция системы описывается через локальные взаимодействия и ретроспективный анализ.

ОПУС: Используются модели комплексных сетей (например, теория самоорганизующихся систем) и предиктивные алгоритмы (например, методы машинного обучения), позволяющие анализировать систему в реальном времени и прогнозировать её состояния.

### 3. Метрики порядка

ВАДС: Энтропийная метрика, которая характеризует степень неопределённости и хаотичности системы. Чем выше энтропия, тем менее предсказуема система.

ОПУС: Анизотропийная метрика, учитывающая направленные изменения и структурные особенности сети, что позволяет оценивать устойчивость и адаптивность системы.

### 4. Управление и регуляция

ВАДС: Основано на ограничительных мерах (например, управление через запреты или правила). Может описываться методами теории управления с обратной связью, но с запаздыванием.

ОПУС: Используется активная регуляция через предиктивные меры (например, алгоритмы ИИ). Математически это может быть представлено как задача оптимизации в реальном времени с глобальными критериями.

## 5. Самоподобные состояния

ВАДС: Возникают случайно и не поддерживаются системой. Могут быть описаны как кратковременные флуктуации в стохастических моделях или как бифуркации.

ОПУС: Поддерживаются постоянно и тиражируются внутри сети. Математически это можно описать с помощью фрактальных моделей или теории самоорганизованной критичности.

## 6. Информационная связанность

ВАДС: Локальная, что соответствует моделям с ограниченным взаимодействием (например, клеточные автоматы с малым радиусом влияния).

ОПУС: Глобальная, что требует использования моделей сложных сетей (например, масштабно-инвариантные сети или графы с малым миром).

## 7. Целеполагание

ВАДС: Ориентировано на удельные и относительные показатели (например, снижение количества ДТП на 5%). Может быть описано методами статистического анализа.

ОПУС: Ориентировано на абсолютные показатели (например, исключение состояний с риском травмирования). Требует использования методов многокритериальной оптимизации.

## 9. Роль ИИ

ВАДС: Локальное применение ИИ (например, для анализа данных с бортовых автомобиля, из потока данных ИТС и т.п.).

ОПУС: Глобальное внедрение ИИ, что требует использования распределённых алгоритмов обучения (например, федеративное обучение) и методов обработки больших данных.

Переход от ВАДС к ОПУС будет сопровождаться сменой математического аппарата с локальных, иерархических и стохастических моделей на глобальные, сетевые и детерминированные. Этот процесс будет включать замену древовидных графов на циклические мультиграфы, переход

от энтропийных метрик к анизотропийным, использование цифровых двойников и предиктивных алгоритмов, сопровождающихся активным применением методов теории сложных сетей и самоорганизующихся систем.

В развитии автотранспортной отрасли такой эволюционный переход позволит создать более устойчивую, адаптивную и предсказуемую полисистему, способную эффективно реагировать на изменения в реальном времени.

Учитывая вышеизложенное, следует выделить четыре ключевых перехода в математическом аппарате:

- от иерархии к сети: замена древовидного графа на масштабно-инвариантную сеть (модель Барабаши-Альберт).
- от стохастичности к детерминированности: введение предиктивных компонент ( $F_{ии}$ ) и цифровых двойников.
- от энтропии к анизотропии: смена метрики для учёта направленной самоорганизации.
- от локальности к глобальности: тензорное произведение подпространств вместо декартова.

Формирование ОПУС в представленной эволюции определяется развитием от КФИ к КФС, интегрированных в цифровую платформу ОБДД, представляющую собой полисистему средств, поддерживающих использование цифровых процессов, ресурсов и сервисов условно неограниченным количеством объектов полисистемы ОПУС и обеспечивающая возможность управления состоянием процессов дорожного движения в любой своей части, в которой имеются наблюдаемые поливалентные связи взаимодействия, обладающая сниженными издержками транзакций при передаче информации.

В изложенной концепции эволюции рассматриваемых систем и слоев в них расположенных, представим себе идеальное состояние полисистемы ОПУС. Такое идеальное состояние должно привести к отсутствию необходимости реконструкции ДТП и проведения ДТЭ в том виде, с

которыми мы знакомы с ними сейчас. Однако, такое состояние предмета данного исследования в текущем модельно-ориентированном подходе к реконструкции ДТП не может быть достигнуто без смены общепринятой парадигмы или проще говоря, модели рациональной научной деятельности (наследуемого от поколения экспертов к другому в виде общепринятой практики производства исследований) в границах исследуемой области, на замещающие полимодели верификации продуцирования интеллектуальной экспертной системой процессов анализа причин ДТП в текущей системе ВАДС и в промежуточных полисистеме гибридной эксплуатации ТС и ВАТС для последующего их устранения и предупреждения.

При реализации механизма обеспечения эффективности ДТЭ и ЭП ДТП с участием пешеходов в поставленной формулировке, разрабатываемый аппарат следует ориентировать на обеспечение снижения индексов травмирования, что формирует базис для ПБ ТС и разработки комплекса организационно-технических мер по формированию требований к объектам дорожного обустройства, включая технические средства ОБДД. Очевидно, что в этом случае ставшее почти популистским понятие «снижение смертности» является следствием применения таких мер, а также целевым эффектом от их внедрения.

### **1.6. Онтология предметной области исследования**

Учитывая поставленные задачи исследования, архитектурно-композиционное решение по связи решаемых задач и положений, выносимых на защиту относительно места и роли в них предложенной концепции системы ОПУС показано на рисунке 1.4.

С целью определения онтологии предметной области исследования, было введено факторное пространство связей между ДТЭ – ЭП ДТП – ПБ ТС и ЭДО – ОБДД, которое было разделено на 12 целевых групп, с учетом информационной связанности процедур. В рамках данной работы всего было

выделено 110 факторов, из них: 95 независимых и 10 смежных в группах (см. табл.1.3).

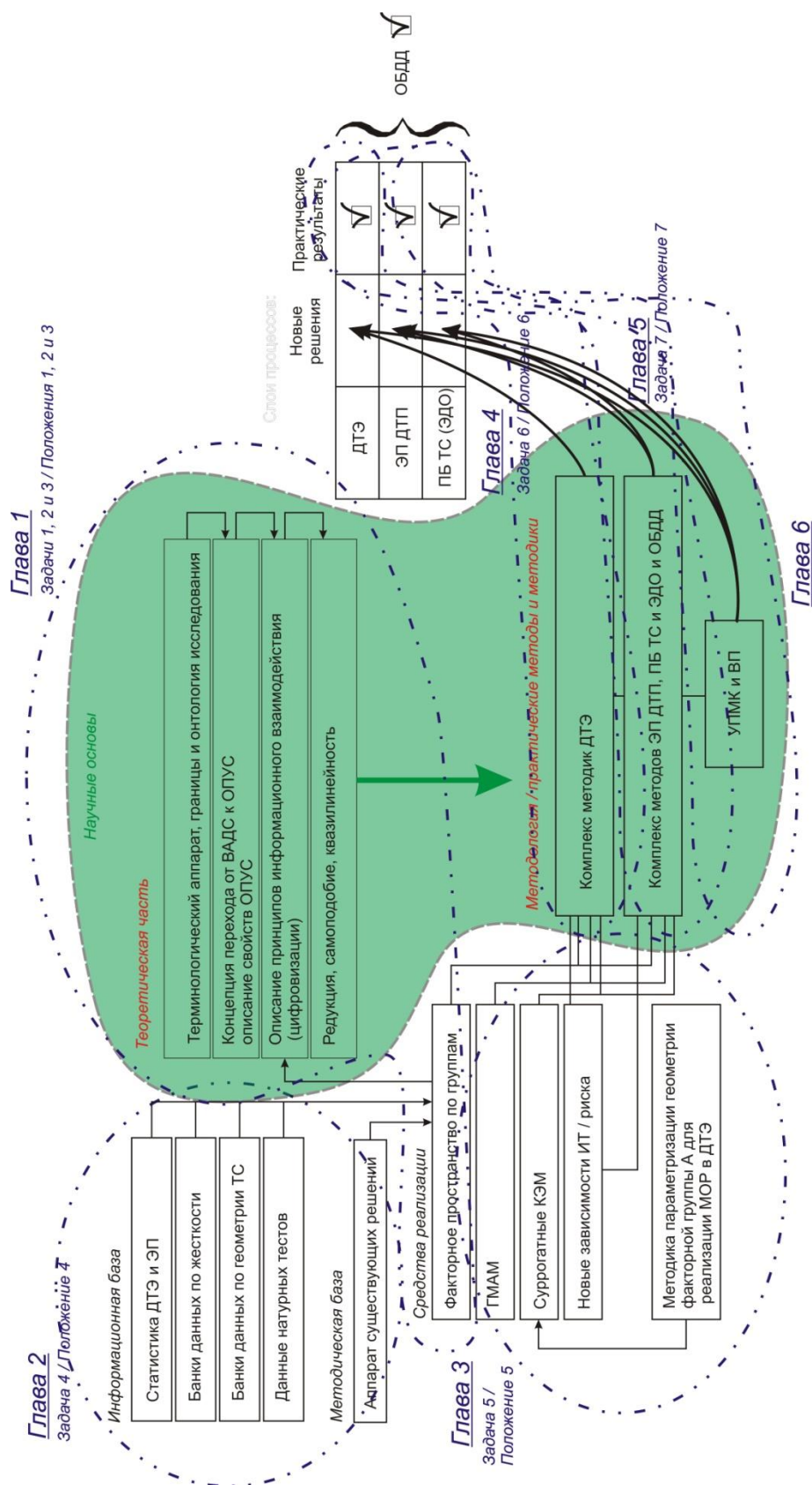


Рисунок 1.4 – Архитектурно-композиционное решение настоящей диссертационной работы

Таблица 1.3 – Табличное представление  
целевых групп факторного пространства исследуемых связей

| № п/п    | Индекс                                              | Наименование фактора                                     | Единицы измерения | Ключевой слой                  |
|----------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------------|
| <b>1</b> | <b>А. Группа факторов геометрии ТС</b>              |                                                          |                   | ДТЭ, ЭП<br>ДТП, ПБ<br>ТС и ЭДО |
| 1.1      | A1                                                  | Угол наклона бамперной касательной                       | град              |                                |
| 1.2      | A2                                                  | Угол наклона передней нижней доли капота                 | град              |                                |
| 1.3      | A3                                                  | Угол наклона задней доли капота                          | град              |                                |
| 1.4      | A4                                                  | Угол наклона ветрового стекла                            | град              |                                |
| 1.5      | A5                                                  | Высота центральной точки бампера                         | м                 |                                |
| 1.6      | A6                                                  | Высота нижней точки бампера                              | м                 |                                |
| 1.7      | A7                                                  | Длина продольной доли бампера                            | м                 |                                |
| 1.8      | A8                                                  | Передний свес                                            | м                 |                                |
| 1.9      | A9                                                  | Длина бампера                                            | м                 |                                |
| 1.10     | A10                                                 | Высота передней точки капота                             | м                 |                                |
| 1.11     | A11                                                 | Высота задней точки капота                               | м                 |                                |
| 1.12     | A12                                                 | Высота передней доли крыши                               | м                 |                                |
| <b>2</b> | <b>В. Группа факторов антропометрических данных</b> |                                                          |                   | ДТЭ, ЭП<br>ДТП, ПБ<br>ТС и ЭДО |
| 2.1      | B1                                                  | Масса пешехода                                           | кг                |                                |
| 2.2      | B2                                                  | Рост пешехода                                            | м                 |                                |
| 2.3      | B3                                                  | Фаза шага                                                | —                 |                                |
| 2.4      | B4                                                  | Положение ЦТ таза                                        | м                 |                                |
| 2.5      | B5                                                  | Положение ЦТ головы                                      | м                 |                                |
| <b>3</b> | <b>С. Группа факторов стадий КСВ – отброс – КП</b>  |                                                          |                   | ДТЭ и ПБ<br>ТС                 |
| 3.1      | C1                                                  | Скорость ТС в момент начала КСВ                          | км/ч              |                                |
| 3.2      | C2                                                  | Скорость пешехода в момент начала КСВ                    | км/ч              |                                |
| 3.3      | C3                                                  | Скорость пешехода приобретенная к моменту завершения КСВ | км/ч              |                                |
| 3.4      | C4                                                  | Угол входа                                               | град              |                                |
| 3.5      | C5                                                  | Угол сброса к продольной оси                             | град              |                                |
| 3.6      | C6                                                  | Угол сброса к опорной поверхности                        | град              |                                |
| 3.7      | C7                                                  | Фаза торможения ТС                                       | —                 |                                |
| 3.8      | C8                                                  | Объем повреждений ТС, ЛД                                 | —                 |                                |
| 3.9      | C9                                                  | ЛТП пешехода                                             | —                 |                                |
| 3.10     | C10                                                 | Угол сагитальной плоскости к опорной поверхности         | град              |                                |
| 3.11     | C11                                                 | Угол парасагитальной плоскости к опорной поверхности     | град              |                                |
| 3.12     | C12                                                 | Коэффициент сопротивления перемещениям                   |                   |                                |

Продолжение таблицы 1.3

| № п/п    | Индекс                                     | Наименование фактора                                             | Единицы измерения | Ключевой слой            |
|----------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------|
| 3.13     | C13                                        | Время КСВ                                                        | сек               | ДТЭ и ПБ ТС              |
| 3.14     | C14                                        | Высота точки сброса                                              | м                 |                          |
| 3.15     | C15                                        | Высота ЦТ пешехода                                               | м                 |                          |
| 3.16     | C16                                        | Данные геометрии ТС группы А                                     | —                 |                          |
| 3.17     | C17                                        | Антропометрические данные группы В                               | —                 |                          |
| <b>4</b> | <b>Д. Группа факторов места начала КСВ</b> |                                                                  |                   | ДТЭ и ЭП ДТП             |
| 4.1      | D1                                         | Уклон продольный                                                 | град              |                          |
| 4.2      | D2                                         | Уклон поперечный                                                 | град              |                          |
| 4.3      | D3                                         | Состояние и вид покрытия                                         | —                 |                          |
| 4.4      | D4                                         | Положение относительно границ ПЧ                                 | м                 |                          |
| 4.5      | D5                                         | Наличие/фиксация ПСИ                                             | —                 |                          |
| 4.6      | D6                                         | Положение относительно места выхода пешехода на ПЧ               | м                 |                          |
| <b>5</b> | <b>Е. Группа факторов травмирования</b>    |                                                                  |                   | ДТЭ, ЭП ДТП, ПБ ТС и ЭДО |
| 5.1      | E1                                         | Угол входа                                                       | град              |                          |
| 5.2      | E2                                         | Угол сброса                                                      | град              |                          |
| 5.3      | E3                                         | Угол сагиттальной плоскости при первичном КСВ                    | град              |                          |
| 5.4      | E4                                         | Угол парасагиттальной плоскости при первичном КСВ                | град              |                          |
| 5.5      | E5                                         | Угол сагиттальной плоскости при вторичном КСВ                    | град              |                          |
| 5.6      | E6                                         | Угол парасагиттальной плоскости при вторичном КСВ                | град              |                          |
| 5.7      | E7                                         | Антропометрические данные группы В                               | —                 |                          |
| 5.8      | E8                                         | ЛД, жесткости в КЗ на ТС                                         | —                 |                          |
| 5.9      | E9                                         | Жесткость покрытия                                               | —                 |                          |
| 5.10     | E10                                        | Данные КСВ – отброс – КП группы С                                | —                 |                          |
| <b>6</b> | <b>Ф. Группа факторов расчета ТВ</b>       |                                                                  |                   | ДТЭ и ПБ ТС              |
| 6.1      | F1                                         | Время реакции водителя                                           | сек               |                          |
| 6.2      | F2                                         | Время реакции пешехода                                           | сек               |                          |
| 6.3      | F3                                         | Путь в опасной зоне                                              | м                 |                          |
| 6.4      | F4                                         | Замедление ТС                                                    | м/с <sup>2</sup>  |                          |
| 6.5      | F5                                         | Время нарастания торможения                                      | сек               |                          |
| 6.6      | F6                                         | Время срабатывания тормозного привода                            | сек               |                          |
| 6.7      | F7                                         | Скорость движения пешехода                                       | км/ч              |                          |
| 6.8      | F8                                         | Угол между направлением движения пешехода и вектором кол.дви. ТС | град              |                          |

Продолжение таблицы 1.3

| № п/п | Индекс                                               | Наименование фактора                      | Единицы измерения | Ключевой слой |
|-------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------|---------------|
| 6.9   | F9                                                   | Скорость движения ТС                      | км/ч              | ДТЭ и ПБ ТС   |
| 7     | <b>Г. Группа факторов ДТП (ДТС)</b>                  |                                           |                   | ЭП ДТП, ОБДД  |
| 7.1   | G1                                                   | Время суток                               | час               |               |
| 7.2   | G2                                                   | Время года                                | месяц             |               |
| 7.3   | G3                                                   | Состояние покрытия                        | —                 |               |
| 7.4   | G4                                                   | Освещение                                 | —                 |               |
| 7.5   | G5                                                   | Видимость                                 | м                 |               |
| 7.6   | G6                                                   | Профиль дороги в плане                    | —                 |               |
| 7.7   | G7                                                   | Место ДТП                                 | м                 |               |
| 7.8   | G8                                                   | Скорость движения ТС                      | км/ч              |               |
| 7.9   | G9                                                   | Скорость движения пешехода                | км/ч              |               |
| 8     | <b>Н. Группа факторов активности пешехода в ДД</b>   |                                           |                   | ЭП ДТП, ОБДД  |
| 8.1   | H1                                                   | Возраст                                   | лет               |               |
| 8.2   | H2                                                   | Антропометрические данные по группе В     | —                 |               |
| 8.3   | H3                                                   | Время суток                               | час               |               |
| 8.4   | H4                                                   | Время года                                | месяц             |               |
| 8.5   | H5                                                   | Психическое состояние                     | —                 |               |
| 8.6   | H6                                                   | Соматическое состояние                    | —                 |               |
| 8.7   | H7                                                   | Особенности ОДА/Способ перемещения        | —                 |               |
| 8.8   | H8                                                   | Особенности зрения                        | —                 |               |
| 8.9   | H9                                                   | Разговор по телефону/написание сообщений  | —                 |               |
| 8.10  | H10                                                  | Присоединение к группе/спутнику           | —                 |               |
| 8.11  | H11                                                  | Наличие ручной клади                      | —                 |               |
| 9     | <b>І. Группа факторов активности водителя в ДД</b>   |                                           |                   | ЭП ДТП, ОБДД  |
| 9.1   | I1                                                   | Возраст                                   | лет               |               |
| 9.2   | I2                                                   | Время за рулем                            | час               |               |
| 9.3   | I3                                                   | Стаж вождения                             | лет               |               |
| 9.4   | I4                                                   | Время суток                               | час               |               |
| 9.5   | I5                                                   | Время года                                | месяц             |               |
| 9.6   | I6                                                   | Психическое состояние                     | —                 |               |
| 9.7   | I7                                                   | Соматическое состояние                    | —                 |               |
| 9.8   | I8                                                   | Видимость с рабочего места                | м                 |               |
| 9.9   | I9                                                   | Разговор по телефону/написание сообщений  | —                 |               |
| 10    | <b>Ј. Группа факторов организации ДД в месте ДТП</b> |                                           |                   | ЭП ДТП, ОБДД  |
| 10.1  | J1                                                   | Наличие средств регулирования в месте ДТП | —                 |               |
| 10.2  | J2                                                   | Видимость места ДТП                       | м                 |               |

Окончание таблицы 1.3

| № п/п     | Индекс                                       | Наименование фактора                                                 | Единицы измерения | Ключевой слой |
|-----------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------|
| 10.3      | J3                                           | Освещенность места ДТП                                               | —                 | ЭП ДТП, ОБДД  |
| 10.4      | J4                                           | Наличие пешеходных ограждений                                        | —                 |               |
| 10.5      | J5                                           | Наличие краткосрочных/долгосрочных работ в месте ДТП                 | —                 |               |
| 10.6      | J6                                           | Ограничение скорости движения                                        | км/ч              |               |
| 10.7      | J7                                           | Наличие допустимых/недопустимых объектов снижающих видимость         | —                 |               |
| 10.8      | J8                                           | Наличие устоявшихся путей движения пешеходов, отличных от допустимых | —                 |               |
| 10.9      | J9                                           | Наличие центров притяжения пешеходов                                 | —                 |               |
| 10.10     | J10                                          | Интенсивность пешеходного движения                                   | чел/ч             |               |
| 10.11     | J11                                          | Количество опасных ДТС/конфликтов по ПВВ                             | —                 |               |
| <b>11</b> | <b>К. Группа факторов выбора мероприятий</b> |                                                                      |                   | ЭП ДТП, ОБДД  |
| 11.1      | K1                                           | Стоимость мероприятия                                                | тыс.руб.          |               |
| 11.2      | K2                                           | Прогнозируемое снижение числа ДТП                                    | АППГ              |               |
| 11.3      | K3                                           | Прогнозируемое снижение индексов травмирования                       | —                 |               |
| 11.4      | K4                                           | Тип мероприятия                                                      | —                 |               |
| 11.5      | K5                                           | Снижение числа опасных ДТС                                           | —                 |               |
| <b>12</b> | <b>Л. Группа факторов ПБ ТС</b>              |                                                                      |                   | ЭП ДТП, ОБДД  |
| 12.1      | L1                                           | Геометрия фронтальной части по группе А                              | —                 |               |
| 12.2      | L2                                           | Наличие пассивных средств                                            | —                 |               |
| 12.3      | L3                                           | Видимость, заметность ТС                                             | —                 |               |
| 12.4      | L4                                           | Наличие систем ADAS                                                  | —                 |               |
| 12.5      | L5                                           | Степень интеграции в ИТС                                             | —                 |               |
| 12.6      | L6                                           | Стоимость решений ПБ ТС                                              | руб               |               |

Микро и макро совокупности ОПУС формируют пространства состояний пересекающихся с другими по своим компонентам в n-мерном окружении (см. рис.1.5), что позволяет определить в онтологии предметной области настоящего исследования группы критериев эффективности для рассматриваемых слоев, индексы критериев и приоритетов показаны в таблице 1.4 и использованы далее как при формировании принципов цифровизации процессов взаимодействия подсистем с учетом пространства

состояний системы ОПУС, показанных далее, так и при оценке эффективности разработанных комплексов методов и методик для ДТЭ, ЭП ДТП и повышения ПБ ТС и ЭДО.

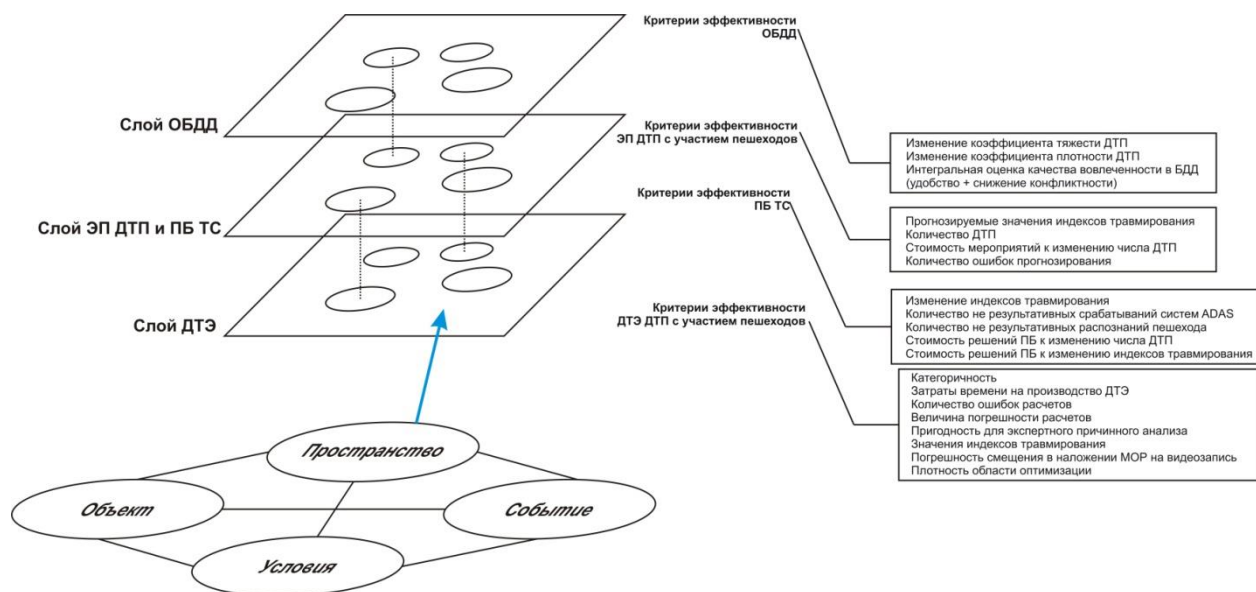


Рисунок 1.5 – Визуальное представление переходов связей множеств ОПУС между слоями

Таблица 1.4 – Критерии эффективности в онтологии предметной области исследования

| № п/п                                                      | Наименование критерия                               | Индекс функции критерия | Индекс функции внутренних требований | Индекс приоритета | Индекс приоритета внутренних требований |
|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------|
| <b>Критерии эффективности ДТЭ ДТП с участием пешеходов</b> |                                                     |                         |                                      |                   |                                         |
| 1                                                          | Категоричность                                      | $F_{д1}$                | $F_{д9}$                             | $ад1$             | $ад9$                                   |
| 2                                                          | Затраты времени на производство ДТЭ                 | $F_{д2}$                |                                      | $ад2$             |                                         |
| 3                                                          | Количество ошибок расчетов                          | $F_{д3}$                |                                      | $ад2$             |                                         |
| 4                                                          | Величина погрешности расчетов                       | $F_{д4}$                |                                      | $ад3$             |                                         |
| 5                                                          | Пригодность для экспертного причинного анализа      | $F_{д5}$                |                                      | $ад3$             |                                         |
| 6                                                          | Значения индексов травмирования                     | $F_{д6}$                |                                      | $ад4$             |                                         |
| 7                                                          | Погрешность смещения в наложении МОР на видеозапись | $F_{д7}$                |                                      | $ад4$             |                                         |
| 8                                                          | Плотность области оптимизации                       | $F_{д8}$                |                                      | $ад5$             |                                         |

| №<br>п/п                                           | Наименование критерия                                                                | Индекс<br>функции<br>критерия | Индекс<br>функции<br>внутренних<br>требований | Индекс<br>приоритета | Индекс<br>приоритета<br>внутренних<br>требований |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------|
| Критерии эффективности ЭП ДТП с участием пешеходов |                                                                                      |                               |                                               |                      |                                                  |
| 9                                                  | Прогнозируемые значения индексов травмирования                                       | F <sub>ЭП1</sub>              | F <sub>ЭП5</sub>                              | a <sub>ЭП1</sub>     | a <sub>ЭП5</sub>                                 |
| 10                                                 | Количество ДТП                                                                       | F <sub>ЭП2</sub>              |                                               | a <sub>ЭП2</sub>     |                                                  |
| 11                                                 | Стоимость мероприятий к изменению числа ДТП                                          | F <sub>ЭП3</sub>              |                                               | a <sub>ЭП3</sub>     |                                                  |
| 12                                                 | Количество ошибок прогнозирования                                                    | F <sub>ЭП4</sub>              |                                               | a <sub>ЭП4</sub>     |                                                  |
| Критерии эффективности ПБ ТС и ПБ ОТИ              |                                                                                      |                               |                                               |                      |                                                  |
| 13                                                 | Изменение индексов травмирования                                                     | F <sub>П1</sub>               | F <sub>П6</sub>                               | a <sub>П1</sub>      | a <sub>П6</sub>                                  |
| 14                                                 | Количество не результативных срабатываний систем ADAS                                | F <sub>П2</sub>               |                                               | a <sub>П2</sub>      |                                                  |
| 15                                                 | Количество не результативных распознаний пешехода                                    | F <sub>П3</sub>               |                                               | a <sub>П3</sub>      |                                                  |
| 16                                                 | Стоимость решений ПБ к изменению числа ДТП                                           | F <sub>П4</sub>               |                                               | a <sub>П4</sub>      |                                                  |
| 17                                                 | Стоимость решений ПБ к изменению индексов травмирования                              | F <sub>П5</sub>               |                                               | a <sub>П5</sub>      |                                                  |
| Критерии эффективности ОБДД                        |                                                                                      |                               |                                               |                      |                                                  |
| 18                                                 | Изменение коэффициента тяжести ДТП                                                   | F <sub>О1</sub>               | F <sub>О4</sub>                               | a <sub>О1</sub>      | a <sub>О4</sub>                                  |
| 19                                                 | Изменение коэффициента плотности ДТП                                                 | F <sub>О2</sub>               |                                               | a <sub>О2</sub>      |                                                  |
| 20                                                 | Интегральная оценка качества вовлеченности в БДД (удобство + снижение конфликтности) | F <sub>О3</sub>               |                                               | a <sub>О3</sub>      |                                                  |

### 1.7. Принципы цифровизации процессов взаимодействия подсистем с учетом пространства состояний системы ОПУС

В развитие сформированной теории и рабочей гипотезы настоящей работы, было введено условие дифференцируемости, позволившее применить в формировании принципов цифровизации квазилинейные

модели. А именно модели, которые могут быть синтезированы при условии дифференцируемости нелинейностей исходных моделей объектов. Такие модели позволяют найти управление аналитически, то есть в результате решения некоторой системы уравнений.

Следует отметить, что в классическом регрессионном моделировании квазилинейные регрессии оцениваются с помощью метода наименьших квадратов. Однако полученным при этом оценкам параметров квазилинейной модели редко удаётся дать какую-либо содержательную интерпретацию. В итоге построенную регрессию при условии, что она обладает высоким качеством аппроксимации, можно использовать только для получения прогнозов, что существенно снижает её практическую значимость. С учетом этого в синтезе нелинейных полисистем, в частности для пространства состояний ОПУС квазилинейные модели могут быть получены аналитически, путём взятия частных производных от нелинейностей исходной модели и последующего интегрирования этих производных по вспомогательной переменной. Для этого может использоваться численный метод, который исключает необходимость аналитического дифференцирования и интегрирования. Такой метод позволяет получить достаточно точную приближённую кусочно-постоянную квазилинейную модель объектов со сложными нелинейностями. Соответственно при ракурсе на определение принципов цифровизации процессов взаимодействия как полисистем ОПУС так и в целом связи исследуемых слоев ДТЭ – ЭП ДТП – ПБ ТС и ЭДО – ОБДД квазилинейные модели удобно применять при цифровом управлении нелинейными объектами.

Слой ОБДД является зависимой системой, которая испытывает как внешние управляющие, так и меняет состояние под воздействием связей от нижележащих слоев ДТЭ – ЭП ДТП. Индексация функций  $F_{oi}$  и приоритетов  $a_i$  согласно табл.1.4.

Регулятор (источник управляющих воздействий), расположенный как в отрасли, так и выше нее, оказывает влияние на развитие каждого слоя в исследуемых связях: ДТЭ – ЭП ДТП – ПБ ТС и ЭДО – ОБДД. Относительно вышеизложенных критериев эффективности, в рамках предложенной квазилинейной модели, для каждого слоя (группы критериев эффективности) были описаны условия существования стационарных точек целевой функции и точек локальных экстремумов ненулевых непрерывных функций типа  $F_{Oi}$ , а также достигнута максимизация целевой функции, т.е. максимизация эффективности в слое по выбранным критериям.

Целевая функция регулятора для слоя ОБДД будет иметь вид:

$$F_O = F_{O1}^{a_1} F_{O2}^{a_2} F_{O3}^{a_{13}} F_{O4}^{1-(a_1+a_2+a_3)} \quad (1.4)$$

показатели которой удовлетворяют условиям:  $a_1+a_2+a_3+a_4 = 1$  и  $a_i > 0$ .

Учитывая предлагаемое введение редукции самоподобных состояний в полисистеме ОПУС в рассмотрении остаются ситуации или состояния, когда существуют точки локальных и глобальных максимумов функции  $F_O$ , что позволяет считать что  $F_{Oi}$  могут быть представлены функциями следующего вида:

$$F_{Oi}(x) = \left( \sum_{k=1}^n a_k^i x_k + b_i \right) I_{\{\sum_{k=1}^n a_k^i x_k + b_i > 0\}}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (1.5)$$

где  $I$  – индикатор множества состояний.

При нахождении частных производных функций и использовании дополнений  $(s, t, u)$  для сокращения записи получим:

$$\begin{aligned} F(s, t, u) = & (s + b_1)^{a_1} \cdot (t + b_2)^{a_2} \cdot (u + b_3)^{a_3} \\ & \cdot \left( \frac{a_1 c_1}{((a_1 + a_2 + a_3) - 1)} s + \frac{a_2 c_2}{((a_1 + a_2 + a_3) - 1)} t \right. \\ & \left. + \frac{a_3 c_3}{((a_1 + a_2 + a_3) - 1)} u \right)^{(1-(a_1+a_2+a_3))} \end{aligned} \quad (1.6)$$

Откуда, необходимое условие экстремума функции  $F(s, t, u)$  в стационарной точке  $x \in \bigcap_{i=1}^4 B$ , с учетом условий (1.2), будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{aligned} &\left( a_1 \frac{a_1 c_1}{((a_1 + a_2 + a_3) - 1)} - a_1 c_1 \right) s + \left( a_1 \frac{a_2 c_2}{((a_1 + a_2 + a_3) - 1)} \right) t + \\ &\quad + \left( a_1 \frac{a_3 c_3}{((a_1 + a_2 + a_3) - 1)} \right) u = a_1 c_1 b_1 - a_1 b_4 \\ &\left( a_2 \frac{a_1 c_1}{((a_1 + a_2 + a_3) - 1)} \right) s + \left( a_2 \frac{a_2 c_2}{((a_1 + a_2 + a_3) - 1)} - a_2 c_2 \right) t + \\ &\quad + \left( a_2 \frac{a_3 c_3}{((a_1 + a_2 + a_3) - 1)} \right) u = a_2 c_2 b_2 - a_2 b_4 \\ &\left( a_3 \frac{a_1 c_1}{((a_1 + a_2 + a_3) - 1)} \right) s + \left( a_3 \frac{a_2 c_2}{((a_1 + a_2 + a_3) - 1)} \right) t + \\ &\quad + \left( a_3 \frac{a_3 c_3}{((a_1 + a_2 + a_3) - 1)} - a_3 c_3 \right) u = a_3 c_3 b_3 - a_3 b_4 \end{aligned} \right. \quad (1.7)$$

Аналогичные разложения в квазилинейной постановке были выполнены для всех групп критериев по таблице 1.4.

Данный подход, показывает, что рассматриваемые в работе слои ДТЭ – ЭП ДТП– ОБДД могут находиться в состоянии рациональной эффективности по заданным критериям, если управление слоем осуществляется за счет жесткой регуляции приоритетов, основываясь на потоковой обработке больших объемов данных

На основе изложенных положений была разработана программа на языке Python, код которой приведен в Приложении Г.1. В целом, представление алгоритма данной программы в виде таблицы 1.5 (в виде подготовки кода пригодного для перевода в Mermaid (ИИ-ресурс построения блок-схем, алгоритмов, временных потоков)) полностью реализует описанное выше квазилинейное представление с сохранением всех математических свойств исходной постановки задачи.

Ключевые особенности разработанного решения (см. Приложение Г.1) выражаются в организации иерархической структуры которая позволяет выполнить последовательная обработку трех исследуемых слоев, сохраняющая излагаемый в работе подход, при этом учет

ограничений осуществляется через параметр `bounds` в `minimize()` (см. Приложение Г.1). Представленное решение обладает гибкостью, что позволяет легко добавить новые критерии. Имеется возможность осуществления визуального контроля и оценки областей решений, для этого строятся 3D-графики для интерпретации результатов.

Таблица 1.5 – Структурное описание работы программы

| Этап в блок схеме                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Описание                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Особенности и примечания (коды на Python)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A[Начало] --> B<br>B --> B1<br>B --> B2<br>B --> B3                                                                                                                                                                                                                                                     | Инициализация параметров<br>Задание коэффициентов $a, b, \alpha$<br>Определение границ переменных<br>Стартовое приближение $x_0$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | $a_D, a_{EP}, a_O$ – матрицы коэффициентов критериев<br>$b_D, b_{EP}, b_O$ – свободные члены<br>$\alpha_D, \alpha_{EP}, \alpha_O$ – приоритеты критериев<br><code>bounds</code> – ограничения на переменные                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| B --> C<br>C --> C1<br>C --> C2<br>C --> C3<br>C --> D<br>D --> D1<br>D --> D2<br>D --> D3<br>D --> E<br>E --> E1<br>E --> E2<br>E --> E3<br>E --> F<br>F --> F1<br>F --> F2<br>F --> G<br>G --> G1<br>G --> G2<br>G --> G3<br>G --> H<br>H --> H1<br>H --> H2<br>H --> H3<br>H --> I<br>I --> J[Конец] | Определение функций критериев<br>$F_{Di}$ для слоя ДТЭ<br>$F_{EPi}$ для слоя ЭП ДТП<br>$F_{Oi}$ для слоя ОБДД<br>Построение целевых функций<br>$target\_F\_D$ с приоритетами $\alpha_D$<br>$target\_F\_EP$ с приоритетами $\alpha_{EP}$<br>$target\_F\_O$ с приоритетами $\alpha_O$<br>Оптимизация<br>Минимизация $-target\_F\_D$<br>Минимизация $-target\_F\_EP$<br>Минимизация $-target\_F\_O$<br>Проверка ограничений<br>Сумма $x = 1$<br>Границы $0 \leq x \leq 1$<br>Получение оптимальных $x^*$<br>$optimal\_D$ для ДТЭ<br>$optimal\_EP$ для ЭП ДТП<br>$optimal\_O$ для ОБДД<br>Визуализация<br>3D-график для ДТЭ<br>3D-график для ЭП ДТП<br>3D-график для ОБДД<br>Вывод результатов | <code>def F_Di(x, a, b, i):</code><br><code>return (np.sum(a[i] * x) + b[i]) * (np.sum(a[i] * x) + b[i] &gt; 0)</code><br><br><code>def target_F_D(x, a_D, b_D, alpha_D):</code><br><code>return np.prod([F_Di(...)**alpha for alpha in alpha_D])</code><br>Используется метод минимизации с ограничениями<br>Целевая функция инвертируется ( $-target\_F$ )<br><br>Строятся 3D-графики для первых трех переменных<br>Пример для слоя ДТЭ:<br><code>ax.scatter(optimal_D[0], optimal_D[1], optimal_D[2], c='r')</code> |

Предложенная квазилинейная модель унифицирует представление для всех слоев (ДТЭ, ЭП ДТП, ОБДД) и учитывает взаимосвязи через общие

переменные  $x_k$  и приоритеты  $a_i$ , а также позволяет находить стационарные точки и экстремумы для рационального управления. Практическое применение данного теоретического аппарата, изложенного в настоящей главе, требует обработки больших объемов фактических данных для регуляции приоритетов в реальном времени.

Пример вывода решения, можно описать в следующем виде: для слоя ДТЭ максимизация  $F_d$  достигается при балансе между точностью ( $F_{d4}, F_{d5}$ ) и скоростью ( $F_{d2}$ ), а для слоя ОБДД — при приоритете снижения тяжести ДТП ( $F_{o1}$ ). Рассмотрим примеры применения предложенного аппарата в реализации по Приложению Г.1:

Формально, для каждого слоя (ДТЭ, ЭП ДТП, ОБДД) решается следующая задача: найти вектор весов  $x=(x_1, \dots, x_n)$ , который максимизирует целевую функцию в квазилинейной форме:

$$F(x) = \prod_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^m c_{ij} x_j + b_i \right)^{a_i} \cdot I_{\{\sum_{j=1}^m c_{ij} x_j + b_i > 0\}}, \quad (1.8)$$

где  $x=(x_1, \dots, x_m)$  - вектор весовых коэффициентов (искомые переменные);

$c_{ij}$  - вклад параметра  $x_j$  в критерий  $f_i$ ;

$b_i$  - свободный член (базовый уровень критерия);

$a_i$  - приоритет критерия ( $\sum a_i = 1$ );

$I$  - индикаторная функция (активация при  $f_i > 0$ ).

При ограничениях:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n x_j &= 1 \\ x_j &\geq 0 \\ \sum_{i=1}^n a_i &= 1 \end{aligned} \quad (1.9)$$

В качестве метода решения (оптимизации) использовался градиентный метод с проекцией на симплекс (для учета ограничений):

Начальное приближение задавалось как равномерное распределение  $x_j^{(0)} = \frac{1}{m}$ .

Итеративное обновление:

$$x_j^{(k+1)} = P_{\Omega} \left( x_j^{(k)} + \gamma_k \nabla F(x^{(k)}) \right), \quad (1.10)$$

где  $P_{\Omega}$  - проекция на симплекс  $\Omega = \{x \mid \sum x_j = 1, x_j \geq 0\}$

$\gamma_k$  — шаг обучения

$\nabla F$  — градиент целевой функции:

$$\frac{\partial F}{\partial x_j} = F(x) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{a_i c_{ij}}{\sum_{k=1}^m c_{ik} x_k + b_i} \quad (1.11)$$

Критерий остановки:  $\|x^{(k+1)} - x^{(k)}\| < \varepsilon$  (обычно  $\varepsilon = 10^{-4}$ )

С целью иллюстрации вывода были выбраны 10 сценариев, которые показаны в таблице 1.6 и оценена их целевая функция (столбец «эффективность» таблицы 1.6), которая рассчитывается как значение  $F(x^*)$  по (1.8) в найденной стационарной точке  $x^*$  по (1.7).

Результаты оценки оптимальных весов приоритетов для ДТЭ, ЭП ДТЭ и ОБДД, для рассматриваемых примеров показаны в таблица 1.7 и 1.8.

Численные значения в таблицах 1.7 и 1.8 представляют собой оптимальные веса приоритетов (нормализованные от 0 до 1), полученные в результате решения задачи оптимизации для выбранных 10 сценариев. Например, значение 0,35 для  $F_{д2}$  («Затраты времени») в Примере 2 означает, что 35% ресурсов системы в этом сценарии оптимально выделить на минимизацию времени экспертизы.

Анализ данных 10 примеров (сценариев) показал, что система способна эффективно перераспределять приоритеты в зависимости от поставленных задач. Наибольшая эффективность (0,91) достигнута в Примере 4 с акцентом на безопасность, где все слои работали согласованно. В частности, Пример 4 демонстрирует устойчивую работу в условиях взаимозависимости слоев. Ресурсы распределяются так, чтобы: нижний слой (ДТЭ) обеспечивал

точность данных, средний слой (ЭП ДТП) минимизировал риски и верхний слой (ОБДД) максимизировал общую безопасность (БДД). Таким образом, может быть обеспечено решение как локальных, так и стратегических задач управления.

Таблица 1.6 – Сводные результаты оценки эффективности

| Номер примера | Сценарий                    | Оптимальные параметры ДТЭ      | Оптимальные параметры ЭП ДТП | Оптимальные параметры ОБДД | Эффективность |
|---------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------|
| 1             | Базовый сбалансированный    | Равномерное распределение      | Баланс всех параметров       | Стандартные приоритеты     | 0,82          |
| 2             | Точность экспертизы         | Акцент на ошибки и погрешности | Стандартные значения         | Нормативные показатели     | 0,88          |
| 3             | Минимизация затрат          | Стандартные параметры          | Максимум на стоимости мер    | Без изменений              | 0,85          |
| 4             | Максимизация безопасности   | Увеличение точности            | Рост прогнозирования         | Акцент на тяжесть ДТП      | 0,91          |
| 5             | Оперативность экспертизы    | Минимум времени                | Стандартные значения         | Нормативные показатели     | 0,83          |
| 6             | Комплексная оптимизация     | Сбалансированные значения      | Равномерное распределение    | Баланс показателей         | 0,89          |
| 7             | Прогнозирование ДТП         | Стандартные параметры          | Максимум на индексе травм    | Без изменений              | 0,87          |
| 8             | Бюджетная оптимизация       | Экономия ресурсов              | Акцент на дешевые меры       | Снижение затрат            | 0,84          |
| 9             | Снижение конфликтности      | Стандартные параметры          | Баланс показателей           | Акцент на вовлеченность    | 0,86          |
| 10            | Детализированная экспертиза | Максимум категоричности        | Стандартные значения         | Нормативные показатели     | 0,9           |

Специализированные сценарии (Примеры 2, 5, 10) демонстрируют, что система может гибко адаптироваться к конкретным требованиям – будь то точность экспертизы, оперативность или детализация, сохраняя при этом базовую функциональность других компонентов.

Бюджетные ограничения (Пример 8) требуют компромиссов – при эффективности 0,84 система жертвует частью прогностической способности ради экономии средств, что подтверждает важность балансировки критериев.

Таблица 1.7 – Результаты оценки оптимальных весов приоритетов для ДТЭ, при базовом наборе оценки (5 из 8) для рассматриваемых примеров

| Пример | Сценарий                    | Критерии эффективности ДТЭ по таблице 1.4 |                 |                 |                 |                 |
|--------|-----------------------------|-------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|        |                             | Е <sub>д1</sub>                           | Е <sub>д2</sub> | Е <sub>д3</sub> | Е <sub>д4</sub> | Е <sub>д5</sub> |
| 1      | Базовый сбалансированный    | 0,15                                      | 0,20            | 0,15            | 0,20            | 0,30            |
| 2      | Точность экспертизы         | 0,05                                      | 0,35            | 0,30            | 0,15            | 0,15            |
| 3      | Минимизация затрат          | 0,15                                      | 0,20            | 0,15            | 0,20            | 0,30            |
| 4      | Максимизация безопасности   | 0,20                                      | 0,20            | 0,15            | 0,15            | 0,30            |
| 5      | Оперативность экспертизы    | 0,10                                      | 0,40            | 0,10            | 0,20            | 0,20            |
| 6      | Комплексная оптимизация     | 0,18                                      | 0,22            | 0,18            | 0,20            | 0,22            |
| 7      | Прогнозирование ДТП         | 0,15                                      | 0,20            | 0,15            | 0,20            | 0,30            |
| 8      | Бюджетная оптимизация       | 0,10                                      | 0,25            | 0,15            | 0,25            | 0,25            |
| 9      | Снижение конфликтности      | 0,15                                      | 0,20            | 0,15            | 0,20            | 0,30            |
| 10     | Детализированная экспертиза | 0,25                                      | 0,15            | 0,20            | 0,25            | 0,15            |

Таблица 1.8 – Результаты оценки оптимальных весов приоритетов для ЭП и ОБДД, при полном наборе оценки (4 из 4 и 3 из 3) для рассматриваемых примеров

| Пример | Сценарий                    | Критерии эффективности ЭП по таблице 1.4 |                  |                  |                  | Критерии эффективности ОБДД по таблице 1.4 |                 |                 |
|--------|-----------------------------|------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------------------------------|-----------------|-----------------|
|        |                             | Е <sub>эп1</sub>                         | Е <sub>эп2</sub> | Е <sub>эп3</sub> | Е <sub>эп4</sub> | Е <sub>о1</sub>                            | Е <sub>о2</sub> | Е <sub>о3</sub> |
| 1      | Базовый сбалансированный    | 0,25                                     | 0,20             | 0,20             | 0,15             | 0,25                                       | 0,25            | 0,20            |
| 2      | Точность экспертизы         | 0,20                                     | 0,25             | 0,20             | 0,15             | 0,25                                       | 0,25            | 0,20            |
| 3      | Минимизация затрат          | 0,10                                     | 0,10             | 0,50             | 0,15             | 0,25                                       | 0,25            | 0,20            |
| 4      | Максимизация безопасности   | 0,30                                     | 0,20             | 0,15             | 0,15             | 0,35                                       | 0,25            | 0,20            |
| 5      | Оперативность экспертизы    | 0,20                                     | 0,25             | 0,20             | 0,15             | 0,25                                       | 0,25            | 0,20            |
| 6      | Комплексная оптимизация     | 0,22                                     | 0,22             | 0,22             | 0,17             | 0,25                                       | 0,25            | 0,20            |
| 7      | Прогнозирование ДТП         | 0,40                                     | 0,20             | 0,15             | 0,10             | 0,25                                       | 0,25            | 0,20            |
| 8      | Бюджетная оптимизация       | 0,15                                     | 0,15             | 0,40             | 0,15             | 0,20                                       | 0,20            | 0,25            |
| 9      | Снижение конфликтности      | 0,25                                     | 0,20             | 0,20             | 0,15             | 0,20                                       | 0,20            | 0,30            |
| 10     | Детализированная экспертиза | 0,25                                     | 0,20             | 0,20             | 0,15             | 0,25                                       | 0,25            | 0,20            |

Комплексная оптимизация (Пример 6) показывает, что система способна находить устойчивые конфигурации с высокой интегральной эффективностью (0,89) без экстремальных перекосов в какие-либо параметры.

Следует также отметить, что акцент на одном слое (например, на прогнозировании в Примере 7) не всегда дает максимальный общий эффект, подтверждая необходимость целостного подхода к управлению безопасностью дорожного движения.

Обобщим показные решения в следующих положениях:

**Эффективность специализированных подходов.** Анализ результатов показывает, что специализированные конфигурации (Примеры 2, 4, 5, 10) действительно позволяют достигать высоких показателей по выбранным направлениям. Например, сценарий "Точность" (Пример 2) демонстрирует значительное улучшение показателей ошибок расчетов (0,30) и затрат времени (0,35), однако это достигается за счет снижения категоричности экспертизы (0,05) и пригодности для причинного анализа (0,15). Подобные компромиссы необходимо учитывать при практическом внедрении системы.

**Бюджетные ограничения и их последствия.** Пример 8 ("Бюджет") наглядно иллюстрирует, как финансовые ограничения влияют на общую эффективность системы. При концентрации на стоимости мер (0,40) существенно страдают показатели прогнозирования (0,15) и количества ДТП (0,15). Интересно отметить, что такая конфигурация оказывает минимальное влияние на показатели безопасности (тяжесть и плотность ДТП остаются на уровне 0,20), что свидетельствует о определенной "прочности" системы.

**«Комплексный подход» относительно «специализации».** Сравнение Примеров 4 ("Безопасность") и 6 ("Комплекс") показывает, что узкая специализация дает несколько лучший результат по целевому показателю (0,91 против 0,89), но требует значительных перекосов в распределении ресурсов. Комплексный подход обеспечивает более устойчивую

конфигурацию, где все показатели находятся в сбалансированном состоянии, что может быть предпочтительнее для долгосрочного использования.

**Неожиданные взаимосвязи показателей.** Анализ выявил несколько неочевидных зависимостей. Например, в Примере 9 ("Конфликтность") повышенное внимание к вовлеченности (0,30) не привело к ожидаемому росту других показателей безопасности. Более того, это вызвало небольшое снижение тяжести ДТП (0,20 против базовых 0,25). Это указывает на сложный характер взаимосвязей между социальными и техническими аспектами безопасности дорожного движения.

**Оперативность относительно качества.** Пример 5 ("Оперативность") демонстрирует типичную дилемму - при максимальном внимании к скорости экспертизы (0,40) существенно страдают показатели точности (ошибки расчетов – 0,10) и полноты анализа (причинный анализ – 0,20). Однако общая эффективность системы снижается незначительно (0,83 против базовых 0,82), что может оправдывать такой подход в условиях срочных расследований.

**Перспективные направления.** Наибольший интерес представляет Пример 10 ("Детализация"), где акцент на категоричности экспертизы (0,25) и погрешности расчетов (0,25) привел к максимальной общей эффективности (0,90). Это свидетельствует о том, что инвестиции в качество исходных данных экспертизы могут давать непропорционально высокий эффект для всей системы.

**Практические рекомендации:** для реального внедрения системы рекомендуется: использовать комплексную конфигурацию (Пример 6) как базовую, применять специализированные сценарии (Примеры 2,4,10) для решения конкретных задач, избегать экстремальных перекосов в распределении ресурсов (Примеры 3,8), регулярно пересматривать приоритеты на основе анализа эффективности и уделять особое внимание качеству исходных данных ДТЭ.

Все сценарии подтверждают работоспособность квазилинейной модели – система сохраняет стабильность даже при значительных изменениях приоритетов, что критически важно для реального применения.

Наилучшие результаты достигаются при согласованной работе всех трех слоев, когда ДТЭ обеспечивает точные данные, ЭП ДТП - качественные прогнозы, а ОБДД - сбалансированные управляющие воздействия.

Наблюдаемая взаимосвязь между слоями через общие переменные, на базе приведенных примеров позволяет также проверить устойчивость модели с разными приоритетами и выполнить анализ чувствительности целевых функций к изменениям  $\alpha_i$ . В этой связи также целесообразно отметить, что при практическом применении предложенного аппарата необходимо визуализировать не только оптимальные точки, но и траектории оптимизации (например, через градиентные методы).

Изложенное также позволяет определить расширение принципа цифровизации в следующей формулировке: использование квазилинейной постановки перехода от УПМК на ВП к совокупности ЦД определяет допустимость решений в пространстве состояний ОПУС для всех слоев исследования, при этом квазилинейность модели указывает на квазистационарность системы в целом, что при цифровизации делает состояние ОПУС пригодным для блокчейна, что приводит к новым возможностям по цифровой трансформации, с учетом того, что линейная зависимость системы векторов приоритетов (вне зависимости от их числа) позволяет квантовать поверхности состояний, тем самым определяя уровни БДД.

## 1.8. Выводы по Главе 1

1. Доказана целесообразность расширения методологии реконструкции ДТП путем создания комплексного метода исследования механизма ДТП с использованием МНЛ, позволяющего эксперту в процессах анализа

механизма ДТП учитывать и принимать решения в условиях неопределенности исходных данных. В этом случае она позволяет устранить недостатки действующих методов расчета перемещений объектов исследования при реконструкции ДТП. Такую задачу предложено включить в процессы анализа ДТП (получение – обработка – моделирование – представление) как аппарат МНЛ на этапах обработки и моделирования, для поддержки принятия решения экспертом.

2. Даны определения и сформирован терминологический аппарат изложенной концепции.

3. Рассматривая МОР как фундаментальный принцип реализации механизма обеспечения эффективности ДТЭ и ЭП ДТП по мере интеграции информационного пространства из ПСИ в КФИ и перехода от КФИ к КФС, изложим концепцию эволюции систем с целью формирования теории оценки состояний, пригодного на настоящем этапе эволюции для обеспечения условий дальнейшего перехода по оси развития и для решения цели настоящего диссертационного исследования (обеспечение эффективности). Для этого определено, что **система ОПУС (полисистема ОПУС)** это неразрывно связанная система образуемая подсистемами: Объект, Пространство, Условие и Событие, взаимодействие между которыми определяет состояние **функциональной, пользовательской и киберфизической безопасности дорожного движения**. В которой, при эксплуатации автомобильного транспорта, контроль за процессами управления имеет антропоцентрическую и информационную сущности, с сетевой масштабируемой иерархией, осуществляется без участия человека и направлен на исключение травмирования пассажира.

4. Определена онтология предметной области исследования, определено факторное пространство, определены группы критериев эффективности ДТЭ, ЭП ДТП, ПБ ТС и ЭДО, а также ОБДД.

5. Дано определение расширению принципа цифровизации в следующей формулировке: использование квазилинейной постановки

перехода от УПМК на ВП к совокупности ЦД определяет допустимость решений в пространстве состояний ОПУС для всех слоев исследования, при этом квазилинейность модели указывает на квазистационарность системы в целом, что при цифровизации делает состояние ОПУС пригодным для блокчейна, что приводит к новым возможностям по цифровой трансформации, с учетом того, что линейная зависимость системы векторов приоритетов (вне зависимости от их числа) позволяет квантовать поверхности состояний, тем самым определяя уровни БДД.

## **ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩЕГО АППАРАТА АНАЛИЗА ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ В ДТЭ И ЭП ПО ДТП С УЧАСТИЕМ ПЕШЕХОДОВ**

### **2.1. Общий анализ выполненных ДТЭ по ДТП с участием пешеходов**

Методическое пространство, формируемое на связи, образуемой между теоретическими, методическими и технологическими основами производства дорожно-транспортной экспертизы (ДТЭ) и экспертной профилактикой ДТП, как правило, занимает особую нишу в научных изысканиях, рассматриваясь чаще всего только как обособленное средство в обеспечении контроля за исполнением участниками дорожного движения предъявляемых к ним норм регулирования, в частности требований ПДД РФ. При этом как правило, роль экспертной профилактики ДТП (по результатам именно производства ДТЭ) в разработке мер по снижению травмирования (водителем, пассажирами, пешеходами и т.д.) отводят на задний план. Поэтому на настоящий момент в РФ профилактику ДТП с пешеходами в целом следует отнести к практике сугубо фискального характера, а само понятие экспертной профилактики ДТП за прошедшие годы сильно оторвалось от реальной практики ДТЭ, связанной именно с реконструкцией механизма ДТП.

Вместе с тем, следует обратить внимание на то, что в сфере производства ДТЭ сохраняется обширная область методических «белых пятен», где нет научно-обоснованных методик решения конкретных экспертных задач. При этом, общая тенденция в производстве ДТЭ смещена в настоящее время в сторону развития методов анализа видеоматериалов, фиксирующих момент ДТП. На настоящий момент в РФ складывается ситуация, в которой в реальной практике производства ДТЭ доминирующее положение занимают трасолго-автотехнические методики, разработанные более чем 30-40 лет назад. При этом данные методики почти не имеют научно-практического аппарата оценки рисков травмирования и более того

не оперируют понятием индекса травмирования как таковым. Тогда как в зарубежной практике индексы травмирования активно вошли в практику производства ДТЭ и в экспертную профилактику ДТП уже в 80-х годах прошлого века.

На рисунке 2.1 представлено средневзвешенное соотношение публикаций по пешеходам (включая наезды на велосипедистов) в РФ и за рубежом относительно основных тематик научных публикаций, связанных с экспертной профилактикой ДТП с участием пешеходов. Данный обзор был составлен на основе публикаций [84-86], а также с учетом поисковых запросов на сайтах elibrary.ru и cyberleninka.ru по ключевым словам, а также с учетом запросов на официальном сайте ВАК РФ по архиву защит диссертаций по специальности 05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта за период с 2011 года по 2022 год.

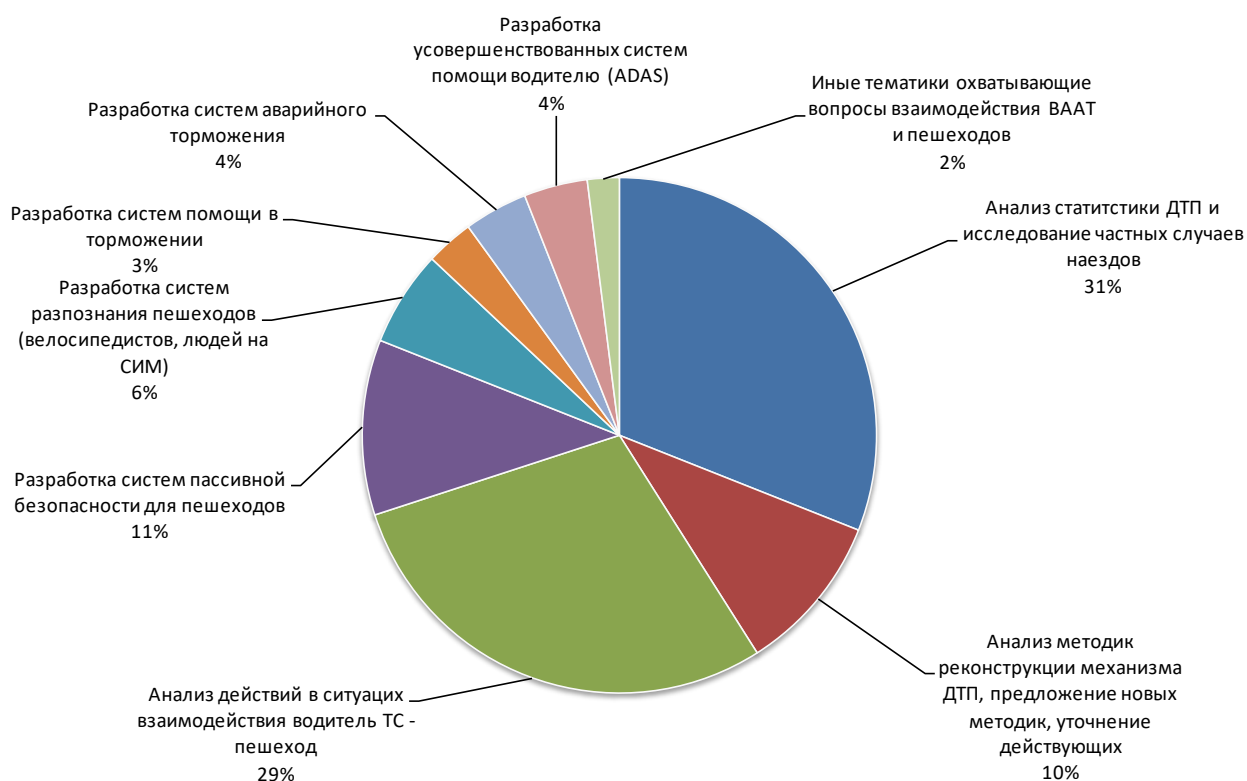


Рисунок 2.1 – Средневзвешенное соотношение тематик научных публикаций, связанных с экспертной профилактикой ДТП с участием пешеходов

Оценивая представленные результаты на рис. 2.1 в ракурсе на потребности методического пространства производства ДТЭ и выполнения

задач экспертной профилактики ДТП с участием пешеходов, следует выделить следующие положения:

Начиная с середины 80-х годов прошлого века, обширный корпус публикаций, был посвящен определению зависимости и составлению наиболее адекватной модели оценки скорости движения ТС в момент наезда (как пешехода, так и велосипедистов) по расстоянию полных перемещений тела пешехода. В данных работах учитывались различные вариации факторов обуславливающих особенности фаз совместного движения, отброса и скольжения тела человека после падения на опорную поверхность. Не умаляя значимости полученных в этих и многих других работах по данному направлению результатов, данный специальный вид исследований следует отнести в условиях развития модельно-ориентированной реконструкции (МОР) механизма ДТП, к не востребованным в ДТЭ, так как теоретические и методические разработки в этой области так и не нашли широкого применения на практике. К причинам этого, в первую очередь, следует отнести тот факт, что в большинстве случаев (даже по уголовным делам), в первичных источниках пространственно-следовой информации (ПСИ) с места ДТП (Протокол осмотра места ДТП и схема места ДТП к нему) конечное после ДТП положение пострадавшего и его поза чаще всего не зафиксированы (или зафиксированы только описательной форме, без измерений, неполно и/или с искажениями). Второй причиной, является общая тенденция к использованию МОР на базе различного программного обеспечения (в основном это: PC-Crash и VirtualCrash), а также увеличение объемов видеофиксации момента наезда.

Среди множества найденных публикаций, следует также выделить обширный пласт работ, объем которого увеличивается в последние годы, связанных с определением сценариев сближения ТС с пешеходом, среди которых общим целеполагающим направлением их приложения можно отнести к системам распознавания событий и системам помощи водителю (ADAS). К наиболее редко встречающимся из них в РФ нужно отнести

работы, посвященные определению «точки не возврата» (PONR – point of no return) возникающей несколько после возникновения момента опасности для движения. Как правило, определение PONR [87] используется преимущественно в разработке систем ADAS, однако составляет весьма большой интерес в целях ДТЭ и экспертной профилактики ДТП, так как является моментом времени после которого ДТП неизбежно, вне зависимости от действий водителя ТС. Определение PONR может быть существенно для ДТЭ при оценке экспертом наличия или отсутствия технической возможности (ТВ) у водителя избежать ДТП. В частности, очевидно, что в различных дорожно-транспортных ситуациях (ДТС) момент обнаружения (распознавания) водителем опасности не всегда совпадает с моментом ее возникновения, таким образом, в таких случаях есть необходимость анализа PONR для выработки более рациональных стратегий работы ADAS в критических ситуациях, а также для оценки действий водителя в сложившейся ДТС.

Во многих зарубежных публикациях также широко представлена статистика частоты вовлеченности типов кузова ТС категорий М1-М3 в ДТП с наездом на пешехода или велосипедиста, однако следует отметить, что такие данные скорее отражают насыщенность рынка и ДД в целом различными классами ТС, чем указывают на механику наезда. В этом ключе наиболее важно рассмотрение не столько по типу кузова ТС (седан, бизнес-класс, гольф-класс и т.п. категории), сколько рассмотрение влияния геометрических показателей фронтальной части кузова на травмирование пешехода и на механизм отброса в целом. Таким публикациям свойственна общая направленность на повышение пассивной безопасности фронтальной части автомобилей при наезде на пешехода. В рамках ДТЭ их применение востребовано мало, так как даже с учетом общих положений перехода к МОР по [9] использование многотельных конечно-элементных, оболочечных и гибридных антропоморфных манекенов [88-91], на которые в большинстве

своем опираются в 21-ом веке такие исследования, в практике производства ДТЭ весьма ограничено.

Также нужно выделить в особый класс задач ДТЭ исследование травмирования пешехода/велосипедиста в механизме его контактно-следового взаимодействия (КСВ) с ТС, так как лишь только часть результатов таких исследований востребована именно в ДТЭ и рассматривается в них в ключе установления причин возникновения события (ДТП). В отечественной практике экспертной профилактики ДТП использование же этих результатов в области обеспечения безопасности конструкции ТС, пешеходных ограждений и др., крайне мало, т.е. они не рассматриваются в ключе совершенствования конструкций, а эксперты не мотивированы к выполнению научных исследований.

Обобщая вышесказанное, в отечественной практике производства ДТЭ индексы травмирования практически не используется и только в последние 3-5 лет появились отдельные работы, больше направленные на биомеханику, чем на методологию производства ДТЭ. Таким образом, имеется существенный пробел в методическом пространстве производства ДТЭ, связанный с отсутствием методов оценки рисков травмирования пешехода / велосипедиста, что в частности в рамках ДТЭ не позволяет экспертам определить и расчетным путем обосновать причинную связь между превышением максимальной скорости движения водителем ТС в момент наезда и полученными пострадавшим (пешеходом или велосипедистом) травмами.

С целью поиска взаимосвязи между категоричностью полученных выводов по результатам дорожно-транспортной экспертизы (ДТЭ), объемом (качеством) исходной пространственно-следовой информации (ПСИ) с места ДТП и методами решения, использованными экспертами при производстве ДТЭ, а также для определения эффективности методов анализа и оптимизации решений, наиболее часто используемых в ДТЭ, были исследованы 5987 ДТЭ (за период с 2011 по 2021 годы), выполнявшихся в

рамках гражданского, административного и уголовного производства в государственных экспертных организациях Северо-западного федерального округа РФ (СЗФО РФ).

При этом под категоричностью результатов (выводов изложенных в ДТЭ) экспертного исследования была принята мера полноты выводов, не допускающих существование иных, отличных от полученного, при ракурсе на результаты одной или нескольких примененных процедур исследования со стороны позиции лица назначившего экспертизу, а при ракурсе со стороны эксперта, категоричность выводов ДТЭ принята как комплексная мера достижения конечности исследовательских задач, при выполнении которых цель исследования достигнута без допущений или вероятностных суждений.

В обобщенном виде основные результаты проведенного анализа ДТЭ, выполненных в экспертных организациях СЗФО, за вышеуказанный период, показаны в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные результаты анализа выборки ДТЭ

| Анализируемые показатели по выполненным ДТЭ в СЗФО                         |                                                                                                         | Период исследования |                     |                     |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                                                                            |                                                                                                         | с 2011 по 2014 годы | с 2015 по 2018 годы | с 2019 по 2021 годы |
| из общего числа заключений в исследуемый период, по видам ДТП в %:         | столкновение ТС                                                                                         | 60%                 | 58%                 | 64%                 |
|                                                                            | наезд на пешехода                                                                                       | 24%                 | 22%                 | 15%                 |
|                                                                            | наезд на велосипедиста                                                                                  | 6%                  | 8%                  | 10%                 |
|                                                                            | иные виды ДТП                                                                                           | 10%                 | 12%                 | 11%                 |
| из общего числа заключений предмет исследования, по основным видам:        | оценка действий водителя (-ей)                                                                          | 78%                 | 81%                 | 79%                 |
|                                                                            | оценка действий пешехода/велосипедиста                                                                  | 46%                 | 48%                 | 47%                 |
|                                                                            | установление факта КСВ ОИ, определение соответствия заявленных обстоятельств полученным повреждениям ТС | 29%                 | 47%                 | 58%                 |
| имеется категоричный вывод (в % от всех заключений в исследуемом периоде): | по местоположению места начала КСВ                                                                      | 47%                 | 53%                 | 57%                 |
|                                                                            | по скорости движения до ДТП                                                                             | 45%                 | 50%                 | 61%                 |

Продолжение таблицы 2.1

| Анализируемые показатели по выполненным ДТЭ в СЗФО                                  |                                                                                                                                      | Период исследования |                     |                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                                                                                     |                                                                                                                                      | с 2011 по 2014 годы | с 2015 по 2018 годы | с 2019 по 2021 годы |
| имеется категоричный вывод (в % от всех заключений в исследуемом периоде):          | по состоятельности версий                                                                                                            | 52%                 | 59%                 | 63%                 |
|                                                                                     | по траектории перемещений                                                                                                            | 59%                 | 68%                 | 72%                 |
|                                                                                     | по причинам потери устойчивости                                                                                                      | 52%                 | 55%                 | 57%                 |
| в заключениях исследуемого периода применено (в % от общего):                       | графическое моделирование в трасологических исследованиях                                                                            | 2%                  | 8%                  | 14%                 |
|                                                                                     | графическое моделирование в реконструкции механизма ДТП                                                                              | 31%                 | 43%                 | 52%                 |
|                                                                                     | обмер объемной деформаций                                                                                                            | 22%                 | 28%                 | 32%                 |
|                                                                                     | расчет скорости по ним                                                                                                               | 1%                  | 2%                  | 2%                  |
|                                                                                     | фотограмметрия                                                                                                                       | 4%                  | 18%                 | 32%                 |
| примененный метод моделирования (визуализации) стадий механизма ДТП, в % от общего: | исследование по видеозаписям                                                                                                         | 89%                 | 82%                 | 78%                 |
|                                                                                     | Графоаналитически в ПО Авто-Граф                                                                                                     | 6%                  | 12%                 | 14%                 |
|                                                                                     | в ПО Virtual Crash                                                                                                                   | 4%                  | 5%                  | 5%                  |
|                                                                                     | в других программных продуктах                                                                                                       | 1%                  | 1%                  | 3%                  |
| Расчет скорости движения объектов исследования                                      | не категоричен (расчет не выполнялся, приняты заданные значения или дан мотивированный отказ от расчета)                             | 55%                 | 43%                 | 34%                 |
|                                                                                     | вероятностный (расчет выполнен экспертом, вывод имеет вариативные или вероятностные положения)                                       | 28%                 | 35%                 | 38%                 |
|                                                                                     | категоричен (расчет выполнен экспертом, вывод не имеет вариативных или вероятностных положений)                                      | 17%                 | 22%                 | 28%                 |
| Вывод по положению места наезда                                                     | не категоричен (расчет отброса тела не выполнялся, принято указанное водителем место наезда или дан мотивированный отказ от расчета) | 53%                 | 40%                 | 29%                 |
|                                                                                     | вероятностный (расчет выполнен экспертом, вывод имеет вариативные или вероятностные положения)                                       | 29%                 | 36%                 | 42%                 |
|                                                                                     | категоричен (расчет выполнен экспертом, вывод не имеет вариативных или вероятностных положений)                                      | 18%                 | 24%                 | 29%                 |

Продолжение таблицы 2.1

| Анализируемые показатели по выполненным ДТЭ в СЗФО                 |                                                                                                                                                          | Период исследования |                     |                     |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                                                                    |                                                                                                                                                          | с 2011 по 2014 годы | с 2015 по 2018 годы | с 2019 по 2021 годы |
| Примененные методы расчета скорости движения объектов исследования | только по следам торможения                                                                                                                              | 67%                 | 52%                 | 39%                 |
|                                                                    | через работу сил                                                                                                                                         | 29%                 | 40%                 | 48%                 |
|                                                                    | через моменты инерции в ПО                                                                                                                               | 3%                  | 4%                  | 4%                  |
|                                                                    | по видеозаписи                                                                                                                                           | 1%                  | 4%                  | 9%                  |
| В рамках ДТЭ по ДТП с наездом на пешехода, в % от общего их числа: | Дан отказ от установления фактической скорости движения ТС (пешехода)                                                                                    | 62%                 | 59%                 | 55%                 |
|                                                                    | Дан отказ от установления фактического места наезда на пешехода                                                                                          | 51%                 | 50%                 | 48%                 |
|                                                                    | Механизм наезда реконструирован частично, преимущественно в описательной форме                                                                           | 53%                 | 56%                 | 53%                 |
|                                                                    | Механизм наезда не реконструировался, исследование полностью опирается на исходные данные, определенные по субъективным данным                           | 45%                 | 39%                 | 39%                 |
|                                                                    | Механизм наезда реконструирован полностью и определены все его ПВХ стадий                                                                                | 2%                  | 5%                  | 8%                  |
|                                                                    | Исследование опирается на данные полученные из анализа видеозаписи                                                                                       | 0%                  | 1%                  | 2%                  |
|                                                                    | Исследование опирается на данные следственного эксперимента                                                                                              | 4%                  | 10%                 | 14%                 |
|                                                                    | В исследовании использованы данные EDR, БУРС по ГОСТ Р 58840                                                                                             | 0%                  | 0,1%                | 0,1%                |
|                                                                    | Использованы индексы травмирования для оценки риска и установления причинной связи между фактической скоростью ТС в момент наезда и полученными травмами | 0%                  | 0%                  | 0%                  |

Окончание таблицы 2.1

| Анализируемые показатели по выполненным ДТЭ в СЗФО                                                                            |                                                          | Период исследования |                     |                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                                                                                                                               |                                                          | с 2011 по 2014 годы | с 2015 по 2018 годы | с 2019 по 2021 годы |
| Причины, использованные экспертами в мотивации отказа от определения места наезда и скорости движения, в % от их общего числа | отсутствие научно-обоснованной и апробированной методики | 51%                 | 50%                 | 51%                 |
|                                                                                                                               | отсутствие необходимых исходных данных                   | 7%                  | 10%                 | 12%                 |
|                                                                                                                               | вышеперечисленное одновременно                           | 42%                 | 40%                 | 37%                 |

Обобщая представленные результаты, следует отметить, что методический аппарат производства ДТЭ в части как комплексных трасолого-автотехнических, так и только автотехнических исследований по делам о ДТП с участием пешеходов за последние 30 лет фактически не был дополнен новыми методиками, вносящими существенный вклад в доказательную базу исследования, его категоричность и объективность. Даже при общем взгляде на отдельные известные и опубликованные исследования, носящие скорее точечный характер, на настоящий момент в сфере производства ДТЭ по ДТП с участием пешеходов/велосипедистов и по экспертной профилактике таких ДТП, эти работы остаются лишь каплями в море неразрешенных задач, не устраняющие возникающую напряженность между аргументами защиты и обвинения в суде и между мерами по предотвращению ДТП и реальной статистикой возникающих событий. В частности во многих случаях по уголовным делам по ДТП с участием пешеходов широко встречается практика отказа эксперта от категоричных выводов (в частности по задачам: установления скорости движения ТС в момент наезда на пешехода, установления скорости движения пешехода, установления места наезда). При этом в обоснование такого отказа в

подавляющем большинстве случаев эксперт мотивирует и аргументирует отсутствие вывода или вероятностный вывод отсутствием научно-обоснованной и апробированной методики для решения предмета экспертного исследования (см. таблицу 2.1).

Актуальная проблемная область повышения категоричности экспертного исследования при реконструкции механизма ДТП может быть формализована до подобластей однородной проблемной тематики, взаимно пересекающихся в участках использования смежной для подобластей информации. При этом именно информация в реконструкции ДТП, а именно ее полезный объем, объективность (достоверность) определяет категоричность получаемых выводов, т.е. фактически не столько на выводы влияет применяемый метод исследования, сколько какая исходная информация и с какими свойствами обрабатывается. Таким образом, места пересечения таких подобластей весьма широки в проблемном охвате: отсутствие возможности определить место контакта вносит ограничения в исследование и в некоторых случаях делает невозможным определение скорости движения ТС, а 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 неопределимыми или неконкретными (категоричными), основанными на субъективных исходных данных, которые не могут быть проверены.

Представленный обзор по выборке ДТЭ позволяет считать, что действующие методы не позволяют получить точное или максимально приближенное решение, отвечающим требованию обоснованности и достоверности экспертного исследования.

Применительно к задаче оценки риска травмирования и установления причинной связи между фактической скоростью ТС в момент наезда на пешехода и полученными им травмами категоричные выводы по ДТЭ в указанной выборке полностью отсутствуют, при этом мотив отказа от ответа

на эти специальные вопросы ДТЭ также в 100% случаев указан как отсутствие научно-обоснованной методики такой оценки.

При более акцентированном анализе указанной выборки по ДТЭ в СЗФО, оценивая вовлеченность пешеходов в дорожное движение (ДД) не по численности, а времени участия (что более существенно для оценки процессов возникающих в системах ВАДС – Пешеход при ракурсе в том числе на психофизиологические стороны воздействия от ДД на поведение) следует отметить, что оставаясь самым незащищенным участником ДД, пешеход особенно в крупных городах за время своего бодрствования вовлечен в дорожное движение в среднем не менее чем от 20 до 60 минут в течение одних суток, претерпевая трансформации в цепях понятий «пешеход» – «пассажир» – «пешеход» и «пешеход» – «водитель» – «пешеход».

Из анализа исследуемой выборки по ДТЭ, в этой связи, было установлено (см. таблицу 2.2 следует) что в большинстве случаев пешеходы попадают в ДТП в течение первых 15 минут после выхода из дома (из салона ТС, с места работы и т.п.). Наиболее вероятными причинами указанного, чаще всего у пешеходов является отсутствие или задержка переключения внимания и подстройки под внешние условия после выхода из комфортной обстановки.

Таблица 2.2 – Оценка времени вовлеченности пешеходов в ДД

| № п/п | время нахождения в ДД с момента выхода из дома / места пребывания до момента наезда | % случаев из общей выборки |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| 1     | до 15 мин                                                                           | 29                         |
| 2     | с 15 до 45 мин                                                                      | 27                         |
| 3     | с 45 до 90 мин                                                                      | 23                         |
| 4     | после 90 мин                                                                        | 21                         |

С позиции ДТЭ виды активности объектов исследования (ОИ) – пешеходов и велосипедистов в ДД были оценены и проиндексированы, относительно типовых видов обстоятельств дорожно-транспортной ситуации предшествовавшей ДТП, частота возникновения ДТП с данными видами активностей показана в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты оценки частоты видов активности ОИ до ДТП

| № п/п | Индекс вида активности | Вид активности/темп движения до ДТП                                                            | % случаев из общей выборки |
|-------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| 1     | A1                     | Находился в неподвижном положении, всего:                                                      | 10                         |
| 2     | A11                    | сидел на проезжей части                                                                        | 3                          |
| 3     | A12                    | стоял на проезжей части                                                                        | 4                          |
| 4     | A13                    | лежал на проезжей части                                                                        | 3                          |
| 5     | A2                     | Двигался в темпе шага, всего:                                                                  | 60                         |
| 6     | A21                    | медленным шагом                                                                                | 15                         |
| 7     | A22                    | спокойным шагом                                                                                | 29                         |
| 8     | A23                    | быстрым шагом                                                                                  | 16                         |
| 9     | A3                     | Двигался в темпе бега, всего:                                                                  | 29                         |
| 10    | A31                    | спокойным бегом                                                                                | 21                         |
| 11    | A32                    | быстрым бегом                                                                                  | 8                          |
| 12    | Б                      | Иное (кувыркался, перекачивался, двигался на четвереньках, прыгал на корточках и т.п.), всего: | 1                          |

Из той же выборки с учетом данных СМЭ, а также показаний пострадавших пешеходов, относительно выделенных индексов видов активности были определены общие черты их психофизиологического состояния до ДТП, показанные таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Оценка общих черт психофизиологического состояния пешеходов и велосипедистов по видам их активности до ДТП

| Состояние:                                             | % случаев из общей выборки | % по видам активности |    |    |   |
|--------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|----|----|---|
|                                                        |                            | A1                    | A2 | A3 | Б |
| был трезв                                              | 67                         | 14                    | 26 | 27 | 1 |
| среди них, в хорошем настроении                        | 38                         | 11                    | 12 | 14 | 1 |
| среди них, в подавленном и/или депрессивном настроении | 25                         | 3                     | 17 | 5  | 0 |
| пытался покончить собой, бросившись под ТС             | 4                          | 2                     | 0  | 2  | 0 |
| находился в состоянии алкогольного опьянения           | 28                         | 3                     | 13 | 9  | 3 |
| в легкой форме                                         | 11                         | 1                     | 3  | 6  | 1 |
| в тяжелой форме                                        | 17                         | 2                     | 10 | 3  | 2 |
| находился в состоянии наркотического опьянения         | 5                          | 3                     | 1  | 0  | 1 |

Данные общие черты и факторы, показанные в настоящем исследовании, требуют дальнейшего более детального изучения на более широкой выборке и более широкого учета спектра психического, эмоционального и функционального состояния объектов исследования (ОИ).

Вместе с тем, автором были также определены частота случаев переноски пешеходом ручной клади (по видам) на момент ДТП для случаев А2 и А3 и частота случаев тона (светлый, темный, иное) одежды у пешеходов на момент ДТП, которые соответственно показаны в таблицах 2.5–2.6.

Таблица 2.5 – Доля случаев переноски ручной клади по ее видам

| № п/п | Вид переноски ручной клади пешеходом в случаях А2 и А3 | % случаев в выборке по А2 и А3 |
|-------|--------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 1     | без ручной клади:                                      | 58                             |
| 2     | с ручной кладью, всего:                                | 42                             |
| 3     | нес рюкзак на спине до 5 кг                            | 12                             |
| 4     | нес рюкзак на спине более 5 кг                         | 4                              |
| 5     | нес сумку на плече до 5 кг                             | 24                             |
| 6     | нес сумку на плече более 5 кг                          | 8                              |
| 7     | нес сумки/пакеты до 5 кг, всего:                       | 23                             |
| 8     | в левой руке                                           | 9                              |
| 9     | в правой руке                                          | 10                             |
| 10    | в обеих руках                                          | 4                              |
| 11    | нес сумки/пакеты более 5 кг, всего:                    | 14                             |
| 12    | в левой руке                                           | 4                              |
| 13    | в правой руке                                          | 5                              |
| 14    | в обеих руках                                          | 5                              |
| 15    | поясная сумка до 1 кг                                  | 6                              |
| 16    | нагрудная сумка до 1 кг                                | 3                              |
| 17    | катил тележку перед собой                              | 2                              |
| 18    | катил тележку за собой                                 | 4                              |

Кроме того, были составлены графики изменения количества ДТП (по средневзвешенной оценке) за исследуемый период в зависимости от месяцев года, показанные на рис.2.2 для ДТП с участием пешеходов.

А также было получено графическое представление изменения количества ДТП по наездам на пешехода, показанные на рис.2.3 в

зависимости от времени в течение одних суток (средневзвешенная оценка, для всех сезонов года).

Таблица 2.6 – Количество ДТП по типу тона одежды пешехода

| № п/п | тон одежды                                                       | Количество ДТП в выборке по пешеходам, % |
|-------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 1     | светлая                                                          | 41                                       |
| 2     | темная                                                           | 51                                       |
| 3     | иное (полностью обнаженный или одетый в костюм аниматора и т.п.) | 8                                        |

Также было определено распределение частоты однородных видов действий пешеходов (см. рис. 2.4), предшествовавших наезду на них ТС для всех возрастных групп.

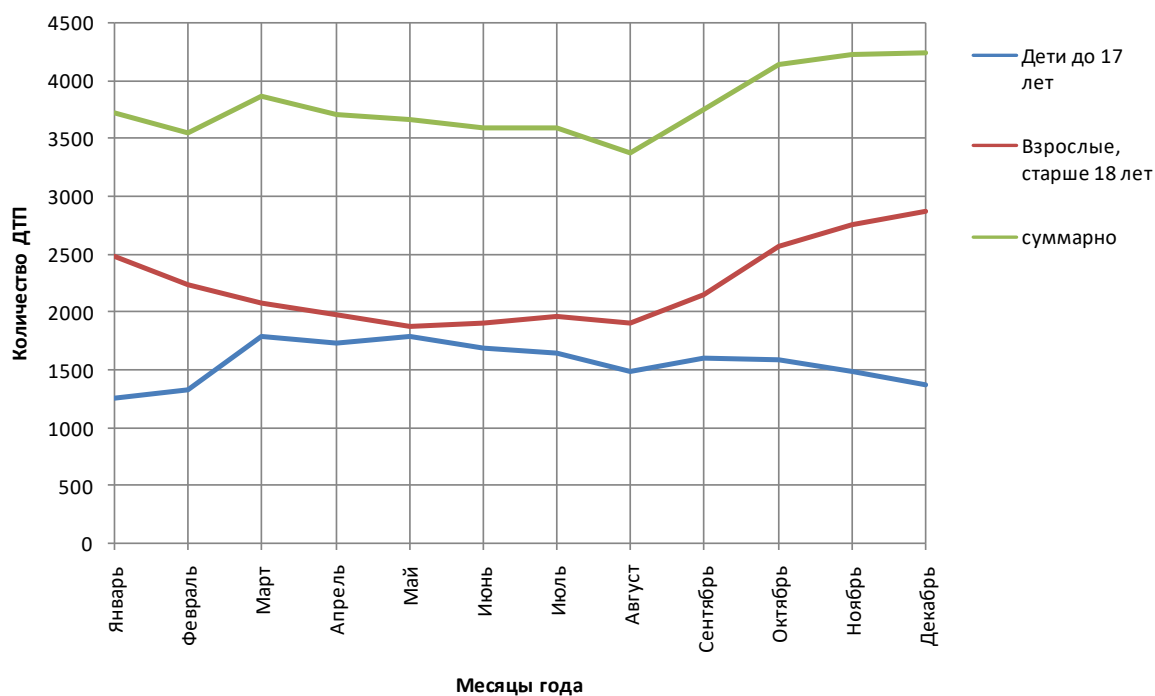


Рисунок 2.2 – Распределение количества ДТП с наездом на пешехода по месяцам года

В рамках данного исследования, полученные травмы (оценка выполнялась по данным судебно-медицинских заключений) для каждого сегмента тела человека были оценены по сокращённой шкале оценки телесных повреждений (*Abbreviated Injury Score*) (AIS) по [92], за

исключением верхних конечностей, где учитывается только возникновение переломов в зависимости от фактора риска.

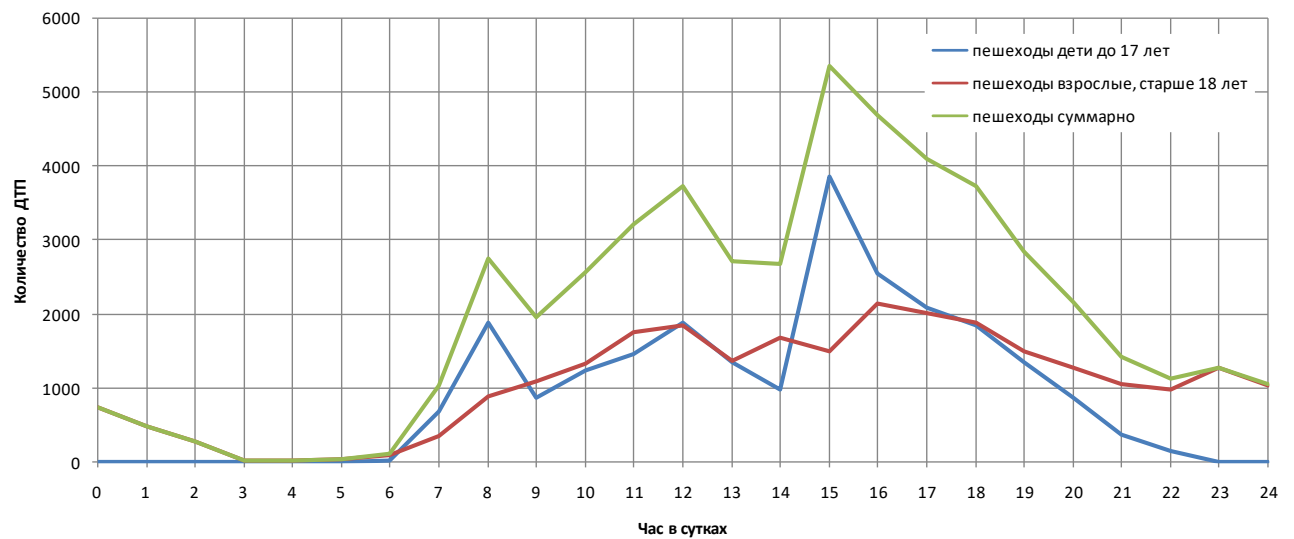


Рисунок 2.3 – Распределение количества ДТП с наездом на пешехода по часам суток

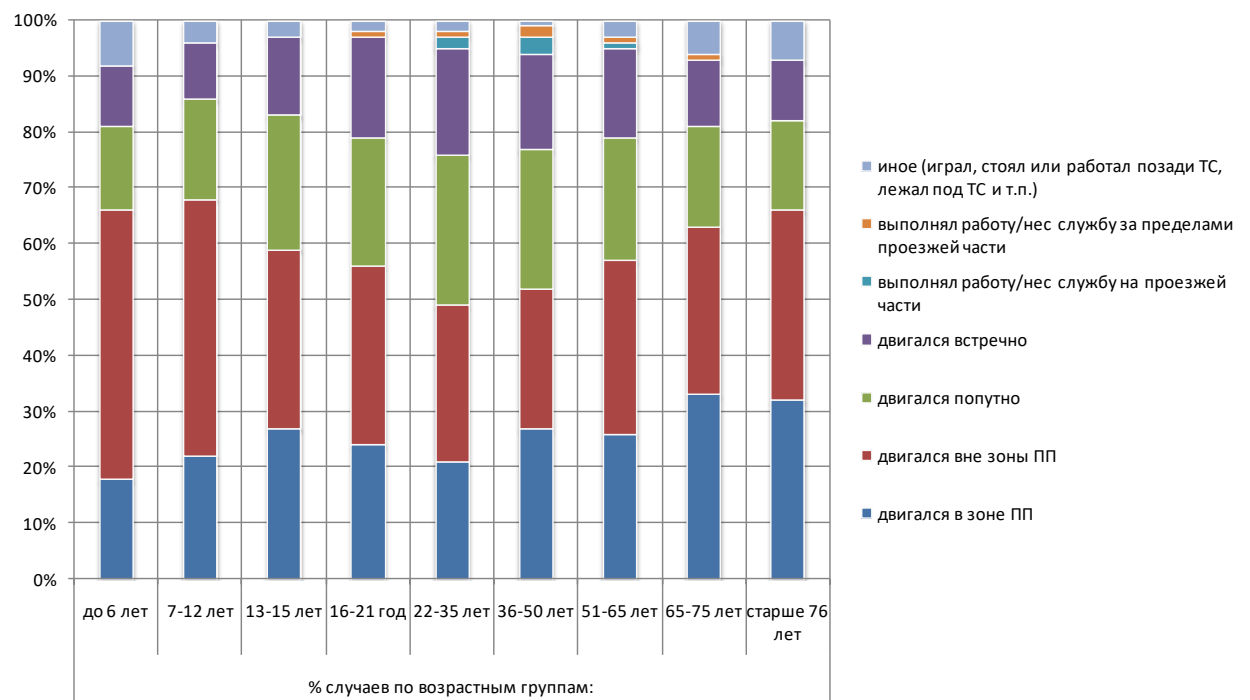


Рисунок 2.4 – Распределение частоты случаев различных видов действий пешеходов до ДТП

На основе использования в качестве базового индекса травмирования индекса AIS, были получены графики распределения количества ДТП

(средневзвешено) с различными видами AIS от скорости в момент наезда для пешеходов (см. рис. 2.5).

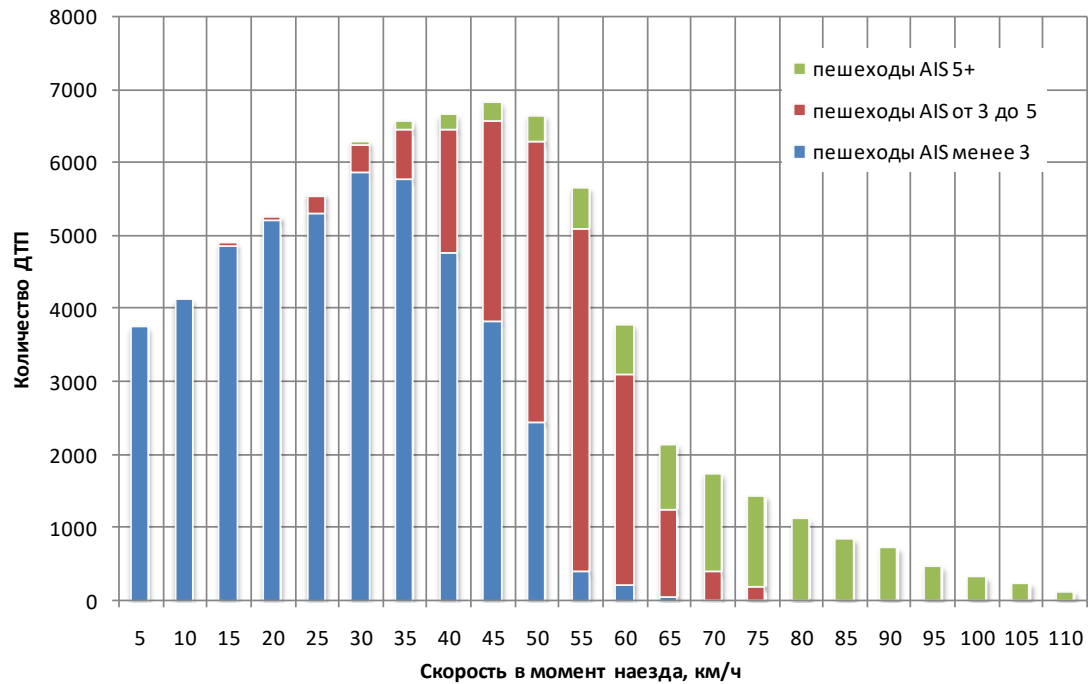


Рисунок 2.5 – Распределение количества ДТП (средневзвешено) с различными видами AIS от скорости в момент наезда для пешеходов

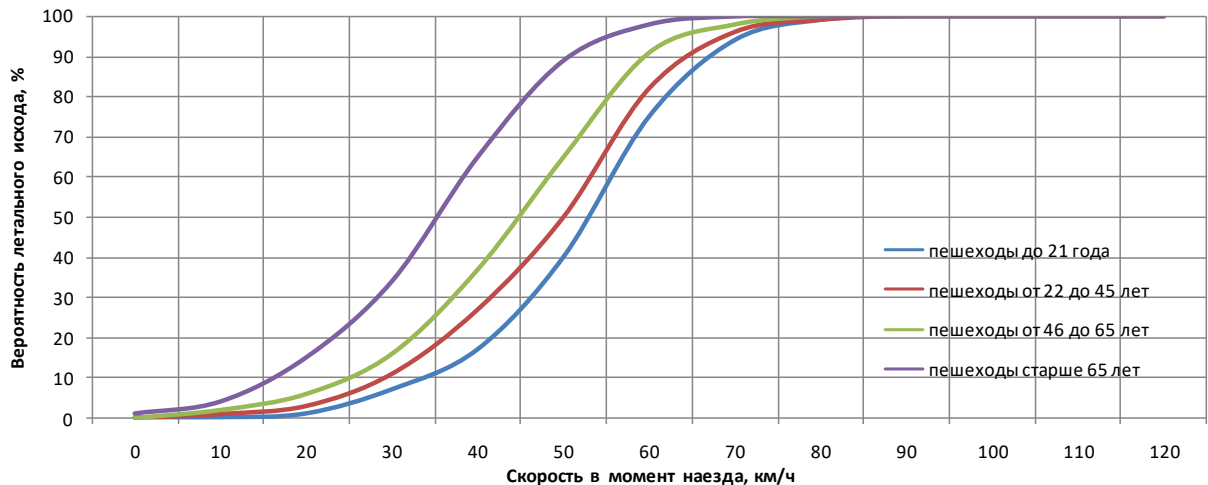


Рисунок 2.6 – Вероятность летального исхода в зависимости от скорости в момент наезда для пешеходов по возрастным группам

Учитывая ранее опубликованные [93,94] оценки вероятности наступления летального исхода в зависимости от скорости движения ТС в момент наезда (на пешехода) на основе используемой выборки по ДТЭ было произведено разделение на возрастные группы пострадавших, что позволило

уточнить графики распределения вероятности. Полученные графики изменения вероятности летального исхода показаны на рис. 2.6.

## **2.2. Анализ типовых задач ДТЭ с участием пешехода.**

### **Специализированные задачи анализа травмирования**

Как отмечалось ранее в [69,70,79-83] качество сбора (получении и фиксации с использованием средств измерения) первичной пространственно-следовой информации (ПСИ) с места ДТП (в категориях таких её свойств, как полнота и достоверность) в значительной мере определяет семантическую емкость исследовательского объема ПСИ, её репрезентативность и как следствие влияет на качество экспертного исследования, формально при этом являясь мерой влияющей на достижимую и необходимую точность и достоверность исследования (сходимость с фактическими данными, особенно при наличии видеофиксации).

В обобщенном виде ПСИ, предоставляемая на исследование судебному автотехническому эксперту может быть охарактеризована как условно-определенная в минимально-достаточном для расчета объеме. Свойство ее условной определенности возникает из размытости и нечеткости категорий определения таких важных для расчета значений как, например, коэффициент сцепления, дальность конкретной видимости и многих других, в том числе и повреждений ТС (в первичных документах оформляемых ГИБДД или следствием обычно это просто перечень, не всегда полный и не описывающий повреждение, который не достаточен для исследования, если ТС на момент исследования продано, утилизировано или отремонтировано, а фотоматериал по нему отсутствует).

Минимальная достаточность возникает из скудности технического оснащения и точности применяемых средств измерения при первоначальном процессе сбора ПСИ (осмотр места ДТП, осмотр объектов исследования, выполнение следственных экспериментов и т.п.), при этом часто в

представляемом на исследование судебному эксперту объеме ПСИ отсутствуют дополнительные данные влияющие на расчеты: величины фактических уклонов в месте ДТП, местоположения тела пешехода после ДТП и т.п.

При этом как практике государственных судебных экспертов, так и практике коммерческих организаций, выполняющих дорожно-технические судебные экспертизы, фактически нет практики оценки погрешности вычислений, основанных на нечетких данных, выполняемых в рамках проведенных исследований экспертами, что формально не отвечает требованиям федерального закона 73-ФЗ [60], в части оценки достоверности результатов исследования. Накопление расчетной ошибки, связанной с изначальной погрешностью измерений при осмотре места ДТП, например, при расчете скоростей движения объектов исследования может приводить к результирующим значениям, сильно отличным от фактических [62, 69, 70, 79-83].

В части задач, лежащих в области анализа и выявления места начала контактно-следового взаимодействия (КСВ) при расчетных значениях скоростей, накопление ошибки вычислений приводит к варьированию значений определяемых границ области фактического местоположения точки начала контакта. Кроме того, в большинстве случаев экспертами не уделяется должного внимания пути совместных перемещений объектов исследования, коэффициентам восстановления и трения в контактной зоне (при моделировании в программных средах типа PC-Crash) при реконструкции ДТП, что также оказывает влияние на точность рассчитываемых значений пространственно-временных характеристик стадий механизма ДТП [26, 27, 28].

Выше обозначенные свойства первичной ПСИ и вторичной ПСИ (получаемой в ходе следственных и/или экспертных действий) оказывают существенное влияние на точность результатов расчетов при определении скорости движения объектов исследования, пространственно-временных

характеристик перемещений на разных стадиях механизма ДТП и в том числе при установлении места столкновения или наезда на основе положений модельно-ориентированной реконструкции (МОР) изложенной в [4].

С учетом вышеуказанной выборки по ДТЭ по СЗФО, была проанализирована категоричность выводов, данных экспертами при решении частных задач реконструкции механизма ДТП с участием пешехода (все случаи: наезд (Н), наезд с повторным наездом при падении/отбросе тела (Н+Н) и столкновение с последующим наездом на пешехода (-ов) одним из ТС, участвовавших в столкновении (С+Н). В частности, по уголовным делам, среди основных (типовых) задач реконструкции механизма наезда на пешехода, были выделены формулировки типовых задач ДТЭ, связанным с поиском причинно-следственной связи между превышением скорости движения ТС (его фактической скоростью в момент ДТП) и полученной степенью тяжести ТП пешеходом, которые показаны в таблице 2.7 (индексы приведенные в таблице далее используются по тексту для сокращения описания вида задачи).

Таблица 2.7 – Типовые задачи, выбранные из общей выборки

| № п/п | Индекс типовой задачи ДТЭ | Искомая причинно-следственная связь                                                                                                       | Вид случаев | Число ДТЭ в выборке, где ставилась данная задача |
|-------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------|
| 1     | A1                        | Связь между тяжестью ТП при первичном травмировании и фактической скоростью ТС в момент наезда                                            | Н и Н+Н     | 375                                              |
| 2     | A2                        | Связь между тяжестью ТП при первичном травмировании и фактической скоростью ТС до столкновения                                            | С+Н         | 128                                              |
| 3     | Б                         | Связь между тяжестью ТП при вторичном травмировании и фактической скоростью ТС в момент наезда                                            | Н           | 134                                              |
| 4     | В                         | Связь между тяжестью ТП при вторичном травмировании и фактической скоростью ТС в момент наезда на ТС                                      | Н+Н         | 186                                              |
| 5     | Г                         | Связь между тяжестью ТП, нестандартными действиями пешехода (подпрыгивание, приседание и т.п.) и фактической скоростью ТС в момент наезда | Н и Н+Н     | 94                                               |

На рисунке 2.7 показано распределение типовых задач в выборке, на рисунке 2.8 показано распределение категоричности выводов по типовым задачам (в %).

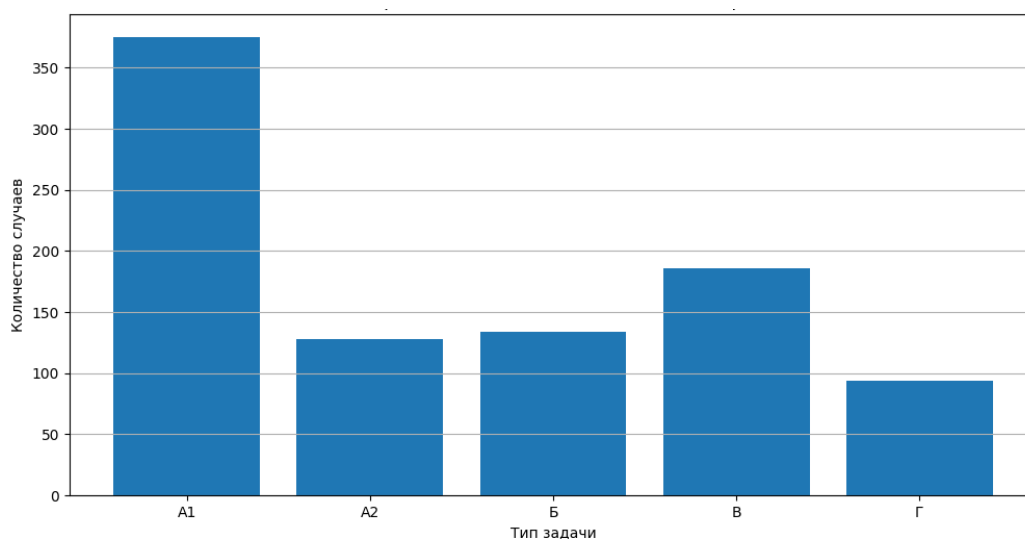


Рисунок 2.7 – Распределение типовых задач в выборке

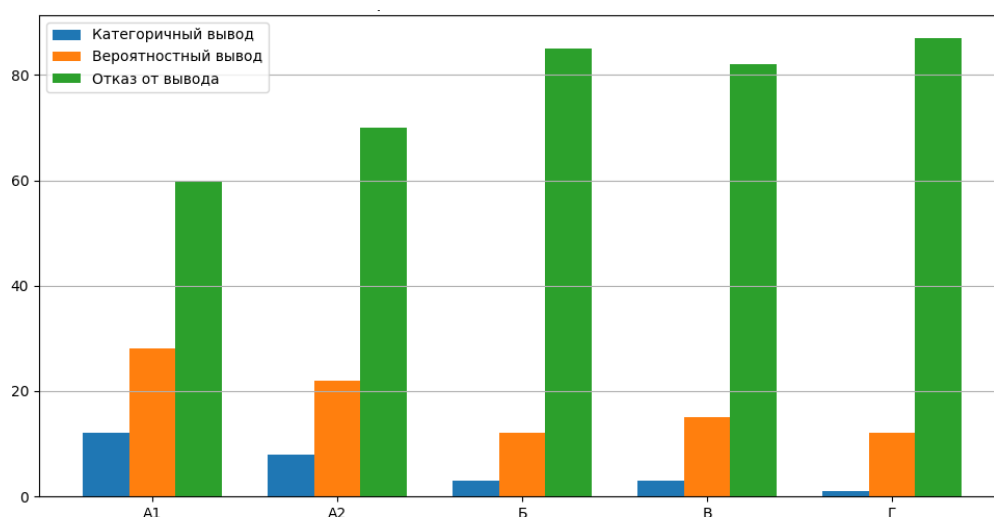


Рисунок 2.8 – Распределение категоричности выводов по типовым задачам (в %)

По данным индексированным задачам ДТЭ при реконструкции наездов (для всех случаев: Н, Н+Н и С+Н) был выполнен анализ категоричности выводов данных в ДТЭ по вопросам связанных с их решением.

Анализ данных выявил системные сложности в проведении дорожно-транспортных экспертиз при наездах на пешеходов. В 60-87% случаев эксперты отказывались от категоричных выводов, причем в задачах,

связанных с вторичным травмированием (Б, В) и нестандартными действиями пешеходов (Г), доля отказов достигала 82-87%. Основными препятствиями стали отсутствие методик (для 3 из 5 типовых задач) и недостаточность исходных данных (для задач А1 и А2). Это свидетельствует о методологическом кризисе в данной области экспертиз, где значительная часть случаев остаётся без однозначных заключений.

Категоричность выводов напрямую коррелирует с полнотой первичной следственной информации (ПСИ). В задачах, требующих анализа скорости ТС в момент первичного контакта (А1, А2), доля категоричных выводов составила 8-12%, что выше, чем в других категориях. Однако даже здесь 60-70% случаев сопровождались отказами из-за нехватки данных. Это подчеркивает критическую важность качественного сбора доказательств на месте ДТП: фиксации следов торможения, положения пешехода, параметров деформации ТС. Без таких данных экспертиза часто ограничивается вероятностными оценками или вовсе не может быть проведена.

Наиболее проблемными оказались задачи, связанные с вторичным травмированием (падения, повторные наезды) и нестандартным поведением пешеходов. Например, для задачи Г (нестандартные действия) лишь в 1% случаев был дан категоричный вывод. Это указывает на отсутствие научно обоснованных алгоритмов оценки подобных сценариев. Эксперты вынуждены опираться на эмпирические данные или вовсе отказываться от выводов, что снижает доверие к результатам ДТЭ и осложняет судебные разбирательства. Таким образом, следует сделать вывод, что на настоящий момент ДТЭ нуждается в разработке и совершенствовании специализированных методик, учитывающих биомеханику сложных травм и поведенческие факторы.

Анализ данных показывает, что в 68% случаев место наезда на пешехода не может быть определено точкой, а лишь областью эллипсоидной формы с варьирующимися размерами. Это связано с невозможностью однозначно реконструировать траектории ТС и пешехода из-за недостатка

данных (например, отсутствия видеозаписей или четких следов), а также с зависимостью от граничных условий (минимальная/максимальная скорость, угол столкновения), которые задают размытые границы возможного контакта.

В результате, эксперты вынуждены работать с пространством допустимых решений, а не конкретными координатами, что снижает точность выводов.

Неопределенность в определении места наезда напрямую снижает категоричность ДТЭ, в частности в задачах А1 и А2 (связь скорости и тяжести травм) лишь 8–12% выводов были категоричными, так как без точного места контакта сложно установить кинематику ДТП. Соответственно, в задачах Б и В (вторичное травмирование) доля категоричных ответов падает до 1–3%, поскольку точность пространственное положение места начала КСВ при вторичном ударе зависят от точности реконструкции первичного КСВ. Чем шире расчетная область контакта, тем менее определенными становятся выводы, например, если расчетная зона контакта охватывает зону пешеходного перехода не полностью (частично располагаясь вне зоны пешеходного перехода) то вынуждает экспертов давать вероятностные и вариационные оценки, что снижает эффективность ДТЭ и ЭП ДТП, а также снижает ценность заключения для следствия и суда.

Определение места наезда на пешехода в виде областей в границах проезжей части, как правило, существенно снижает точность и категоричность ДТЭ, поскольку эксперты работают с диапазонами возможных значений, а не точными данными. Это приводит к преобладанию вероятностных выводов и отказов от заключений. Что также приводит к выводу, об необходимости улучшения методов сбора данных и моделирования, которые способны сократить неопределенность, но требуют внедрения новых технологий и методик в экспертной практике.

### **2.3. Анализ влияния точности методов фиксации ПСИ и погрешности измерений на результаты ДТЭ и ЭП ДТП**

В общем ракурсе на процессы сопряженные с исследованием ДТП, при расследовании дорожно-транспортных происшествий обычно проводят следующие неотложные следственные действия: осмотр места происшествия, допрос водителей (при возможности), допрос свидетелей-очевидцев, допрос потерпевших (при возможности), назначение судебно-медицинской экспертизы (при наличии пострадавших), назначение автотехнической экспертизы (при необходимости). Общим вопросам реконструкции, моделирования и анализа ДТП посвящены работы [95-117].

Учитывая вышеизложенное, в целом по РФ, уровень полноты, качества и точности исходных данных и в частности ПСИ, предоставляемых экспертам для анализа и реконструкции ДТП (при проведении автотехнических, комплексных трасолого-автотехнических исследований, совместно с техническими, дорожными экспертизами и судебно-медицинскими исследованиями, при их необходимости в конкретном случае) можно в целом охарактеризовать как крайне низкий, создающий возможность внесения в процесс исследования субъективных искажений и не всегда обладающий допустимой точностью измерений. При этом инструментальный (цифровой) сбор первичной пространственно-следовой информации в РФ не применяется. В связи с тем, что при осмотре места ДТП сотрудниками полиции на настоящий момент все измерения производятся, как правило, вручную, цифровые данные с места ДТП и с объектов исследования не снимаются и в большинстве случаев к моменту начала исследования эксперту приходится оперировать с недостаточным объемом первичной информации, что связано, в первую очередь, с низким техническим оснащением процесса сбора (осмотра) информации с места ДТП и объектов исследования. Здесь отметим, что в США и многих других западных странах полицейскими и экспертами при осмотре места ДТП

используется лазерное сканирование с получением облаков точек данных, которые потом легко интегрируются в среды моделирования (программы PC-Crash, VirtualCrash, MapScenes и др.).

Низкое качество сбора пространственно-следовой информации (ПСИ) в целом, характерное для использования ручного 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 невозможным. Выводы ДТЭ в этом случае чаще всего бывают неконкретными (не категоричными), основанными на субъективных исходных данных, которые не могут быть проверены.

Вышесказанное, при рассмотрении проблемы максимизации точности и полноты фиксации ПСИ с места ДТП и с объектов исследования (ОИ), сильно сдерживает процессы цифровизации процедур модельно-ориентированной реконструкции ДТП (МОР) и в целом перехода к цифровой трансформации экспертного анализа и профилактики ДТП.

Кроме представленного выше, по выборке ДТЭ, выполненных в СЗФО, в указанный период (см. выше), была проанализирована частота использования различных методов получения первичной и вторичной ПСИ, с учетом основных процедур, используемых в модельно-ориентированной реконструкции ДТП по [9]. Результаты данного анализа методов получения ПСИ показаны в таблице 2.8.

В ракурсе на указанные методы следует также оценить влияние погрешности измерений на результаты ДТЭ. Оценке неопределенности в экспертизе ДТП ранее были посвящены весьма немногочисленные работы [61,62,70], среди которых следует выделить общую черту, а именно то, что в них не выполнялся анализ точности сбора ПСИ с места ДТП с

использованием современных технологий. В этом ключе, следует также выделить наиболее типовые виды ошибок фиксации ПСИ, при различных видах осмотра места ДТП и ТС (первичный, вторичный), результаты обработки полученных данных показаны в таблице 2.9.

Таблица 2.8 – Частота применения различных методов фиксации ПСИ

| Процедура в МОР                                          | Вид получения ПСИ                                                        | Период исследования |                |                |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|----------------|
|                                                          |                                                                          | с 2010 по 2013      | с 2014 по 2017 | с 2018 по 2021 |
| при первичном осмотре ТС на месте ДТП                    | использован LIDAR                                                        | 0%                  | 0%             | 1%             |
|                                                          | применена фотограмметрия                                                 | 0%                  | 1%             | 2%             |
|                                                          | определено только высотное положение                                     | 39%                 | 42%            | 44%            |
|                                                          | измерений не проводилось                                                 | 61%                 | 57%            | 53%            |
| при дополнительном осмотре ТС                            | использован LIDAR                                                        | 0%                  | 0%             | 1%             |
|                                                          | применена фотограмметрия                                                 | 0%                  | 0%             | 1%             |
|                                                          | определено только высотное положение                                     | 42%                 | 54%            | 67%            |
|                                                          | измерений не проводилось                                                 | 56%                 | 46%            | 43%            |
| при осмотре места ДТП                                    | все измерения выполнены рулеткой и/или дорожным курвиметром              | 76%                 | 69%            | 65%            |
|                                                          | использован LIDAR                                                        | 3%                  | 5%             | 5%             |
|                                                          | применена фотограмметрия                                                 | 2%                  | 6%             | 5%             |
|                                                          | Конечное положение ТС (иных объектов) не определено (убраны с места ДТП) | 19%                 | 20%            | 25%            |
| при дополнительном осмотре места ДТП                     | все измерения выполнены рулеткой и/или дорожным курвиметром              | 99%                 | 98%            | 96%            |
|                                                          | использован LIDAR                                                        | 0%                  | 0%             | 1%             |
|                                                          | применена фотограмметрия                                                 | 1%                  | 2%             | 3%             |
| при реконструкции перемещений ОИ в стадиях механизма ДТП | использованы измерения первичного осмотра                                | 94%                 | 72%            | 69%            |
|                                                          | использованы измерения дополнительного осмотра (совместно с первичным)   | 6%                  | 28%            | 31%            |
|                                                          | использованы цифровые данные                                             | 0%                  | 0%             | 0%             |
| при сопоставлении повреждений ТС                         | использованы данные о высотном положении очагов                          | 96%                 | 91%            | 84%            |
|                                                          | применена фотограмметрия                                                 | 4%                  | 9%             | 15%            |
|                                                          | использованы цифровые данные                                             | 0%                  | 0%             | 1%             |

Соответственно в границах вышеуказанной выборки по ДТЭ, были определены: доли вноса в погрешность расчета скорости движения ТС (при расчете по следам торможения, а также через закон сохранения количества

движения по [1,9,68,107] – с учетом вноса ошибки в построение линий отброса), доли вноса в расчет наличия или отсутствия технической возможности избежать ДТП. Результаты данной оценки показаны в таблице 2.10.

Таблица 2.9 – Результаты обработки

| Вид действия по получению и обработке ПСИ                          | Типовая ошибка или типовая оценка качества фиксации ПСИ                               | Период исследования |                |                |
|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|----------------|
|                                                                    |                                                                                       | с 2010 по 2013      | с 2014 по 2017 | с 2018 по 2021 |
| при осмотре ТС с использованием ручного измерительного инструмента | при оценке глубины внедрения, профиль недеформированного состояния нанесен условно    | 87%                 | 74%            | 62%            |
|                                                                    | измерения выполнены на неподготовленной поверхности (уклоны, неровности, грязь, снег) | 68%                 | 64%            | 57%            |
|                                                                    | при осмотре процесс измерений зафиксирован на фото или видеозаписи                    | 0,5%                | 1,2%           | 3,4%           |
|                                                                    | при определении высоты линейка установлена под углом                                  | 59%                 | 52%            | 49%            |
| при осмотре места ДТП измерения выполнены                          | с использованием рулетки и/или дорожного курвиметра                                   | 96%                 | 95%            | 94%            |
|                                                                    | с использованием фотограмметрии                                                       | 3,1%                | 3,2%           | 4,4%           |
|                                                                    | лазерным сканированием                                                                | 0,2%                | 0,7%           | 0,8%           |
|                                                                    | привязкой к координатам GPS/ГЛОНАСС                                                   | 0%                  | 0,6%           | 0,7%           |
| при масштабном воспроизведении выполненных замеров:                | размеры привязки объектов полностью сходятся                                          | 68%                 | 73%            | 77%            |
|                                                                    | размеры привязки объектов не сходятся, среди них не сходятся 1-2 измерения            | 20%                 | 16%            | 15%            |
|                                                                    | размеры привязки объектов не сходятся, среди них не сходятся более 3 измерений        | 12%                 | 11%            | 8%             |
| оценка доли неопределенности при воспроизведении схемы             | часть необходимых привязок не выполнена                                               | 65%                 | 58%            | 53%            |
|                                                                    | часть необходимых привязок установлена дополнительным осмотром                        | 87%                 | 77%            | 67%            |
|                                                                    | часть необходимых привязок установлена по спутниковым фото                            | 12%                 | 17%            | 23%            |

Очевидно, что ошибка измерения, внесенная в процессе фиксации ПСИ, в дальнейшем, при производстве ДТП может накапливать ошибку расчета, за счет накопления ошибок определения глубин внедрения, фактической массы ТС, массы пешехода, углов взаиморасположения и столкновения, углов отброса (сброса) и т.д. Что в конечном случае может

приводить к весьма большому разбросу итоговых значений расчетов, выполняемых в ДТЭ и появлению некатегоричных выводов с граничными условиями (например: при скорости движения 62,1 км/ч водитель не имел ТВ, а при 72,1 км/ч уже имел ТВ (при дельте в  $\pm 5$  км/ч, от расчетных 67,1 км/ч).

Таблица 2.10 - Результаты оценки долей вноса в погрешность

| Ошибка измерения при фиксации ПСИ |          | Итоговая ошибка построения линий отброса | Доля вноса в погрешность |                                            |                               |                       |
|-----------------------------------|----------|------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
|                                   |          |                                          | расчета скорости         |                                            | при определении ТВ            |                       |
|                                   |          |                                          | по следам торможения     | через закон сохранения количества движения | в значение остановочного пути | в значение удаления   |
| одного размера                    | на 0,1 м | $\pm 0,35$ м                             | $\pm 0,2$ км/ч           | $\pm 0,17 \div 1,23$ км/ч                  | $\pm 0,671 \div 1,912$ м      | $\pm 0,07 \div 1,4$ м |
|                                   | на 0,3 м | $\pm 0,89$ м                             | $\pm 0,6$ км/ч           | $\pm 0,5 \div 3,45$ км/ч                   | $\pm 1,104 \div 4,97$ м       | $\pm 0,15 \div 2,6$ м |
|                                   | на 0,5 м | $\pm 1,48$ м                             | $\pm 1,0$ км/ч           | $\pm 0,83 \div 7,47$ км/ч                  | $\pm 2,842 \div 9,243$ м      | $\pm 0,26 \div 5,1$ м |
| двух размеров                     | на 0,1 м | $\pm 0,78$ м                             | -                        | $\pm 0,23 \div 3,71$ км/ч                  | $\pm 1,075 \div 3,815$ м      | $\pm 0,15 \div 3,0$ м |
|                                   | на 0,3 м | $\pm 1,81$ м                             | -                        | $\pm 0,69 \div 6,82$ км/ч                  | $\pm 1,783 \div 6,32$ м       | $\pm 0,25 \div 5,0$ м |
|                                   | на 0,5 м | $\pm 3,64$ м                             | -                        | $\pm 1,15 \div 9,74$ км/ч                  | $\pm 3,565 \div 12,646$ м     | $\pm 0,5 \div 10,0$ м |

Для обоснования необходимости рассматриваемого этапа цифровизации процедур предпроцессинга в МОР, был выполнен анализ эффективности технологий и средств фиксации ПСИ с места ДТП и ОИ по индексированным критериям, показанным в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Общий анализ эффективности

| Критерии оценки                                           | Индекс оценки         |                            |                    |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------|
|                                                           | –                     | + / –                      | +                  |
| Безопасность лица, осуществляющего работы по фиксации ПСИ | низкая                | средняя                    | высокая            |
| Скорость оформления                                       | длительное оформление | умеренное время оформления | быстрое оформление |
| Точность фиксации ПСИ                                     | низкая                | средняя                    | высокая            |

Результаты сравнительного анализа эффективности средств фиксации пространственно-следовой информации с места ДТП по базовым критериям оценки показаны в таблице 2.12.

Кроме того было выполнено сравнение ключевых технологий сбора и фиксации ПСИ и ОИ на месте ДТП по расширенным критериям оценки, результаты сравнения показаны в таблице 2.13.

Таблица 2.12 – Оценка эффективности по расширенным критериям

| Оборудование и/или технологии, используемые для сбора данных для дальнейшей реконструкции | Критерии оценки     |                                                           |                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------|
|                                                                                           | Скорость оформления | Безопасность лица, осуществляющего работы по фиксации ПСИ | Точность фиксации ПСИ |
| Механические измерительные приборы                                                        | -                   | -                                                         | -                     |
| Фотограмметрия                                                                            | +                   | +                                                         | +/-                   |
| Приборы, работающие по технологии LIDAR                                                   | +/-                 | +                                                         | +/-                   |
| Электронные тахеометры                                                                    | -                   | +/-                                                       | +                     |
| Безотражательные электронные тахеометры                                                   | +                   | +                                                         | +/-                   |
| Приборы GPS                                                                               | +                   | +/-                                                       | +/-                   |
| Моторизованные электронные тахеометры                                                     | +                   | +                                                         | +                     |
| Роботизированные электронные тахеометры                                                   | +                   | +                                                         | +                     |
| ImagingStation                                                                            | +                   | +                                                         | +                     |
| 3D-лазерное сканирование                                                                  | +/-                 | +                                                         | +                     |
| БПЛА                                                                                      | +                   | +                                                         | +                     |
| Гибридные электронные тахеометры                                                          | +                   | +                                                         | +                     |

Следует разделить рассматриваемые ДТП в общей выборке, для этого введем следующую индексацию классифицируемых событий (случаев):

Н – случаи, когда имел только наезд на ДО или ЭДО;

С+Н – случаи, когда первично имело место столкновение ТС, после чего один или несколько участников столкновения произвели наезд на ДО или ЭДО;

Н+Н – случаи, когда первично имел место наезд на стоящее ТС, в результате которого имел место вторичный наезд на ДО или ЭДО;

Н+С – случаи, когда первично имел место наезд одного ТС на ДО или ЭДО в результате которого имело место столкновение ТС;

Таблица 2.13 – Результаты сравнения методов

| Расширенные критерии оценки          | Обычный (традиционный) метод с использованием ручных измерений                   | Триангуляция фотоизображений в 2D планы с использованием ПО типа PC-Rect | Анализ фотографий в 3D сцены с использованием ПО типа MapScenes                           | 3D лазерное сканирование                                    | Применение БПЛА с фотокамерами                                                             |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Технические средства                 | Измерение расстояний ручными инструментами, использование чертежных инструментов | Фотокамера со специализированным ПО, стационарный компьютер              | Фотокамера, точки привязки (опорные точки), специализированное ПО, стационарный компьютер | Лазерный сканер, специализированное ПО, ноутбук или планшет | БПЛА с фотокамерой, точки привязки (опорные точки), специализированное ПО, ноутбук планшет |
| Технологические процессы             | Составление схемы вручную                                                        | Обработка данных в ПО                                                    | Обработка данных в ПО                                                                     | Обработка данных в ПО                                       | Обработка данных в ПО                                                                      |
|                                      | Иногда в CAD-системе                                                             | Работа в CAD-                                                            | Работа в CAD- системе                                                                     | Работа в CAD-системе                                        | Работа в CAD-системе                                                                       |
| Вспомогательные средства             | Не применяются                                                                   | аэро и спутниковые снимки, топография, паспорта дорог, схемы ОДД         | аэро и спутниковые снимки, топография, паспорта дорог, схемы ОДД                          | Не требуются                                                | Не требуются                                                                               |
| Подготовка на месте ДТП              | Формирование ручной схемы ДТП на основании измеренных расстояний                 | Расстановка опорных точек (точек привязки)                               | Расстановка опорных точек (точек привязки)                                                | Не требуется                                                | Расстановка опорных точек (точек привязки)                                                 |
| Требуемое время на работу на месте   | От 20 минут до 2 часов                                                           | От 10 до 20 минут                                                        | От 20 до 40 минут                                                                         | От 15 до 45 минут                                           | От 5 до 15 минут                                                                           |
| Требуемое время для обработки данных | От 2 до 6 часов                                                                  | От 1 до 3 часов                                                          | От 3 до 10 часов                                                                          | От 30 минут до 2 часов                                      | От 3 до 35 минут                                                                           |

Окончание таблицы 2.13

| Расширен-<br>ные<br>критерии<br>оценки                                            | Обычный<br>(традиционный)<br>метод с<br>использованием<br>ручных<br>измерений                                                                         | Триангуляция<br>фотоизображе-<br>ний в 2D<br>планы с<br>использовани-<br>ем ПО типа<br>PC-Rect            | Анализ<br>фотографий в<br>3D сцены с<br>использовани-<br>ем ПО типа<br>MapScenes       | 3D<br>лазерное<br>сканирова-<br>ние | Применение<br>БПЛА с<br>фотокамера-<br>ми |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|
| Затраты<br>на<br>выполне-<br>ние работ<br>по<br>фиксации<br>ОИ на<br>месте<br>ДТП | от средних до<br>значительных                                                                                                                         | низкие                                                                                                    | от средних до<br>значительных                                                          | от низких<br>до<br>средних          | от низких до<br>средних                   |
| Затраты<br>на работу<br>при<br>подготовк<br>е к<br>фиксации<br>места<br>ДТП       | от средних до<br>значительных                                                                                                                         | от средних до<br>значительных                                                                             | очень<br>высокие                                                                       | низкие                              | средние                                   |
| Требова-<br>ния к<br>обучению<br>персонала                                        | низкие<br>(владение<br>основами<br>черчения,<br>навыки работы в<br>CAD),<br>допускается<br>приобретение<br>необходимых<br>навыков на<br>рабочем месте | средние<br>(владение ПО,<br>основами<br>фотограммет-<br>рии),<br>возможно<br>индивидуаль-<br>ное обучение | высокие, необходимо прохождение<br>специализированных курсов повышения<br>квалификации |                                     |                                           |

О+(индекс случая) – случаи, когда первично имело место опрокидывание, в ходе которого имело место вторичное событие с индексом (Н, С+Н, Н+С, Н+С, Н+Н);

(индекс случая)+О – случаи, когда после первичного события с индексом (Н, С+Н, Н+С, Н+С, Н+Н) имело место опрокидывание ТС.

Общая оценка распределения данных видов случаев от всех ДТП с наездом на ДО и ЭДО, по которым выполнялись исследования (ДТЭ) показана в таблице 2.14. Как было указано выше на момент начала производства исследования экспертом состояние ДО и ЭДО как правило изменено (замена, ремонт), при этом если выделить только дела с тяжким вредом здоровью и летальным исходом, доля таких ДТП где имели место индексированные выше случаи, в выборке с 2015 по 2021 годы в среднем достигает порядка 9–11% от общего числа ДТЭ по СЗФО.

Таблица 2.14 – Общая оценка распределения индексированных случаев

| Случай | Годы  |       |       |       |       |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | 2017  | 2018  | 2019  | 2020  | 2021  |
| Н      | 31,2% | 30,7% | 30,2% | 32,3% | 32,4% |
| С+Н    | 37,1% | 38,2% | 38,6% | 38,1% | 39,1% |
| Н+Н    | 5,2%  | 4,3%  | 4,8%  | 4,2%  | 4,1%  |
| Н+С    | 14,7% | 13,3% | 13,5% | 13,8% | 14,1% |
| О+     | 6,4%  | 7,2%  | 6,4%  | 6,2%  | 5,2%  |
| +О     | 5,4%  | 6,3%  | 6,5%  | 5,4%  | 5,1%  |

Таблица 2.15 – Оценка причин по всем Н+

| Случаи                       | Причина                                                                    | Описание                                                                                                    | Доля   |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Н+ в неуправляемом состоянии | потеря устойчивости из-за отклонений в подсистемах В и Д                   | выбор скорости движения выше допустимой на участке с повреждениями покрытия                                 | 22,80% |
|                              | потеря устойчивости из-за отклонений в подсистеме А                        | отказ тормозной системы ТС, его рулевого управления и т.п.                                                  | 1,40%  |
|                              | потеря устойчивости из-за отклонений в подсистемах Д и С                   | возникновение участков с низкими сцепными свойствами                                                        | 7,80%  |
|                              | потеря устойчивости из-за отклонений в подсистеме В                        | нарушение ПДД, маневрирование, съезд на обочину, засыпание, потеря сознания и т.п.                          | 31,80% |
| Н+ в управляемом состоянии   | резкий маневр (отворот руля)                                               | реагирование на опасность, попытка объезда                                                                  | 7,60%  |
|                              | не соблюдение бокового интервала                                           | касательные наезды в темное время суток                                                                     | 11,90% |
|                              | движение по кривой в плане со скоростью не позволяющей ее пройти без увода | попытка выполнить поворот налево на скорости выше допустимой, приводящая к выходу за пределы проезжей части | 14,50% |
|                              | не внимательность / отвлечение от управления                               | съезд с дороги из-за отвлечения внимания                                                                    | 1,50%  |
|                              | воздействие на руль со стороны пассажира                                   | действие пассажира приводящее к резкой смене направления движения                                           | 0,70%  |

Общее число случаев Н+... следует также разделить на случаи когда наезд имеет место при неуправляемом состоянии ТС (занос, потеря устойчивости, когда вектор количества движения не совпадает с продольной осью ТС) и на случаи когда наезд имеет место в неуправляемом состоянии ТС (вектор количества движения совпадает с продольной осью ТС). Оценка причин по всем Н+ случаям показана в таблице 2.15.

Обобщая собранные данные, следует отметить, что в большинстве случаев для случаев Н, С+Н и Н+С имевших место на КАД, ЗСД и дорогах общего пользования в Ленинградской области, основным фактором сопутствующим наезду на ДО и ЭДО в 95% случаев следует считать превышение максимально допустимой скорости движения (по п.10.1 ПДД), которое было сопряжено с нарушением водителями иных пунктов ПДД (для КАД и ЗСД в 74% случаев это нарушение правил перестроения и соблюдения дистанции, бокового интервала и расположения на проезжей части) при этом для ДТП по сценариям случаев +О и О+ в 57% предшествовала потеря устойчивости (занос) ТС.

Учитывая вышеизложенное, следует сделать следующие выводы и выделить некоторые особенности реальной практики производства экспертизы ДТП в РФ, свойственные сложившейся методологии в экспертизе ДТП:

1. Данные по бортовым устройствам регистрации событий (БУРС) используются преимущественно только в уголовных делах, при этом результаты сканирования приобщаются к материалам дела. По всей России, имеются не более 30-40 случаев, когда блоки изъятые с ТС, органы судов или следствия отправляли на дешифровку в страны Европейского Союза (в частности в Германию, Польшу, Латвию). Во всех таких случаях результаты дешифровки данных остаются в материалах дела и недоступны для получения сторонними исследователями.

2. В реальной экспертной практике по ДТП фотограмметрические исследования используется весьма редко, наиболее распространены

экспертизы с анализом видеозаписей (из-за все более возрастающего покрытия наружными камерами наблюдения сети автомобильных дорог, городских систем наблюдения и т.п., а также из-за все большей доступности конечным пользователям видеорегистраторов в салоне ТС). Записи с систем наружного наблюдения приобщаются судом, следствием или дознанием ГИБДД на основании ответа на запрос в соответствующий орган, занятый фиксацией и наблюдением, записи с частных видеорегистраторов из салона ТС участника ДТП и/или свидетелей приобщаются по ходатайству такого лица, а также на основании выемки носителя информации органами суда, следствия. В случаях ДТП с тяжким вредом или летальным исходом, следователь оформляющий протокол осмотра места ДТП, изымает носитель с видеорегистратора как правило в ходе осмотра ТС.

3. В связи 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. Соответственно необходимость сканирования ТС с целью получения высокоточных значений объема внедрения в локальной зоне деформаций ТС крайне низка. В единичных случаях лазерное сканирование применяется также для задач определения взаиморасположения, определения факта контактно-следового взаимодействия с целью объемного совмещения локализаций деформаций, т.е. для задач транспортной трасологии. Требования к оборудованию и к данным при сканировании, требования к применению БПЛА для съемки ТС и/или места ДТП в РФ также нормативно не определены.

## **2.4. Методические основы применения индексов травмирования в задачах ДТЭ, ЭП ДТП и ПБ ТС и ЭДО**

Применение индексов травмирования (ИТ) в отечественной практике производства дорожно-транспортных экспертиз (ДТЭ) на настоящий момент

весьма ограничено, что следует из анализа фактических ДТЭ по Северо-западному Федеральному округу, выполненных в государственных экспертных организациях (результаты данного анализа ежегодно обновляются в Институте безопасности дорожного движения (ИБДД) СПбГАСУ и ранее публиковались в [1-4]).

Основная сложность расчета ИТ в практике ДТЭ возникает не столько в ограниченности действующих методик расчета скорости движения ТС до ДТП, сколько в возможности определения величин осевых замедлений/ускорений в центрах масс тела человека (головы, туловища или конечностей). В этой связи, опираясь на модельно-ориентированный подход (МОП) к реконструкции механизма ДТП, изложенным в [9] и развиваемым в работах [79], решение по расчету ИТ может быть получено за счет использования антропоморфных манекенов, реализованных многотельными моделями типа MADYMO [118] или методом конечных элементов (модели типа THUMS и подобные [119]).

Наиболее широко классификация и виды индексов ранее были описаны в работе [79]. Имеются отдельные работы показывающие частные случаи применения ИТ в ДТЭ на примерах отдельных экспертных задач по реконструкции механизма ДТП, такие как [120]. При этом следует отметить, что такие индексы как ASI, NIC и THiV включены в отечественную нормативную документацию и используются в оценке пассивной безопасности элементов дорожного обустройства (например ГОСТ 32949 [121] и других аналогичных или связанных с ним нормативах), а также в бортовых устройствах регистрации событий (БУРС) по ГОСТ 33464 [122].

Пространство, формируемое массивом зарубежных публикаций в области применения ИТ как ДТЭ так и в экспертной профилактике (ЭП) ДТП весьма обширно и охватывает как смежные области, так и само пространство производства ДТЭ, следует отметить что использование ИТ в практике как ДТЭ, так и ЭП ДТП, при оценке публикаций в выборке за прошедшей 3 года по ключевым словам: «реконструкция механизма ДТП», «пассивная

безопасность», «моделированием ДТП» достигает до 89% статей в данной выборке. Наиболее заметными и популярными по частоте цитирования являются работы: [123-127].

С учетом [79], целесообразно дать критическую оценку применения ИТ в задачах ДТЭ, ЭП ДТП и ПБ ТС и ЭДО, для этого обобщим общие сведения по индексам травмирования в таблице 2.16.

С учетом [79,128] и таблицы 2.16, дадим общую критическую оценку точности применения указанных в ИТ, в частности:

Индексы AIS и ISS: Эти индексы широко применяются, но их точность зависит от субъективной оценки экспертов. ISS, например, игнорирует множественные травмы в одной области, что может привести к недооценке тяжести состояния.

Таблица 2.16 – Сводная таблица по индексам травмирования

| Индекс | Название                         | Область применения                                                                |
|--------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| AIS    | Abbreviated Injury Score         | Оценка тяжести отдельных травм по шестибальной шкале для разных областей тела.    |
| ISS    | Injury Severity Score            | Оценка политравмы (сумма квадратов трех наиболее тяжелых AIS из разных областей). |
| HIC    | Head Injury Criterion            | Прогнозирование травм головы на основе ускорения (используется в краш-тестах).    |
| NIC    | Neck Injury Criteria             | Оценка травм шеи при фронтальных ударах (ось x).                                  |
| Nij    | Normalized Neck Injury Criterion | Комплексная оценка травм шеи (сочетание осевой силы и изгибающего момента).       |
| TTI    | Thorax Trauma Index              | Оценка травм грудной клетки (переломы, повреждения органов).                      |
| ASI    | Acceleration Severity Index      | Оценка общего ущерба для тела на основе замедления ТС (используется в БУРС).      |

Индекс HIC: Хотя HIC коррелирует с тяжестью травм головы, он не учитывает такие факторы, как возраст, анатомические особенности или направление удара. Пороговые значения (700 для 15 мс, 1000 для 36 мс) являются усредненными и могут быть неточными для конкретных случаев.

Индексы NIC и Nij: NIC ограничен фронтальными ударами, что снижает его универсальность. Nij более точен, но требует сложных измерений сил и моментов, что затрудняет его применение в реальных условиях.

Индексы TPI и ASI: TPI зависит от точности измерения деформации грудной клетки, что может варьироваться в зависимости от состояния мышц (напряженные/расслабленные). ASI, хотя и удобен для анализа ДТП, не учитывает индивидуальные особенности пострадавшего, такие как рост, вес или положение в момент удара.

В целом, подводя итог, существует широкий спектр индексов для оценки травм, каждый из которых ориентирован на конкретные области тела или типы воздействий. Это позволяет проводить детальный анализ, но усложняет унификацию методов.

Большинство индексов основаны на усредненных данных и не учитывают индивидуальные анатомические или физиологические особенности. Это может приводить к неточностям в прогнозировании тяжести травм. При этом точность многих индексов (например,  $N_{ij}$  или TPI) напрямую зависит от качества и полноты исходных данных, что ограничивает их применение в реальных условиях, особенно при отсутствии точных измерений.

Индексы, такие как ASI и NIC, активно используются в краш-тестах и системах БУРС, но их упрощенный характер требует осторожности при интерпретации результатов. Для повышения точности необходимо разрабатывать более сложные модели, учитывающие индивидуальные параметры пострадавших, а также комбинировать несколько индексов для комплексной оценки.

Несмотря на существующие ограничения, текущие индексы остаются ценным инструментом для оценки травм. Их критический анализ и дальнейшее совершенствование помогут повысить точность прогнозирования и улучшить методы защиты в ДТП.

Как отмечено в [9], МОР позволяет сформировать методологию производства ДТЭ, как комплексную систему, позволяющую учитывать все управляющие мотивы исследования, а именно систему, работа которой

характеризуется полнотой (практической широтой), обоснованностью, проверяемостью, категоричностью и наглядностью результатов (выводов).

Для формирования алгоритмизированного представления методических основ (МО) использования ИТ в ДТЭ была выполнена типизация задач ДТЭ [62,79,81-83].

Фундаментальной частью аппарата реализующего МО являются два принципа: первый – модель есть неотъемлемый и основной результат исследования; второй – пространственно-следовая информация с места ДТП и с объектов исследования в ДТЭ при условии реализации концепции МОР не может быть субъективно изменена [9], опираясь при этом на арсенал средств цифровой фиксации измерений, фотограмметрии и анализа видеозаписей.

Блок-схема алгоритмизированного представления МО использования ИТ в ДТЭ показана на рисунке 2.9.

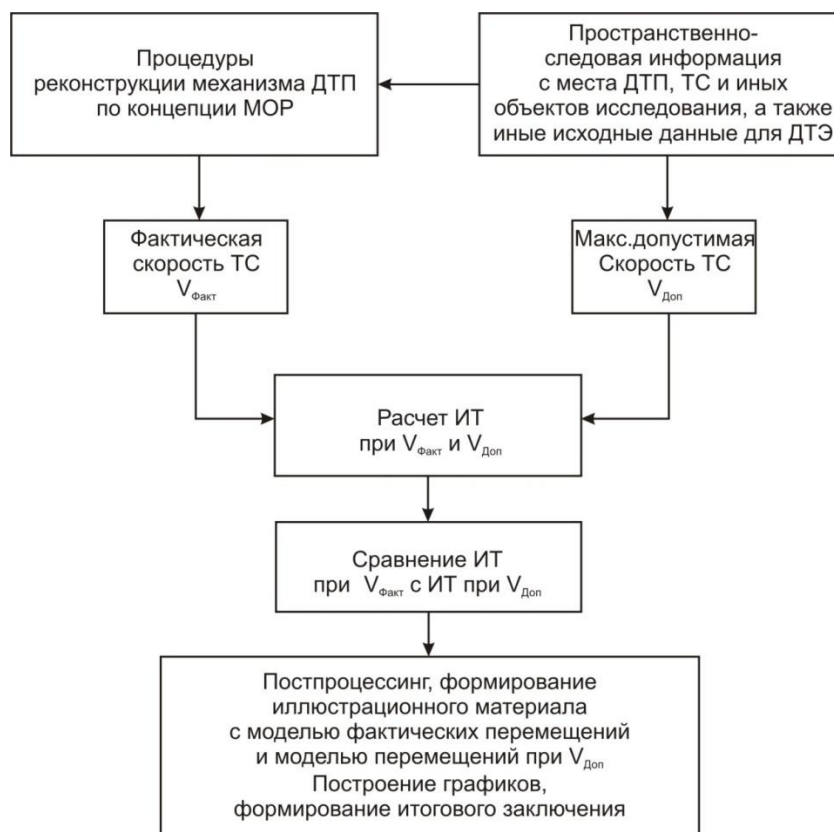


Рисунок 2.9 – Блок-схема алгоритмизированного представления МО использования ИТ в ДТЭ

Применение показанного алгоритмизированного представления в практике ДТЭ полностью основано на модельно-ориентированном подходе к реконструкции (МОР) механизма ДТП, кроме того в качестве сравнительных данных по ИТ полученным при скоростях в момент начала контактно-следового взаимодействия можно получить по обширным данным натурных тестов NHTSA при дешифрации файлов записей лабораторного оборудования с ТС и манекенов (обработка файлов формата EV5 в программах Enetre или SignalBrowser пакета NHTSA NVS).

МО применимы в следующих исследованиях: оценка средств пассивной безопасности конструкций, как ТС, так и элементов дорожного обустройства (ЭДО), определение допустимых уровней обеспечения заданных ИТ в различных видах ДТП этими средствами, оценка эффективности внедрения мер по ЭП ДТП и внедрения средств пассивной безопасности, прогнозирование изменения защищенности человека при определении требований к ВАТС и в других смежных областях.

Кроме того, применение приведенных МО позволит по мере перехода к МОР существенно снизить проблемный разрыв, описанный выше, между фактическими результатами ДТЭ и ЭП ДТП.

## 2.5. Выводы по Главе 2

На основании представленных результатов анализа и сопутствующего ему комплекса выполненных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. На основе обширной выборки по ДТЭ выполненным в СЗФО РФ за период с 2011 по 2021 годы, определен характер изменения вероятности наступления летального исхода в ДТП у пешехода с учетом скорости движения ТС в момент наезда (в момент ДТП). Для всех исследований, объединяемых данной тематикой потенциально возможна более точная оценка тяжести полученных политравм пострадавшими пешеходами и

велосипедистами при использовании индекса тяжести травмы (политравмы) - ISS (*Injury Severity Score*) [14]. Это позволит в общем виде оценить риск для жизни пострадавших от ДТП и в частности определить бальную (ранжированную) оценку степени телесных повреждений в ДТП.

2. При выполнении анализа полученных моделей перемещений по численным экспериментам может введен показатель высотного соотношения передней кромки капота к высоте ЦТ бедра модели антропоморфного манекена –  $R_H$ , в м. Данный показатель позволил бы более точно учитывать геометрию контактной зоны, чем представление зависимостей по классам ТС, при анализе полученных данные по трамированию.

3. Выявлено что категоричность выводов ДТЭ непосредственно зависит от содержательности исходной ПСИ, при этом метод применяемый при решении задач ДТЭ избирается экспертами исходя именно из объема имеющейся ПСИ по ОИ (подсистемам ВАДС). Кроме того, широту вариативности выводов относительно различных методов оптимизации применяемых численных методов следует охарактеризовать как экспоненциально зависящую от качественных свойств ПСИ и это явление обусловлено прямой причинно-следственной связью между методами сбора и фиксации ПСИ на месте ДТП и по ОИ, методами обработки, полученной ПСИ и требуемым объемом ПСИ для реализации МОР.

4. Характер производства ДТЭ, в подавляющем большинстве случаев, следует определить как экспертное исследование, основанное частично на нечетких и/или неопределенных данных с оптимизацией поиска краевых решений, в частности в задачах определения скорости движения ОИ до ДТП – определения минимального значения скорости при минимальных значениях диапазонов исходных значений, а в задачах определения места ДТП (места наезда на пешехода) – определения границ области допустимого решения.

### **ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОМ ПОДХОДЕ К ДТЭ И ЭП ДТП С УЧАСТИЕМ ПЕШЕХОДОВ**

#### **3.1. Критическая оценка существующей методологии сбора и анализа данных по ДТП**

В Российской Федерации существует единая система учета дорожно-транспортных происшествий (ДТП), регламентированная Постановлением Правительства РФ и приказами МВД. Основная цель учета – изучение причин и условий возникновения ДТП для принятия мер по их устранению и повышению безопасности дорожного движения. Учет ведется несколькими организациями, включая органы внутренних дел, владельцев автомобильных дорог, медицинские и страховые организации, что обеспечивает комплексный подход к сбору данных.

Министерство внутренних дел РФ играет ключевую роль в организации учета ДТП, включая сбор, обобщение и контроль достоверности данных. Официальная статистика формируется на основе информации о ДТП с пострадавшими, произошедших на дорогах общего пользования. Данные публикуются на официальном сайте Госавтоинспекции, что обеспечивает прозрачность и доступность информации для всех заинтересованных сторон.

Для каждого ДТП заполняется электронная карточка учета, содержащая подробные сведения о происшествии, включая место, время, участников, дорожные условия и последствия. Карточка состоит из 10 разделов, охватывающих все аспекты ДТП, что позволяет проводить детальный анализ и выявлять закономерности. Владельцы дорог также заполняют свою форму учета, уделяя особое внимание дорожным условиям и их влиянию на аварийность.

Владельцы автомобильных дорог в целях оперативного сбора и учёта информации о ДТП, а также принятия необходимых оперативных мер по

приведению эксплуатационного состояния дорог и улиц в соответствие с требованиями нормативных правовых актов и ликвидации последствий ДТП в установленном порядке используют в том числе Автоматизированную систему учета и сбора сведений о ДТП органов внутренних дел Российской Федерации. С использованием данной автоматизированной системы осуществляется ежесуточный сбор сведений о ДТП, а также проводится анализ приобщенных к Карточке оперативного учета (КОУ) ДТП материалов.

Процесс учета ДТП включает два основных подпроцесса: сбор и контроль достоверности данных, а также их анализ для выявления причинно-следственных связей и разработки профилактических мер. Автоматизированные системы учета, такие как информационно-управляющая система Госавтоинспекции, обеспечивают оперативность и точность обработки данных.

Владельцы автомобильных дорог обязаны участвовать в проверках дорожных условий, анализировать ДТП на подведомственных участках и принимать меры по устранению выявленных недостатков. Они также взаимодействуют с Госавтоинспекцией, предоставляя данные о дорогах и участвуя в комиссиях по расследованию ДТП. Результаты анализа используются для планирования дорожных работ и целевых программ по повышению безопасности.

Медицинские организации играют важную роль в учете ДТП, предоставляя сведения о пострадавших в срок не позднее одних суток. Это позволяет оперативно обновлять статистику и принимать меры для оказания помощи. Владельцы транспортных средств также ведут учет ДТП с участием своих автомобилей, сверяя данные с официальными источниками.

Для обеспечения полноты и достоверности данных проводятся регулярные сверки между различными организациями, включая Госавтоинспекцию, медицинские учреждения и владельцев дорог. Ответственность за организацию учета и анализа ДТП возлагается на

руководителей соответствующих органов, что подчеркивает важность этого процесса для государственной системы безопасности дорожного движения.

Существующая методология учета ДТП в РФ является комплексной и многоуровневой, но ее эффективность зависит от слаженного взаимодействия всех участников процесса. Автоматизация сбора и обработки данных, а также использование современных технологий, таких как ГЛОНАСС/GPS, способствуют повышению точности и оперативности учета. Однако для дальнейшего совершенствования системы необходимо продолжать работу по стандартизации данных и улучшению координации между ведомствами.

Анализ данных ДТП позволяет не только выявлять проблемные участки дорог, но и прогнозировать развитие аварийности, что является важным инструментом для принятия управленческих решений. Результаты учета используются для разработки мер по снижению аварийности и ликвидации опасных участков.

Однако, следует критически оценить пригодности данных учета ДТП без результатов дорожно-транспортных экспертиз (ДТЭ), оперирующих большей детализацией по фактическим ДТП.

В частности, данные учета ДТП, основанные на карточках КОУ и отчетах ГИБДД, фиксируют лишь общие параметры происшествия (место, время, участники, схема ДТП), но не раскрывают глубинных причин, особенно в случаях наездов на пешеходов. Без проведения ДТЭ невозможно точно установить, какие факторы - ошибки водителя, поведение пешехода, недостатки дорожно-транспортной инфраструктуры или, например, плохая видимость - стали ключевыми. Это снижает эффективность экспертной профилактики ДТП, так как меры могут быть направлены не на реальные причины, а лишь на формальные показатели.

Это обуславливает ограниченность применения ЭП ДТП, а именно ЭП ДТП требует не только статистики, но и анализа динамики ДТП, включая фактические данные по скорости транспортных средств, траекториям движения объектов исследования (реконструкции), и влиянию других

факторов, имевших место на момент происшествия. В стандартных учетных данных эти параметры либо отсутствуют, либо фиксируются субъективно (например, "плохая видимость" без точных замеров). Без ДТЭ невозможно выявить системные недостатки, такие как неправильная организация пешеходных переходов или ошибки в разметке, что делает профилактические меры поверхностными.

Разработка эффективных мер безопасности (например, установка светофоров, искусственных неровностей или корректировка скоростного режима) требует точных данных о механизме ДТП. Без ДТЭ решения часто принимаются на основе усредненных показателей, а не реальных условий конкретных аварий.

Очевидно, что в ДТП с пешеходами критически важны детали: был ли пешеход в темной одежде, имелись ли ограждения, работали ли фонари, была ли зона перехода слишком широкой или неудобной. Однако в стандартных учетных формах такие нюансы либо отсутствуют, либо описываются кратко. Без экспертиз невозможно определить, какие именно элементы инфраструктуры или поведения участников движения требуют коррекции. В результате меры по БДД могут сводиться к общим рекомендациям (например, "усилить контроль"), а не к конкретным инженерным или организационным изменениям.

Следовательно, следует сделать следующий вывод: текущее состояние, характеризующее разрывом между ДТЭ и ЭП ДТП, о котором указывалось также ранее, обуславливает необходимость интеграции ДТЭ в систему учета ДТП. Текущая система учета ДТП полезна для статистики, но недостаточна для глубокого анализа и профилактики. Чтобы повысить эффективность экспертной работы и мер БДД, необходимо обязательное проведение ДТЭ по ДТП с пешеходами, особенно в местах их концентрации. Это позволит перейти от формального учета к реальному пониманию причин аварий и разработке адресных, а не шаблонных решений. В противном случае меры останутся реактивными (устранение последствий), а не превентивными (предотвращение

ДТП). Дальнейшее развитие системы также должно включать внедрение новых технологий, направленных на переход к МОР ДТП, и усиление межведомственного взаимодействия для повышения эффективности профилактических мер.

### **3.2. Базовый метод расчета импульса сил в анализе профилей ускорений моделей и натуральных объектов**

Базовой в инструментarii ПО, реализующем вышеуказанные в главе 2 алгоритмы и концепцию по Главе 1 является методика расчета ИСС.

Математическому описанию форм кривых ИСС, наиболее широко распространенных в исследовательской практике, а именно: квадратичной синусоидальной, синусоидальной, прямоугольной и симметричной треугольной. Технологический процесс построения модели подразумевает использование минимального объема переменных, определяющих ударный импульс. Данная обобщенная модель выведена для столкновений двух автомобилей (т.е. последующие ИСС при вторичных контактах могут носить один из видов рассмотренных форм кривой).

Квадратичной синусоидальной форме кривой изменения ИСС соответствует удар в деформируемое барьерное ограждение (наезд на другое ТС и т.п.), центральная часть такой кривой в районе максимума описывается также простой синусоидальной формой и соответствует удару в жесткое (недеформируемое) барьерное ограждение (наезд на препятствие, столб и т.п.).

Прямоугольный ИСС характерен для большинства видов столкновений ТС (фронтальные и центральные боковые), исключая касательно-скользящие.

Треугольный симметричный характерен для не центральных ударов, а также для упрощенных расчетных моделей (например внедренной в алгоритм Crash 3, используемый в большинстве стран мир как наиболее

апробированный при расчете затрат кинетической энергии на объемные деформации ТС).

Примеры выделяемых форм кривых относительно фактических данных проведенных краш-тестов, показаны на рис.3.1-3.2.

Рассмотрим квадратично синусоидальную форму кривой изменения ИСС, замедление ТС, в этом случае будет определяться по следующей формуле:

$$a = P \sin^2\left(\frac{\pi \cdot t}{T}\right), \quad (3.1)$$

где  $P$  – пиковая величина замедления (максимальное значение в зоне колебаний), м/с<sup>2</sup>;

$t$  – расчетное время, относительно всей продолжительности стадии контактно-следового взаимодействия  $T$ , с.

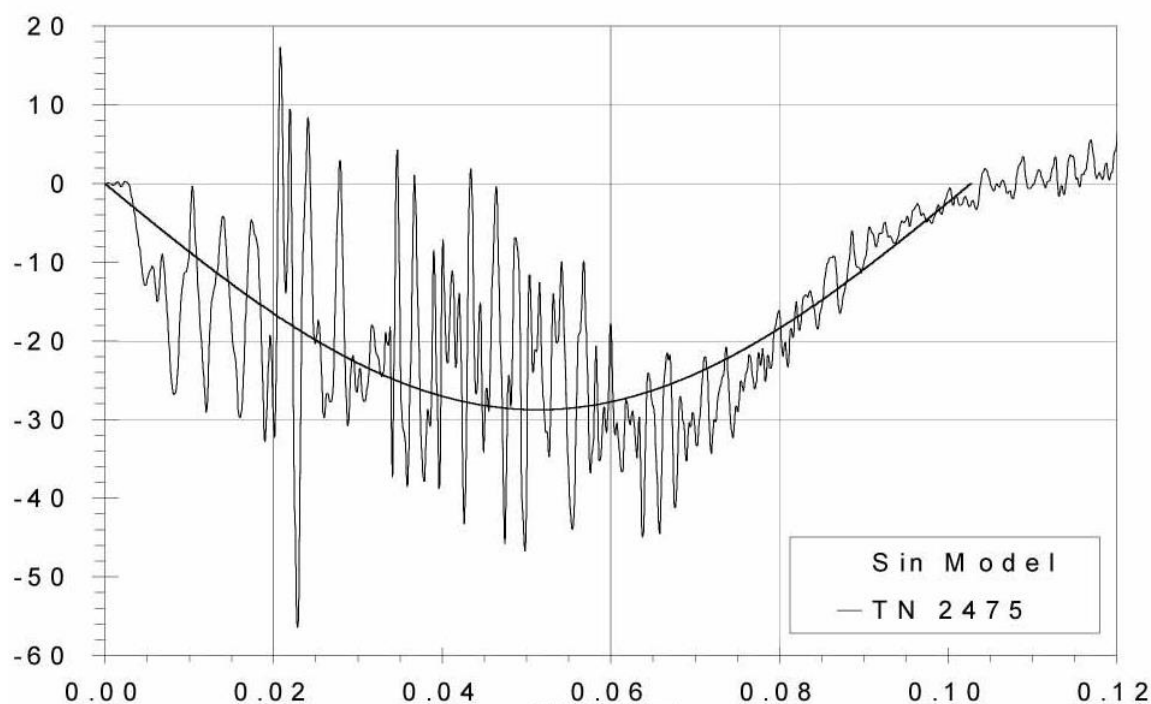


Рисунок 3.1 – Синусоидальная форма кривой зависимости замедления от времени контакта, для теста №2475 (фронтальный удар, при скорости 56 км/ч)

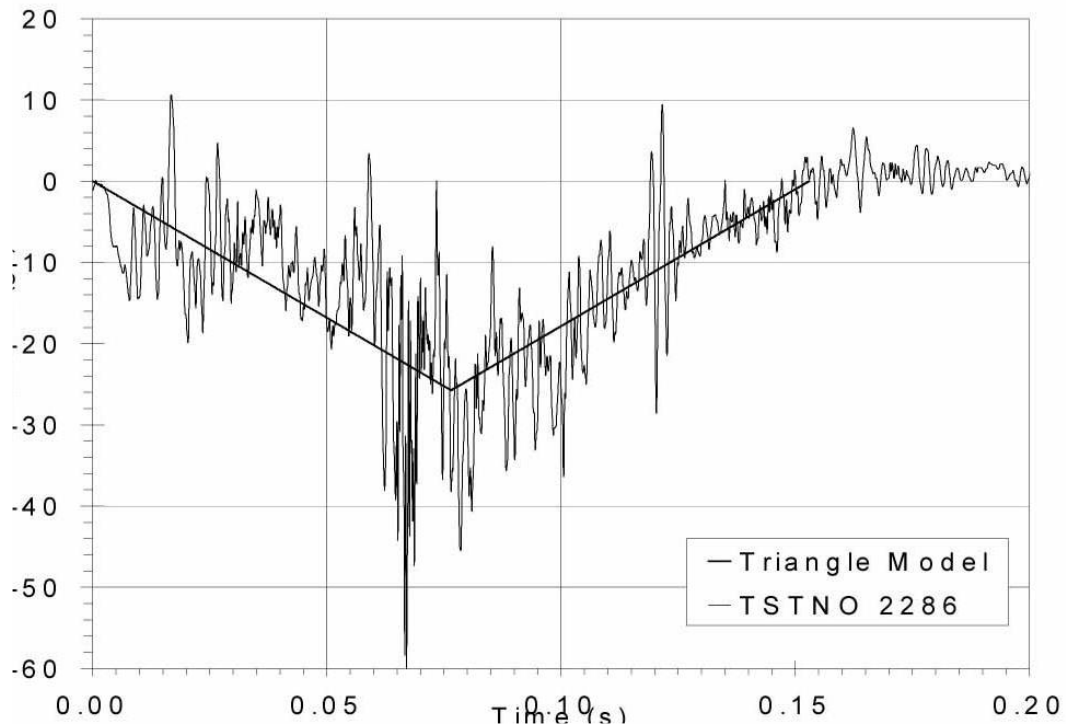


Рисунок 3.2 – Симметричная треугольная форма кривой зависимости замедления от времени контакта, для теста №2286 (фронтальный удар, при скорости 64 км/ч)

Интегрируя ускорение (замедление) по времени, получаем скорость ТС, по формуле:

$$V = \frac{P}{4\pi} \left[ 2\pi t - T \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right] + C_1, \quad (3.2)$$

где  $C_1$  – постоянная интегрирования, величина которой может быть определена при  $t = 0$ , т.е. когда она будет равна начальной скорости в момент контакта  $V_0$ , т.е.:

$$V = \frac{P}{4\pi} \left[ 2\pi t - T \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right] + V_0, \quad (3.3)$$

При этом, в расчетный момент времени  $t$  равный полному времени стадии контактно-следового взаимодействия  $T$ , скорость ТС будет равна сумме его начальной скорости и ПВС ( $\Delta V$ ), откуда максимальная величина замедления может быть определена как:

$$P = \frac{2 \cdot \Delta V}{T}, \quad (3.4)$$

Интегрируя (3.3) получаем объем внедрения ТС:

$$S = \frac{T^2 \cdot P \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot t}{T}\right) + 2\pi^2 \cdot t(Pt + 4V_0)}{8\pi^2} + C_2, \quad (3.5)$$

где  $C_2$  – постоянная интегрирования, величина которой может быть определена при  $t = 0$ , т.е. когда  $S$  также будет равно 0, откуда:

$$C_2 = \frac{-T^2 \cdot P}{8\pi^2}, \quad (3.6)$$

Подставив  $C_2$  в (3.5) получаем объем внедрения как функцию по времени:

$$S = \frac{T^2 \cdot P}{8\pi^2} \left[ \cos\left(\frac{2\pi \cdot t}{T}\right) - 1 \right] + \frac{t}{4}(Pt + 4V_0), \quad (3.7)$$

Откуда полный период времени стадии контактно-следового взаимодействия определяется как:

$$T = \frac{S_{1\max} + S_{2\max}}{\text{abs}\left[\frac{1}{2}(\Delta V_1 - \Delta V_2) + (V_{01} - V_{02})\right]}, \quad (3.8)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют ТС1 и ТС2.

Аналогично, рассмотрим простую синусоидальную форму кривой изменения ИСС, замедление ТС, в этом случае будет определяться по следующей формуле:

$$a = P \sin \Theta, \quad (3.9)$$

где  $\Theta$  – угол касательной к кривой, равный:

$$\Theta = \frac{\pi \cdot t}{T}, \quad (3.10)$$

Интегрируя ускорение (замедление) по времени, получаем скорость ТС, по формуле:

$$V = \frac{-T \cdot P \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{T}\right)}{\pi} + C_1, \quad (3.11)$$

где  $C_1$  – постоянная интегрирования, величина которой может быть определена при  $t = 0$ , а именно:

$$C_1 = \frac{T \cdot P}{\pi} + V_0, \quad (3.12)$$

Таким образом, подставляя (3.12) в (3.11), получаем:

$$V = \frac{-T \cdot P \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{T}\right)}{\pi} + \frac{T \cdot P}{\pi} + V_0, \quad (3.13)$$

При этом, в расчетный момент времени  $t$  равный полному времени стадии контактно-следового взаимодействия  $T$ , скорость ТС будет равна сумме его начальной скорости и ПВС ( $\Delta V$ ), откуда максимальная величина замедления может быть определена как:

$$P = \frac{\Delta V \cdot \pi}{2T}, \quad (3.14)$$

Интегрируя (3.13) получаем объем внедрения ТС:

$$S = \frac{-T^2 \cdot P \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{T}\right)}{\pi^2} + t \left( V + \frac{T \cdot P}{\pi} \right) + C_2, \quad (3.15)$$

где  $C_2$  – постоянная интегрирования, величина которой может быть определена при  $t = 0$ , т.е. когда  $S$  также будет равно 0, откуда следует что  $C_2$  будет также равно 0.

Следовательно:

$$S = \frac{-T^2 \cdot P \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{T}\right)}{\pi^2} + t \left( V + \frac{T \cdot P}{\pi} \right), \quad (3.16)$$

Откуда полный период времени стадии контактно-следового взаимодействия определяется как:

$$T = \frac{S_{1\max} + S_{2\max}}{\text{abs}\left[\frac{1}{2}(\Delta V_1 - \Delta V_2) + (V_{01} - V_{02})\right]}, \quad (3.17)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют ТС1 и ТС2.

Рассмотрим прямоугольную форму кривой изменения ИСС, замедление ТС, в этом случае будет определяться по следующей формуле:

$$a = P, \text{ при } 0 \leq t \leq T \quad (3.18)$$

Интегрируя ускорение (замедление) по времени, получаем скорость ТС, по формуле:

$$V = P \cdot t + C_1, \quad (3.19)$$

где  $C_1$  – постоянная интегрирования, величина которой может быть определена при  $t = 0$ , т.е. когда она будет равна начальной скорости в момент контакта  $V_0$ , т.е.:

$$V = P \cdot t + V_0, \quad (3.20)$$

При этом, в расчетный момент времени  $t$  равный полному времени стадии контактно-следового взаимодействия  $T$ , скорость ТС будет равна сумме его начальной скорости и ПВС ( $\Delta V$ ), откуда максимальная величина замедления может быть определена как:

$$P = \frac{\Delta V}{T}, \quad (3.21)$$

Интегрируя (3.21) получаем объем внедрения ТС:

$$S = \frac{1}{2} P \cdot t^2 + V_0 \cdot t + C_2, \quad (3.22)$$

где  $C_2$  – постоянная интегрирования, величина которой может быть определена при  $t = 0$ , т.е. когда  $S$  также будет равно 0, откуда следует что  $C_2$  будет также равно 0.

Следовательно:

$$S = \frac{1}{2} P \cdot t^2 + V_0 \cdot t, \quad (3.23)$$

Откуда полный период времени стадии контактно-следового взаимодействия определяется также как и (3.8),(3.17):

$$T = \frac{S_{1\max} + S_{2\max}}{\text{abs}\left[\frac{1}{2}(\Delta V_1 - \Delta V_2) + (V_{01} - V_{02})\right]}, \quad (3.24)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют ТС1 и ТС2.

Аналогично, рассмотрим симметричную треугольную форму кривой изменения ИСС, расчет которой можно разделить на две части (при  $t \leq 0,5T$  и

при  $t \geq 0,5T$ ), замедление ТС, в этом случае будет определяться по следующей формуле:

$$\begin{bmatrix} a = \frac{2P}{T}t & 0 \leq t \leq \frac{1}{2}T \\ a = -\frac{2P}{T}t & \frac{1}{2}T < t \leq T \end{bmatrix}, \quad (3.25)$$

Интегрируя ускорение (замедление) по времени при  $t \leq 0,5T$ , получаем скорость ТС, по формуле:

$$V = \frac{P}{T} \cdot t^2 + C_1, \quad (3.26)$$

где  $C_1$  – постоянная интегрирования, величина которой может быть определена при  $t = 0$ , т.е. когда она будет равна начальной скорости в момент контакта  $V_0$ , т.е.:

$$V = \frac{P}{T} \cdot t^2 + V_0, \quad (3.27)$$

Так как избранная треугольная форма импульса замедления является симметричной посередине, во время  $t = 0,5T$ , изменение в скорости будет составлять одну половину общего изменения в скорости, т.е.:

$$V = \text{abs}\left(V_0 - \frac{1}{2}\Delta V\right), \quad (3.28)$$

При этом, максимальная величина замедления может быть определена как:

$$P = \frac{2\Delta V}{T}, \quad (3.29)$$

Интегрируя (27) получаем объем внедрения ТС:

$$S = \frac{P}{3T} \cdot t^3 + V_0 \cdot t + C_2, \quad (3.30)$$

где  $C_2$  – постоянная интегрирования, величина которой может быть определена при  $t = 0$ , т.е. когда  $S$  также будет равно 0, откуда следует что  $C_2$  будет также равно 0.

Следовательно:

$$S = \frac{P}{3T} \cdot t^3 + V_0 \cdot t \quad \text{для} \quad t \leq \frac{1}{2}T, \quad (3.31)$$

Так как избранная треугольная форма импульса замедления является симметричной посередине, далее определим расчетные зависимости для  $t \geq 0,5T$ . С учетом чего, получаем скорость ТС, по формуле:

$$V = \frac{-P}{T} \cdot t^2 + 2Pt + C_1, \quad (3.32)$$

Так как избранная треугольная форма импульса замедления является симметричной посередине, во время  $t = 0,5T$ , можно считать:

$$V = \frac{P \cdot T}{4} + V_0, \quad (3.33)$$

Подставляя (3.32) в (3.33) получаем:

$$C_1 = V_0 - \frac{1}{2}P \cdot T, \quad (3.34)$$

Соответственно, подставляя полученное (3.34) в (3.33), получаем:

$$V = \frac{-P}{T} \cdot t^2 + 2Pt + V_0 - \frac{1}{2}P \cdot T \quad \text{для} \quad t \geq \frac{1}{2}T, \quad (3.35)$$

Интегрируя (3.35) получаем объем внедрения ТС:

$$S = \frac{-P}{3T} \cdot t^3 + P \cdot t^2 + V_0 t - \frac{1}{2}P \cdot T \cdot t + C_2, \quad (3.36)$$

где  $C_2$  – постоянная интегрирования, величина которой может быть определена при  $t = 0,5T$ , т.е.:

$$C_2 = \frac{P \cdot T^2}{12}, \quad (3.37)$$

Следовательно:

$$S = \frac{-P}{3T} \cdot t^3 + P \cdot t^2 + V_0 t - \frac{1}{2}P \cdot T \cdot t + \frac{P \cdot T^2}{12} \quad \text{для} \quad t \geq \frac{1}{2}T, \quad (3.38)$$

Откуда полный период времени стадии контактно-следового взаимодействия определяется как:

$$T = \frac{S_{1\max} + S_{2\max}}{\text{abs} \left[ \frac{2}{3} (\Delta V_1 - \Delta V_2) + (V_{01} - V_{02}) \right]}, \quad (3.39)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют ТС1 и ТС2.

Данные описательные модели и подход к решению может быть использован и для других, не специфических видов кривой ИСС, например при скользящих попутных контактах, преходящих в объемное внедрение и т.п.

Анализируя модели с данными АЗУ, полученными в ходе краш-тестов, проведенных NHTSA, были получены следующие иллюстрации сходимости моделей с фактическими данными, представленные на рисунках 3.3-3.5:

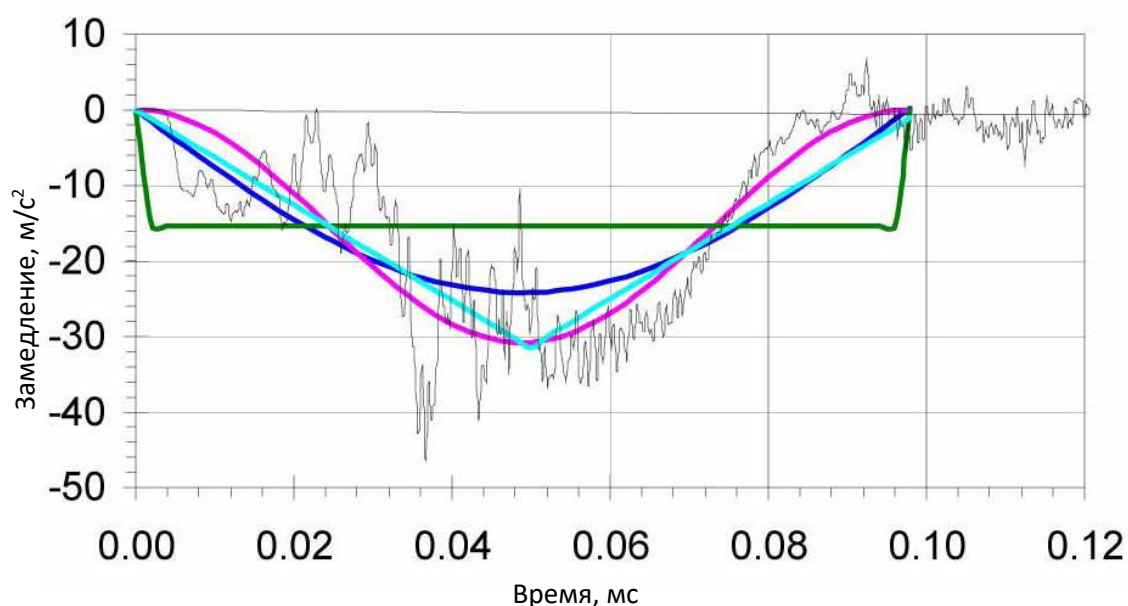


Рисунок 3.3 – Модели форм кривых ИСС как описательная часть фактической кривой, зависимость замедления от времени контакта

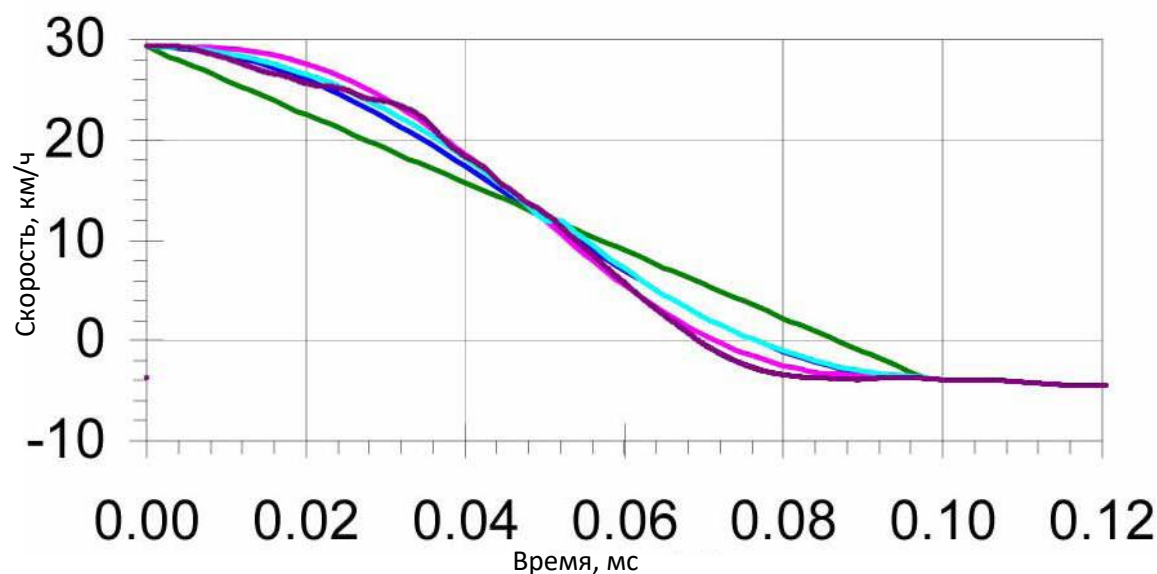


Рисунок 3.4 – Модели форм кривых ИСС как описательная часть фактической кривой, зависимость скорости от времени контакта

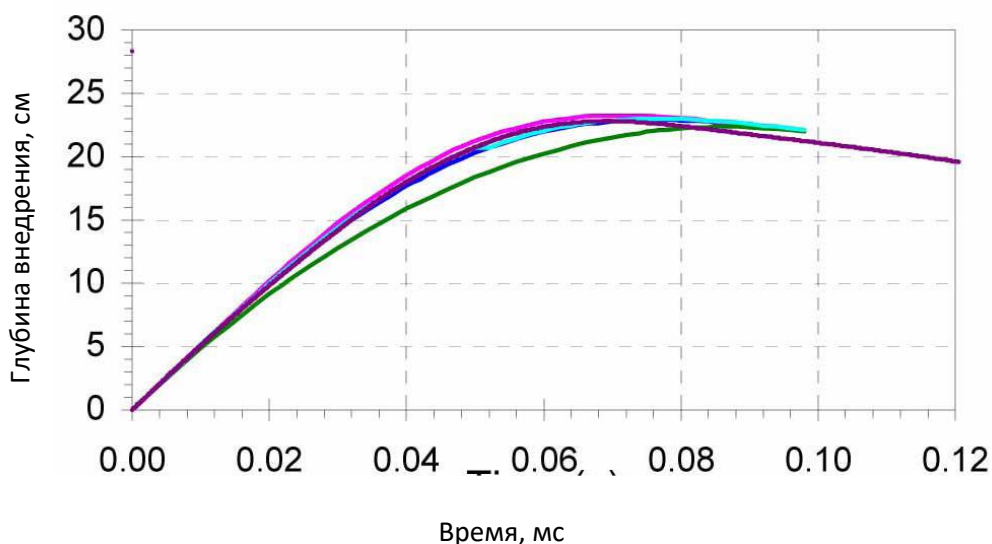


Рисунок 3.5 – Модели форм кривых ИСС как описательная часть фактической кривой, зависимость объемного внедрения от времени контакта

Таким образом, представленные обобщающие модели, могут быть использованы как модели перерасчета фактических данных при экспериментальных исследованиях, а также внедрены в практику ДТЭ при реализации МОР.

Опишем кратко основные базовые решения для применения ИСС в реконструкции механизма ДТП по наездам ТС на пешехода. Методика расчета импульса сил столкновения (ИСС), может быть адаптирована для анализа наездов транспортных средств (ТС) на пешеходов. Для этого необходимо учитывать специфику взаимодействия ТС с пешеходом, которая отличается от столкновений между ТС.

Ключевые аспекты применения ИСС к наездам на пешеходов по форме кривой ИСС: для наездов на пешеходов характерны асимметричные или сложные формы кривых замедления, так как взаимодействие включает фазы удара, отбрасывания и возможных: скольжения / волочения с оборачиванием тела, вторичных ударов и т.д. Здесь могут применяться комбинации синусоидальной и треугольной форм, либо новые модели, учитывающие деформации кузова ТС и динамику пешехода.

Соответственно ключевые аспекты применения ИСС к наездам на пешеходов по параметрам расчета: пиковое замедление зависит от скорости

ТС, массы пешехода и жесткости зоны контакта (например, капота или лобового стекла), время контакта ( $T$ ) может быть меньше, чем при столкновениях ТС, из-за быстрого отбрасывания пешехода.

Формулы (3.2)-(3.7) для квадратично-синусоидальной формы или (3.25)-(3.39) для треугольной формы могут быть адаптированы с учетом асимметрии. Начальная скорость пешехода и его траектория после удара требуют дополнительных корректировок в уравнениях.

Представленные модели ИСС, дополненные учетом специфики наездов на пешеходов, позволяют анализировать динамику таких ДТП, оценивать тяжесть последствий и оптимизировать системы пассивной безопасности ТС. Для точности рекомендуется разработка специализированных форм кривых и их экспериментальная проверка.

### **3.3. Моделирование отбрасывания тела пешехода и критика статистических моделей. Анализ ТВ в ДТЭ**

Проведенный анализ сложившейся практики исследования ДТП, связанных с реконструкций фронтальных наездов на пешеходов и в частности анализ недостатков методов определения наличия или отсутствия у водителя технической возможности предотвратить ДТП и наличия или отсутствия причинной связи между ДТП и превышением водителем максимально допустимой по ПДД скорости движения ТС позволил установить, что при расчетах не учитываются тип кузова автомобиля, рост и масса пешехода, форма капотной линии и высота верхней полки переднего бампера а/м, положение тела пешехода в момент начала контакта, вид одежды пешехода, влияющих на процесс перемещений тела в ходе стадий контакт-разлет в хронологии механизма ДТП.

В основе анализа механизма наезда на пешехода, лежит форма реконструкции, направленная на воссоздание механизма дорожно-транспортного происшествия в системе координат «путь ( $S$ ) – время ( $t$ )»,

устанавливающая какие возможности имел водитель транспортного средства для предотвращения ДТП. В связи с этим, всегда необходимо восстановить взаимное расположение транспортного средства и пешехода в момент возникновения опасности, при известных их скоростях движения (законах изменения скорости).

Решение научной проблемы моделирования отбрасывания пешехода при фронтальном наезде на него легковым автомобилем, которые встречаются в практике и обширно представлены преимущественно в зарубежной литературе, базируются на следующих трех основных методах: теоретическое моделирование процесса; использование данных экспериментов на манекенах; использование обработанных статистических данных действительных происшествий.

При первом методе в мировой практике наиболее широко принята модель, в которой учитывается, что непосредственно после удара тело пешехода некоторое время перемещается совместно с автомобилем, после чего отбрасывается от него, преодолевая некоторое расстояние в условно свободном полете, после чего падает на опорную поверхность и перемещается (качение и волочение) по ней вплоть до занятия конечного после ДТП положения (как правило, фиксируемого в материалах дела как место нахождения трупа при осмотре и/или местоположение пятна крови, если пострадавший эвакуирован скорой помощью к моменту осмотра места ДТП).

Рассмотрим частный (однако, по условиям происшествия наиболее распространенный) случай фронтального наезда легкового ТС на пешехода, при этом примем следующие допущения: контактно-следовое взаимодействие пешехода и автомобиля является симметричным, т.е. происходит в одной плоскости; начальная скорость пешехода в момент контакта равна нулю; после контакта пешеход считается материальной точкой; поверхность, где имеет место контакт, плоская (т.е. без поперечного уклона проезжей части), обеспечивающая постоянный коэффициент

сцепления колес а/м с покрытием; коэффициент сцепления тела пешехода с покрытием проезжей части при волочении постоянный; сопротивлением воздуха при перемещении тела пешехода в полете можно пренебречь.

На преодоление расстояния полных перемещений  $S_{\Sigma}$  (являющегося суммой расстояния совместного перемещения –  $S_0$ , расстояния полета –  $S_1$  и расстояния скольжения/волочения –  $S_2$ ) требуется время  $t_p$ , представляющее собой сумму времен движения на каждой фазе вышеуказанных перемещений, соответственно:  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  (см. рисунок 3.6).

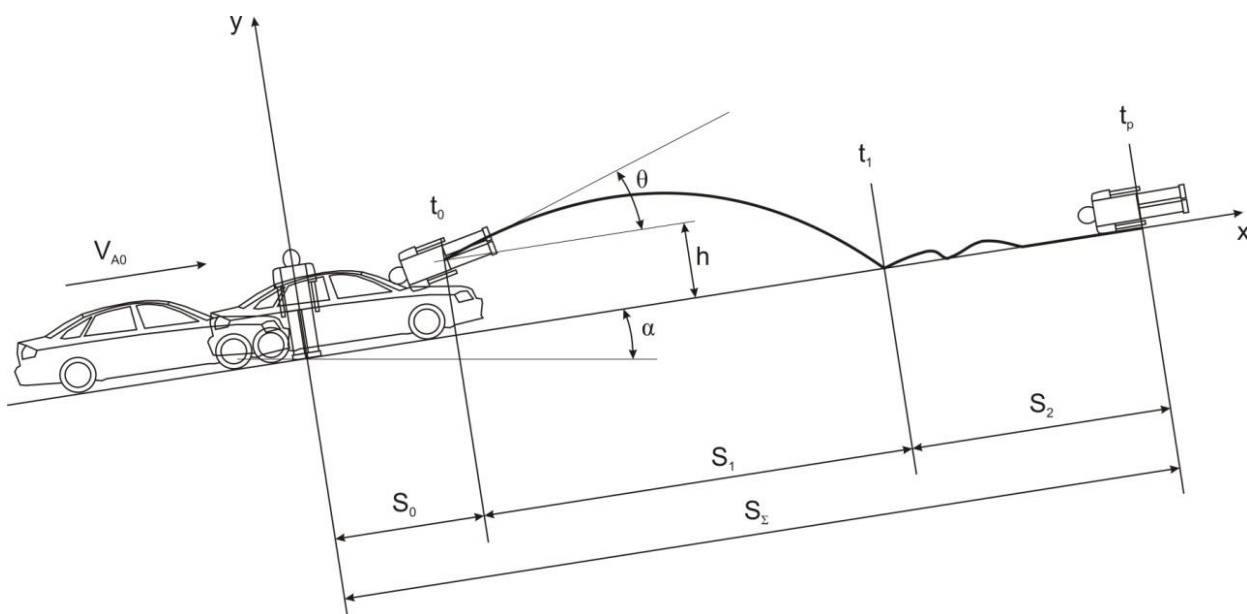


Рисунок 3.6 – Расчетная схема модели отброса тела пешехода при фронтальном наезде.

Таблица 3.1 – Уравнения кривых темпов движения у мужчин по результатам исследований

| №  | Группа, лет | Уравнение                                                   | Коэффициент детерминации |
|----|-------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 1  | 7–8         | $y = -0,0004x^4 + 0,0164x^3 - 0,1955x^2 + 1,1402x + 1,9300$ | 0,980                    |
| 2  | 8–10        | $y = -0,0003x^4 + 0,0115x^3 - 0,1363x^2 + 0,8891x + 2,3454$ | 0,981                    |
| 3  | 10–12       | $y = -0,0002x^4 + 0,0101x^3 - 0,1282x^2 + 0,8585x + 2,6255$ | 0,984                    |
| 4  | 12–15       | $y = -0,0004x^4 + 0,0177x^3 - 0,2259x^2 + 1,2896x + 2,5560$ | 0,982                    |
| 5  | 15–20       | $y = -0,0003x^4 + 0,0163x^3 - 0,2041x^2 + 1,2526x + 2,2216$ | 0,980                    |
| 6  | 20–30       | $y = -0,0002x^4 + 0,0108x^3 - 0,132x^2 + 0,8986x + 2,9177$  | 0,981                    |
| 7  | 30–40       | $y = 0,0003x^4 - 0,0058x^3 + 0,0359x^2 + 0,3552x + 3,1892$  | 0,975                    |
| 8  | 40–50       | $y = 0,0005x^4 - 0,0133x^3 + 0,1181x^2 + 0,0401x + 3,1875$  | 0,964                    |
| 9  | 50–60       | $y = 0,0006x^4 - 0,0177x^3 + 0,1709x^2 - 0,2056x + 3,1332$  | 0,959                    |
| 10 | 60–70       | $y = 0,0004x^4 - 0,0118x^3 + 0,1201x^2 - 0,1433x + 2,7674$  | 0,983                    |
| 11 | > 70        | $y = 0,0005x^4 - 0,0153x^3 + 0,1658x^2 - 0,4132x + 2,5886$  | 0,971                    |

Ранее в [64,67], результаты многолетних исследований отечественных и зарубежных ученых были обобщены в уравнениях регрессии, в установленных пределах математически моделирующие скорость движения пешеходов для отдельных возрастных групп, данные которых представлены в таблицах 3.1,3.2.

Таблица 3.2 – Уравнения кривых темпов движения у женщин по результатам исследований

| №  | Группа, лет | Уравнение                                                    | Коэффициент детерминации |
|----|-------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 1  | 7–8         | $y = -0,0004x^4 + 0,0161x^3 - 0,1866x^2 + 1,0648x + 1,8026$  | 0,980                    |
| 2  | 8–10        | $y = -0,0003x^4 + 0,0138x^3 - 0,1675x^2 + 1,0208x + 1,9962$  | 0,984                    |
| 3  | 10–12       | $y = -0,00008x^4 + 0,0062x^3 - 0,0843x^2 + 0,6889x + 2,5310$ | 0,985                    |
| 4  | 12–15       | $y = -0,0003x^4 + 0,0159x^3 - 0,1976x^2 + 1,1284x + 2,4975$  | 0,983                    |
| 5  | 15–20       | $y = -0,0005x^4 + 0,0210x^3 - 0,2557x^2 + 1,4322x + 1,8583$  | 0,974                    |
| 6  | 20–30       | $y = -0,0004x^4 + 0,0185x^3 - 0,2164x^2 + 1,1895x + 2,6086$  | 0,979                    |
| 7  | 30–40       | $y = 0,0001x^4 - 0,0008x^3 - 0,0166x^2 + 0,5266x + 2,8594$   | 0,970                    |
| 8  | 40–50       | $y = 0,0004x^4 - 0,0120x^3 + 0,1176x^2 - 0,0363x + 3,1570$   | 0,965                    |
| 9  | 50–60       | $y = 0,0003x^4 - 0,0078x^3 + 0,0565x^2 + 0,2468x + 2,6104$   | 0,977                    |
| 10 | 60–70       | $y = 0,0003x^4 - 0,0087x^3 + 0,0845x^2 - 0,0047x + 2,6057$   | 0,982                    |
| 11 | > 70        | $y = 0,0020x^3 - 0,0435x^2 + 0,5018x + 1,5501$               | 0,965                    |

Результаты наиболее известных в Европе экспериментов с целью изучения отбрасывания тела, в которых использовались манекены, приведены в работе Крамера (Франция), а результаты испытаний Эльшольца (Германия) были описаны Лёхлем (Бельгия). На рис.3.7–3.12 представлены результаты проведенных ими экспериментов.

Статические исследования зависимости между величиной отбрасывания пешехода и скоростью удара в достаточно большом объеме проводились Техническим Университетом Западного Берлина. Результаты этих исследований опубликованы Штурцем, Аппелем и Готценом, на них также ссылаются Р. Загорский (Польша) и В. Кончиковский (Польша). Основная часть полученных зависимостей данными европейскими исследователями представлена в таблице 3.3.

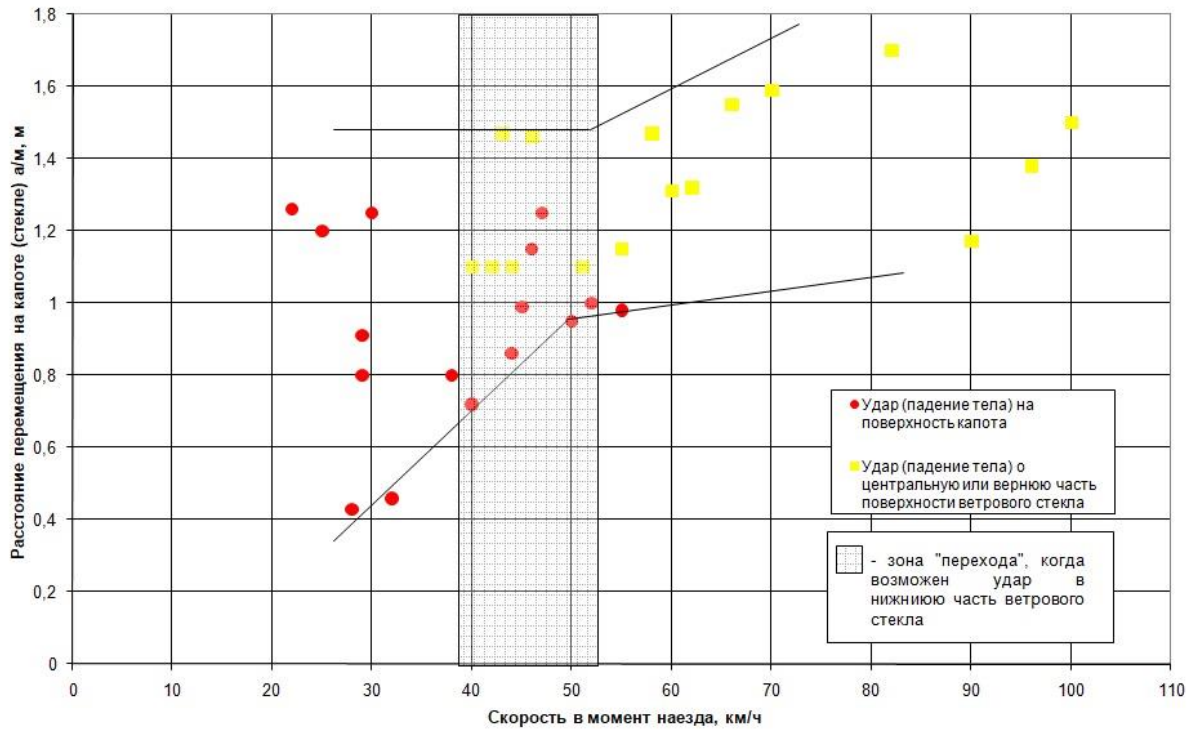


Рисунок 3.7 – Разброс значений расстояния перемещения тела на капоте (ветровом стекле)  $S_W$  от скорости в момент наезда, результаты европейских исследований (рост манекена 160–170 см).

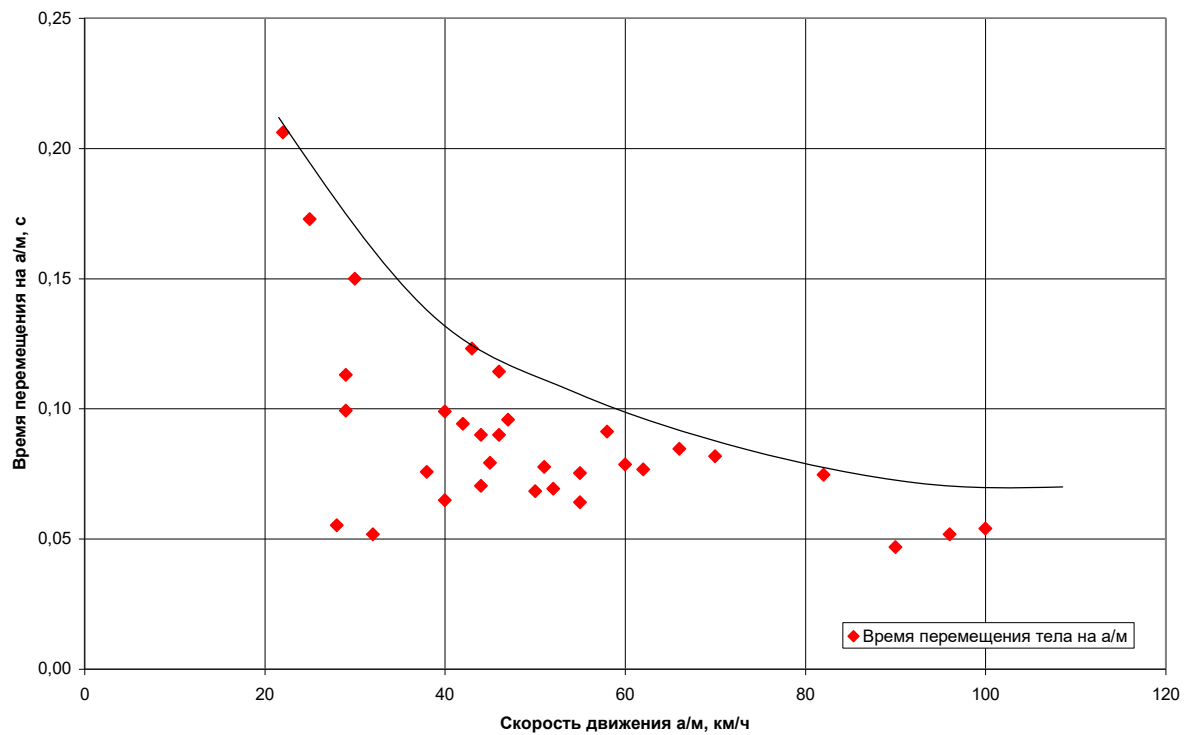


Рисунок 3.8 – Разброс значений времени перемещения тела на капоте (ветровом стекле) от скорости а/м в момент наезда, результаты европейских исследований (рост манекена 160–170 см).

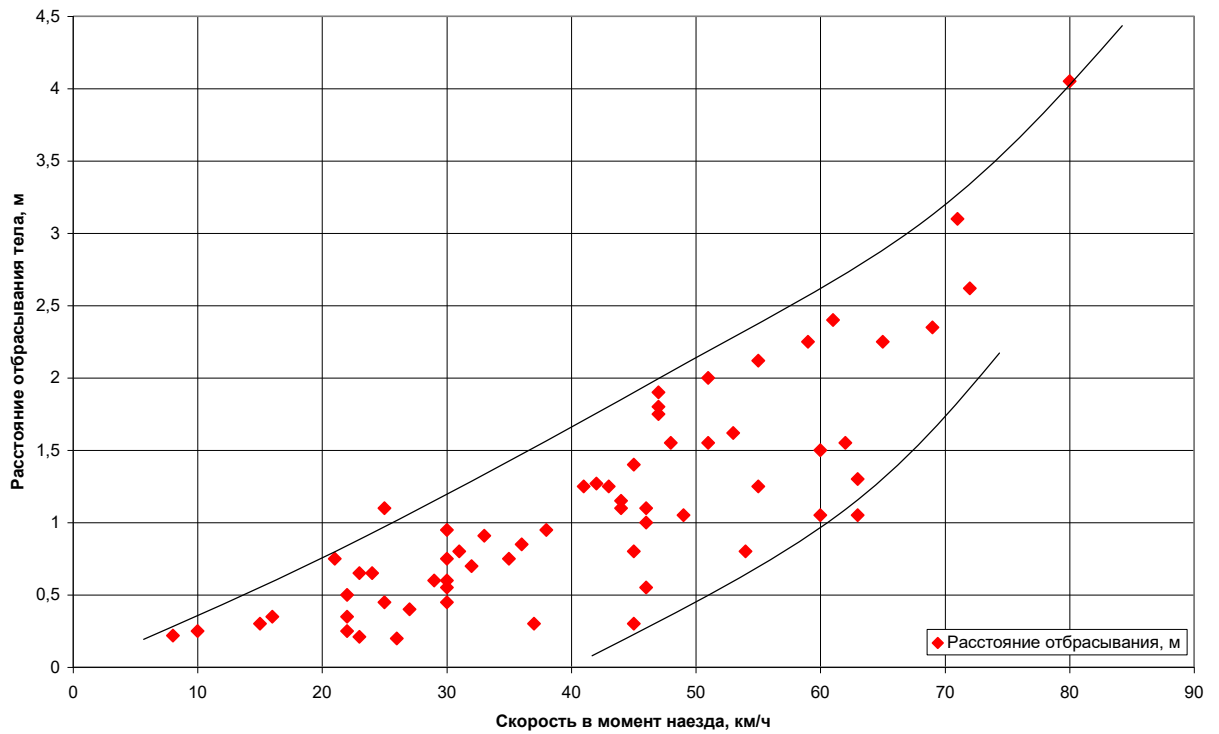


Рисунок 3.9 – Разброс значений расстояния отброса тела (перемещение в «свободном полете»)  $S_R$  от скорости а/м в момент наезда, результаты европейских исследований (рост манекена 150–170 см).

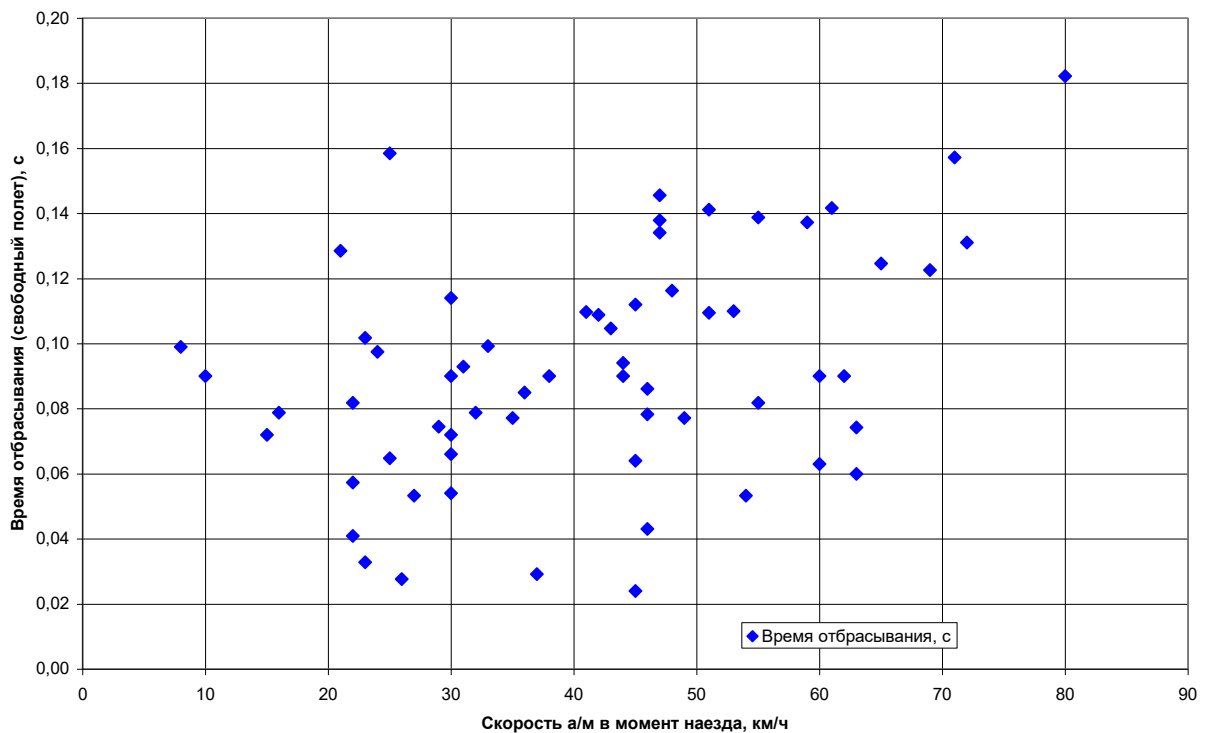


Рисунок 3.10 – Разброс значений времени отбрасывания тела (перемещения в «свободном полете») от скорости а/м в момент наезда, результаты европейских исследований (рост манекена 150–170 см).

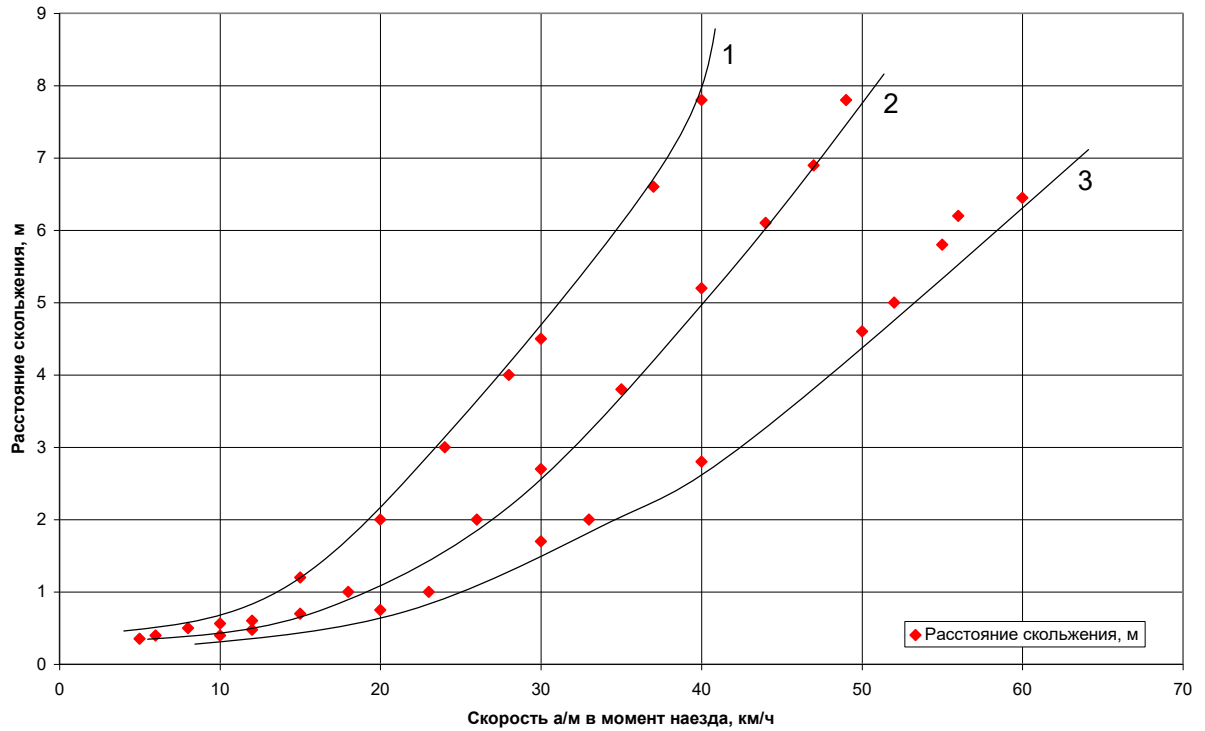


Рисунок 3.11 – Изменение значений расстояния скольжения тела (1– мокрый снег, 2 – мокрый асфальт, 3 – сухой асфальт)  $S_p$  от скорости  $a/m$  в момент наезда, результаты европейских исследований (рост манекена 150–170 см).

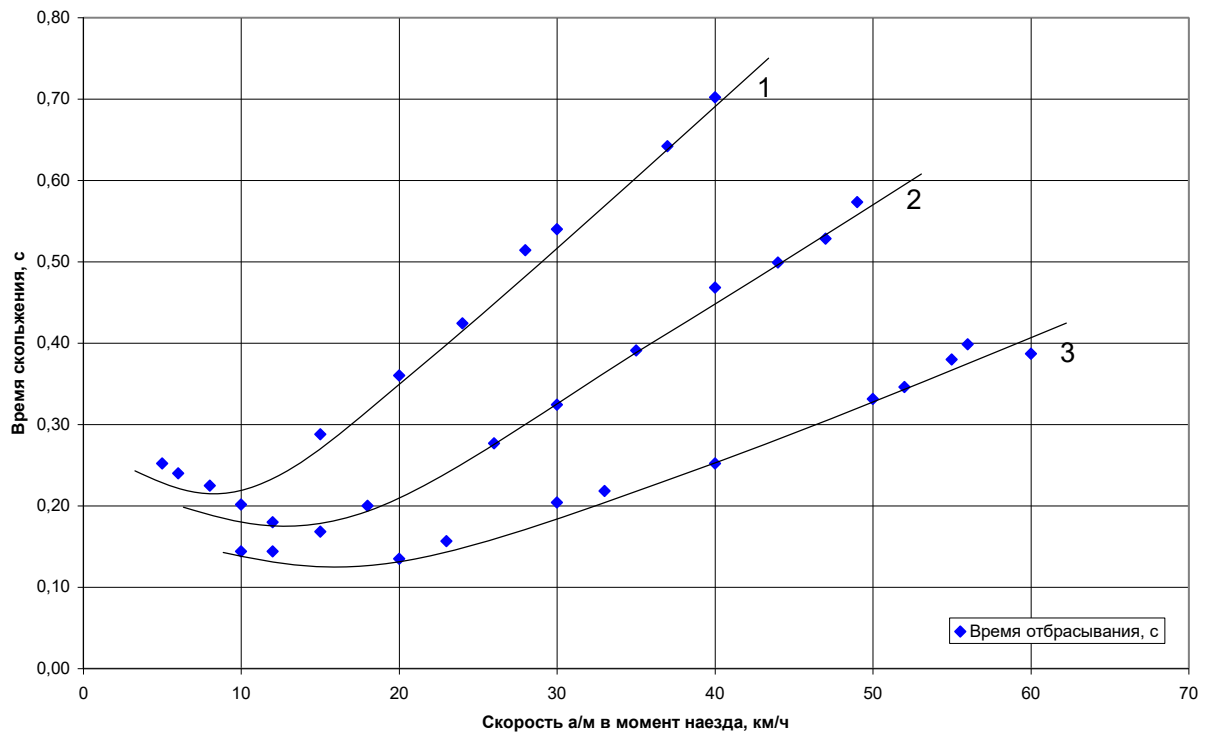


Рисунок 3.12 – Изменение значений времени скольжения тела (1– мокрый снег, 2 – мокрый асфальт, 3 – сухой асфальт) от скорости  $a/m$  в момент наезда, результаты европейских исследований (рост манекена 150–170 см).

Проведенный Штурцем, Аппелем и Готценом анализ данных показывает, что на расстояние отбрасывания пешехода заметно влияет форма передней части кузова ТС, а также масса пешехода и высота расположения над дорогой его центра масс.

Формулы, выведенные на основе статистики, в применении отдельных случаев, могут создать только приблизительную картину действительности.

Таблица 3.3 – Примеры статистических зависимостей, опубликованных рядом европейских авторов

| № | Формулы для определения величины отбрасывания пешехода                                              | Формулы для определения скорости движения автомобиля в момент наезда на пешехода |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | По Крамеру<br>$S = 0.068V_x^2 + 0.28V_x - 0.348$ (испытание на манекене)                            | $V_x = \frac{0.28 \pm \sqrt{0.0784a^2 - 2a(1-0.136a)(L+0.343)}}{1-0.136a}$       |
| 2 | По Элшольцу<br>$S = AV_x^2$<br>(без различия рода кузова и возраста пешехода)                       | $V_x = \sqrt{\frac{2aL}{2Aa-1}}$                                                 |
| 3 | По Штурцу-Аппелю-Готцену<br>$S = 0.027V_x^2 + 0.55V_x + 1.0$<br>(для кузова хэтчбэк)                | $V_x = \frac{0.55a \pm \sqrt{0.3025a^2 - 2a(1-0.054a)(L-1)}}{1-0.054a}$          |
| 4 | По Штурцу-Аппелю-Готцену<br>$S = 0.043V_x^2 + 0.45V_x + 1.1$ (касается кузова универсал и взрослых) | $V_x = \frac{0.45a \pm \sqrt{0.2025a^2 - 2a(1-0.086a)(L-1.1)}}{1-0.086a}$        |
| 5 | По Штурцу-Аппелю-Готцену<br>$S = 0.042V_x^2 + 0.45V_x$<br>(для вагонного кузова и взрослых)         | $V_x = \frac{0.45a \pm \sqrt{0.2025a^2 - 2aL(1-0.0084a)}}{1-0.084a}$             |
| 6 | По Штурцу-Аппелю-Готцену<br>$S = 0.0425V_x^2 + 0.35V_x$<br>(для вагонного кузова и детей)           | $V_x = \frac{0.35a \pm \sqrt{0.1225a^2 - 2aL(1-0.085a)}}{1-0.085a}$              |

При этом североамериканские (США и Канада) исследователи используют более широкий диапазон формул, основанных как на

статистических методах, так и на общефизических законах, однако сравнение и анализ данных расчета по наиболее часто цитируемым в западной литературе зависимостям с фактическими данными краш-тестов по наездам на манекен, анализ проведенный авторским коллективом кафедры НТТМ показывает достаточно широкий разброс расчетных значений и в целом достаточно высокий процент ошибки – см. таблицы 3.4, 3.5 и 3.6.

Таблица 3.4 – Результаты полученные в ходе проведения тестов

| № теста | масса а/м, кг | высота верхней полки переднего бампера, см | высота передней кромки капота, см | торможение в момент наезда | фактическая скорость по датчикам, миль/ч | фактическая скорость по датчикам, км/ч | фактическое расстояние полных перемещений тела манекена, м |
|---------|---------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| A1      | 1542          | 44,5                                       | 76,2                              | да                         | 20                                       | 32,2                                   | 7,9                                                        |
| A2      | 1542          | 44,5                                       | 76,2                              | да                         | 10                                       | 16,1                                   | 2,4                                                        |
| A3      | 1542          | 44,5                                       | 76,2                              | да                         | 30                                       | 48,3                                   | 13,4                                                       |
| A4      | 1542          | 44,5                                       | 76,2                              | да                         | 30                                       | 48,3                                   | 17,4                                                       |
| A5      | 1542          | 44,5                                       | 76,2                              | нет                        | 40                                       | 64,4                                   | 61,9                                                       |
| A6      | 1542          | 44,5                                       | 76,2                              | да                         | 30                                       | 48,3                                   | 24,7                                                       |
| A7      | 1542          | 44,5                                       | 76,2                              | да                         | 30                                       | 48,3                                   | 14,3                                                       |
| A8      | 1542          | 44,5                                       | 76,2                              | да                         | 30                                       | 48,3                                   | 20,7                                                       |
| A9      | 1542          | 44,5                                       | 76,2                              | нет                        | 30                                       | 48,3                                   | 38,7                                                       |
| A10     | 1542          | 48,2                                       | 61                                | да                         | 30                                       | 48,3                                   | 10,1                                                       |
| A11     | 2268          | 63,5                                       | 132                               | да                         | 30                                       | 48,3                                   | 21,3                                                       |
| A12     | 1542          | 44,5                                       | 76,2                              | да                         | 30                                       | 48,3                                   | 13,1                                                       |
| B1      | 1224          | 50,8                                       | 68,5                              | да                         | 21                                       | 33,8                                   | 22                                                         |

| №<br>теста | масса а/м, кг | высота верхней полки переднего<br>бампера, см | высота передней кромки капота,<br>см | торможение в момент наезда | фактическая скорость по<br>датчикам, миль/ч | фактическая скорость по<br>датчикам, км/ч | фактическое расстояние полных<br>перемещений тела манекена, м |
|------------|---------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| B2         | 1814          | 53,3                                          | 76,2                                 | да                         | 31                                          | 49,9                                      | 21,9                                                          |
| B3         | 1814          | 53,3                                          | 76,2                                 | да                         | 49                                          | 78,9                                      | 43,6                                                          |
| B4         | 2177          | 55,9                                          | 90,2                                 | да                         | 22                                          | 35,4                                      | 11,3                                                          |
| B5         | 2177          | 55,9                                          | 90,2                                 | да                         | 24                                          | 38,6                                      | 13,7                                                          |
| B6         | 998           | 48,3                                          | 71,1                                 | да                         | 25                                          | 40,2                                      | 13,7                                                          |
| B7         | 1375          | 63,5                                          | 132,1                                | да                         | 26                                          | 41,8                                      | 13,6                                                          |

Кроме того, как европейский так и североамериканские зависимости относятся в большинстве случаев к столкновениям ТС со взрослыми людьми. Можно считать, что они правильны только тогда, когда удар наносится по всей ширине тела (исключаются «угловые» удары, при которых пешеход контактирует с автомобилем только частью тела).

Таким образом, из таблиц 3.5 и 3.6 видно, что для идентичных случаев отдельные формулы дают различные результаты. Применение их (как, впрочем, любых формул приближенного характера) требует осторожности и тщательной проверки результатов с помощью других доказательств. Точнее говоря, проблема не настолько исследована, чтобы результат, полученный по какой-либо формуле, мог считаться достаточно надежным.

Кроме того, как следует из результатов многолетних исследований, проводившихся коллективом кафедры НТТМ и ИБДД СПбГАСУ [64-69] уже сам факт того, что для одних и тех же вариантов ситуации в отечественной и

зарубежной литературе рекомендуют разные формулы, требует осторожности и критического подхода при их практическом применении.

Таблица 3.5 – Результаты расчетов скорости в момент наезда по расстоянию полных перемещений, по данным различных североамериканских авторов

| №<br>теста | Результаты расчетов скорости в момент наезда по расстоянию полных перемещений, по данным различных североамериканских авторов, км/ч                                        |          |        |                                       |      |         |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------|---------------------------------------|------|---------|
|            | Эубанкс                                                                                                                                                                    | Щербачев | Колинз | Сирл с учетом<br>угла от 0° до 30°    | Вуд  | Лимперт |
| A1         | 29,9                                                                                                                                                                       | 26,7     | 27     | 30,4                                  | 33,5 | 27,7    |
|            | 34,4                                                                                                                                                                       | 33       |        | 36,4                                  |      | 31,9    |
| A2         | 13,8                                                                                                                                                                       | 14,2     | 9,2    | 16,9                                  | 13,5 | 8,9     |
|            | 15,3                                                                                                                                                                       | 16,4     |        | 20,3                                  |      | 13,5    |
| A3         | 41,5                                                                                                                                                                       | 35,4     | 39,3   | 39,6                                  | 45,2 | 42,6    |
|            | 48,4                                                                                                                                                                       | 44,3     |        | 47,5                                  |      | 45,1    |
| A4         | 47,6                                                                                                                                                                       | 40,4     | 46,5   | 45,2                                  | 52   | 52      |
|            | 55,7                                                                                                                                                                       | 51       |        | 54                                    |      | 52,9    |
| A5         | 49,6<br>рассчитано по формуле Галли                                                                                                                                        |          |        | 62,3<br>рассчитано по формуле Бразели |      |         |
| A6         | 58,3                                                                                                                                                                       | 48,6     | 58,1   | 55,3                                  | 62,9 | 65,8    |
|            | 68,2                                                                                                                                                                       | 62       |        | 64,5                                  |      | 67,6    |
| A7         | 42,3                                                                                                                                                                       | 36,5     | 41     | 41                                    | 46,8 | 44,9    |
|            | 49,2                                                                                                                                                                       | 45,9     |        | 49,1                                  |      | 47      |
| A8         | 53,1                                                                                                                                                                       | 44,2     | 52     | 49,4                                  | 57,3 | 59,1    |
|            | 62,1                                                                                                                                                                       | 56,2     |        | 58,9                                  |      | 59,4    |
| A9         | 35,2<br>расчитано по формуле Галли                                                                                                                                         |          |        | 50,4<br>расчитано по формуле Бразели  |      |         |
| A10        | 33,9                                                                                                                                                                       | 30,4     | 32,2   | 34,3                                  | 37,9 | 33,8    |
|            | 39,1                                                                                                                                                                       | 37,8     |        | 41                                    |      | 37,5    |
| A11        | тест проведен с условием вертикального отброса (микроавтобус) и<br>рассчитан по формулам Northwestern university и формуле Бэнка и<br>Эубанкса: 43,0 и 48,1 соответственно |          |        |                                       |      |         |
| A12        | 38,5                                                                                                                                                                       | 34,9     | 38,6   | 39,3                                  | 44,6 | 41,8    |
|            | 44,2                                                                                                                                                                       | 43,8     |        | 47                                    |      | 44,4    |
| B1         | 36,4                                                                                                                                                                       | 31,9     | 34,8   | 36                                    | 40,7 | 36,5    |
|            | 42                                                                                                                                                                         | 39,8     |        | 43,1                                  |      | 39,8    |

| №<br>теста | Результаты расчетов скорости в момент наезда по расстоянию полных перемещений, по данным различных североамериканских авторов, км/ч |          |        |                                 |      |         |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------|---------------------------------|------|---------|
|            | Эубанкс                                                                                                                             | Щербачев | Колинз | Сирл с учетом угла от 0° до 30° | Вуд  | Лимперт |
| B2         | 49,1                                                                                                                                | 45,1     | 53,9   | 49,6                            | 59,2 | 60,4    |
|            | 65,5                                                                                                                                | 57,3     |        | 60                              |      | 61      |
| B3         | 74,8                                                                                                                                | 65       | 82     | 71,6                            | 84,5 | 91,7    |
|            | 79                                                                                                                                  | 83,7     |        | 85,8                            |      | 99,8    |
| B4         | 36                                                                                                                                  | 32,5     | 35,1   | 36,7                            | 41,5 | 37,6    |
|            | 44,3                                                                                                                                | 40,4     |        | 44,4                            |      | 40,7    |
| B5         | 39,8                                                                                                                                | 36       | 40     | 40,4                            | 46   | 43,7    |
|            | 48,8                                                                                                                                | 45,2     |        | 48,3                            |      | 46      |
| B6         | 35,9                                                                                                                                | 36,5     | 39,7   | 40,2                            | 45,9 | 43,6    |
|            | 47,5                                                                                                                                | 44,9     |        | 48,1                            |      | 45,9    |
| B7         | 40,7                                                                                                                                | 35,9     | 39,7   | 40,2                            | 45,9 | 43,4    |
|            | 47                                                                                                                                  | 44       |        | 48,1                            |      | 45,9    |

Таблица 3.6 – Результаты оценки величины ошибки при расчете по формулам различных североамериканских авторов

| №<br>теста | Эубанкс             |                                            | Щербачев            |                                                        | Колинз              |                                                              | Сирл,               |                                                        | Вуд                 |                                                              | Лимперт             |                                                        |
|------------|---------------------|--------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------|
|            | Величина ошибки в % | Расчетный интервал<br>включает фактическое | Величина ошибки в % | Расчетный интервал<br>включает фактическое<br>значение | Величина ошибки в % | Расчетное значение<br>относительно<br>фактического значения: | Величина ошибки в % | Расчетный интервал<br>включает фактическое<br>значение | Величина ошибки в % | Расчетное значение<br>относительно<br>фактического значения: | Величина ошибки в % | Расчетный интервал<br>включает фактическое<br>значение |
| A1         | 7<br>7              | Да                                         | 17<br>2             | Да                                                     | 16                  | заниже-<br>но                                                | 6<br>13             | Да                                                     | 4                   | близ-<br>ко                                                  | 14<br>1             | Нет                                                    |
| A2         | 14<br>5             | Нет                                        | 12<br>2             | Да                                                     | 43                  | заниже-<br>но                                                | 5<br>26             | Нет                                                    | 16                  | зани-<br>жено                                                | 45<br>16            | Нет                                                    |
| A3         | 14<br>0             | Да                                         | 27<br>8             | Нет                                                    | 19                  | заниже-<br>но                                                | 18<br>2             | Нет                                                    | 6                   | зани-<br>жено                                                | 12<br>7             | Нет                                                    |
| A4         | 1<br>15             | Да                                         | 16<br>6             | Да                                                     | 4                   | близко                                                       | 6<br>12             | Да                                                     | 8                   | завы-<br>шено                                                | 8<br>10             | Нет                                                    |
| A5         | 23                  |                                            |                     |                                                        |                     |                                                              | 3                   |                                                        |                     |                                                              |                     |                                                        |

| №<br>теста | Эубанкс             |                                                        | Щербачев            |                                                        | Колинз              |                                                              | Сирл,               |                                                        | Вуд                 |                                                              | Лимперт             |                                                        |
|------------|---------------------|--------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------|
|            | Величина ошибки в % | Расчетный интервал<br>включает фактическое<br>значение | Величина ошибки в % | Расчетный интервал<br>включает фактическое<br>значение | Величина ошибки в % | Расчетное значение<br>относительно<br>фактического значения: | Величина ошибки в % | Расчетный интервал<br>включает фактическое<br>значение | Величина ошибки в % | Расчетное значение<br>относительно<br>фактического значения: | Величина ошибки в % | Расчетный интервал<br>включает фактическое<br>значение |
| A6         | 21<br>41            | Нет                                                    | 1<br>28             | Нет                                                    | 20                  | завыше-<br>но                                                | 14<br>34            | Нет                                                    | 30                  | завы-<br>шено                                                | 36<br>40            | Нет                                                    |
| A7         | 12<br>2             | Да                                                     | 24<br>5             | Нет                                                    | 15                  | заниже-<br>но                                                | 15<br>2             | Да                                                     | 3                   | зани-<br>жено                                                | 7<br>3              | Нет                                                    |
| A8         | 10<br>29            | Нет                                                    | 8<br>16             | Да                                                     | 8                   | завыше-<br>но                                                | 2<br>22             | Нет                                                    | 19                  | завы-<br>шено                                                | 22<br>23            | Нет                                                    |
| A9         | 27                  |                                                        |                     |                                                        |                     |                                                              | 4                   |                                                        |                     |                                                              |                     |                                                        |
| A10        | 30<br>19            | Нет                                                    | 37<br>22            | Нет                                                    | 33                  | заниже-<br>но                                                | 29<br>15            | Нет                                                    | 22                  | зани-<br>жено                                                | 30<br>22            | Нет                                                    |
| A11        | 11                  |                                                        |                     |                                                        |                     |                                                              |                     |                                                        |                     |                                                              |                     |                                                        |
|            | 0                   |                                                        |                     |                                                        |                     |                                                              |                     |                                                        |                     |                                                              |                     |                                                        |
| A12        | 20<br>8             | Нет                                                    | 28<br>9             | Нет                                                    | 20                  | заниже-<br>но                                                | 19<br>3             | Нет                                                    | 8                   | зани-<br>жено                                                | 13<br>8             | Нет                                                    |
| B1         | 8<br>24             | Нет                                                    | 6<br>18             | Да                                                     | 3                   | близко                                                       | 7<br>28             | Нет                                                    | 20                  | завы-<br>шено                                                | 8<br>18             | Нет                                                    |
| B2         | 2<br>31             | Да                                                     | 10<br>15            | Да                                                     | 8                   | завыше-<br>но                                                | 1<br>20             | Да                                                     | 19                  | завы-<br>шено                                                | 21<br>22            | Нет                                                    |
| B3         | 5<br>0              | Да                                                     | 18<br>6             | Да                                                     | 4                   | близко                                                       | 9<br>9              | Да                                                     | 7                   | завы-<br>шено                                                | 16<br>26            | Нет                                                    |
| B4         | 2<br>25             | Нет                                                    | 8<br>14             | Да                                                     | 1                   | близко                                                       | 4<br>25             | Нет                                                    | 17                  | завы-<br>шено                                                | 6<br>15             | Нет                                                    |
| B5         | 3<br>26             | Нет                                                    | 7<br>17             | Да                                                     | 4                   | близко                                                       | 5<br>25             | Нет                                                    | 19                  | завы-<br>шено                                                | 13<br>19            | Нет                                                    |
| B6         | 11<br>18            | Да                                                     | 9<br>12             | Да                                                     | 1                   | близко                                                       | 0<br>20             | Да                                                     | 14                  | завы-<br>шено                                                | 8<br>14             | Нет                                                    |
| B7         | 3<br>12             | Да                                                     | 14<br>5             | Да                                                     | 5                   | близко                                                       | 4<br>15             | Да                                                     | 10                  | завы-<br>шено                                                | 4<br>10             | Нет                                                    |

Применение для анализа случайных величин не дает полной картины механизма ДТП, поэтому при таком анализе следует принимать во внимание соответственно разные возможные скорости движения пешеходов и проводить подсчеты для наибольшей и наименьшей величины,

установленной отдельно для каждой выделенной группы. Результаты полученных данных проверялись тестированием – методом преобразования Фишера, что показало высокую достоверность указанных пределов. Стоит отметить, что темпы движения пешеходов с замедлением или с ускорением «перекрывают» значения соседних интервалов темпов, что указывает на их «граничность», т.е. глубину смещения в ту или иную сторону.

При обработке полученной статистики было также установлено влияние на поведение водителя направления движения пешехода, при движении пешехода справа налево и слева направо относительно направления движения транспортного средства (рисунок 3.13 а, б). Откуда следует, что в большинстве опасных ДТС водитель применяет торможение без маневрирования, а при применении им маневра водитель обычно бессознательно стремится отвести транспортное средство от объекта опасности – пешехода. При чем в темное время суток, число водителей в данных ДТС применяющих маневр значительно сокращается, но все равно большая часть водителей стремится объехать пешехода со стороны его лица.

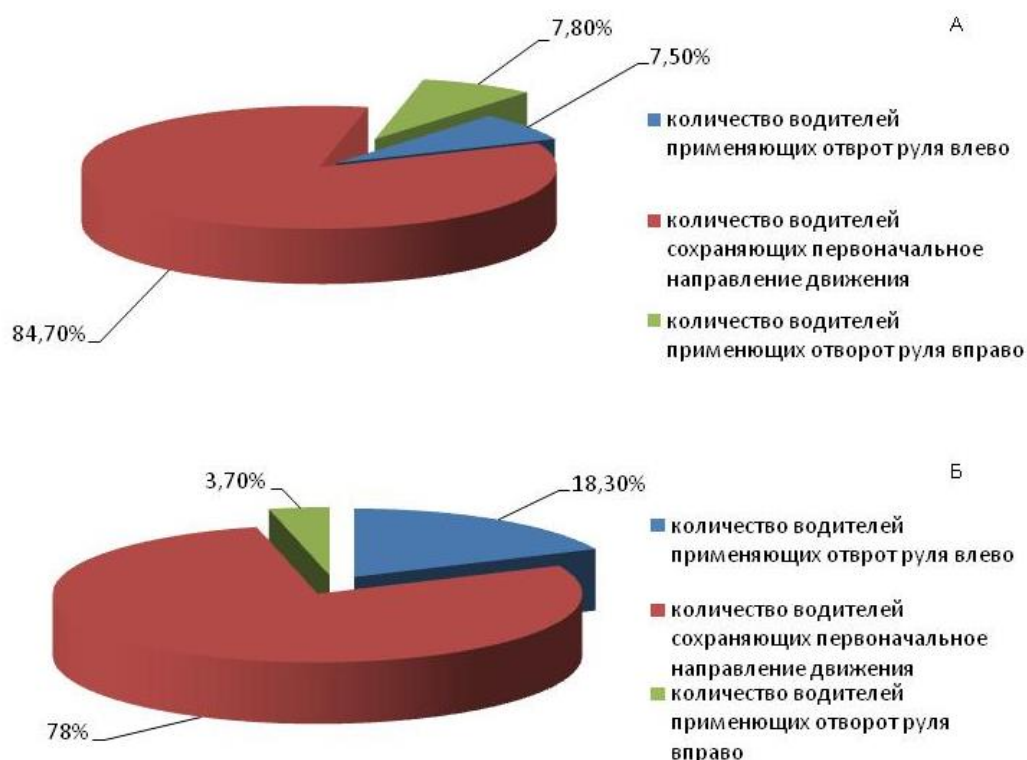


Рисунок 3.13 – Влияние на поведение водителя направления движения пешехода: а) слева направо, б) справа налево

В современной экспертной практике, установился общий стереотип определения возможности водителя транспортного средства избежать наезда на пешехода. Расчет основывается на следующем неравенстве:

$$S_o \leq S_y \quad (3.40)$$

где:  $S_o$  – остановочный путь транспортного средства при экстренном торможении в данной ДТС,

$S_y$  – удаление транспортного средства от места наезда на пешехода в момент возникновения опасности для движения.

Причем в указанных расчетных величинах пешеход принимается за точечную модель, с предельными значениями скорости для выбираемого темпа, при неизменном направлении движения как пешехода так и транспортного средства (в большинстве случаев - как фронтальный наезд). Опасную ДТС можно рассматривать, как происходящую в плоскости автомобильной дороги (см. рисунок 3.14). Соответственно движение автомобиля можно тогда представить, как перемещение прямоугольника со сторонами, равными габаритным размерам данного транспортного средства, а пешехода – как перемещение в плоскости дороги некоторой окружности, радиусом  $r_n$ .

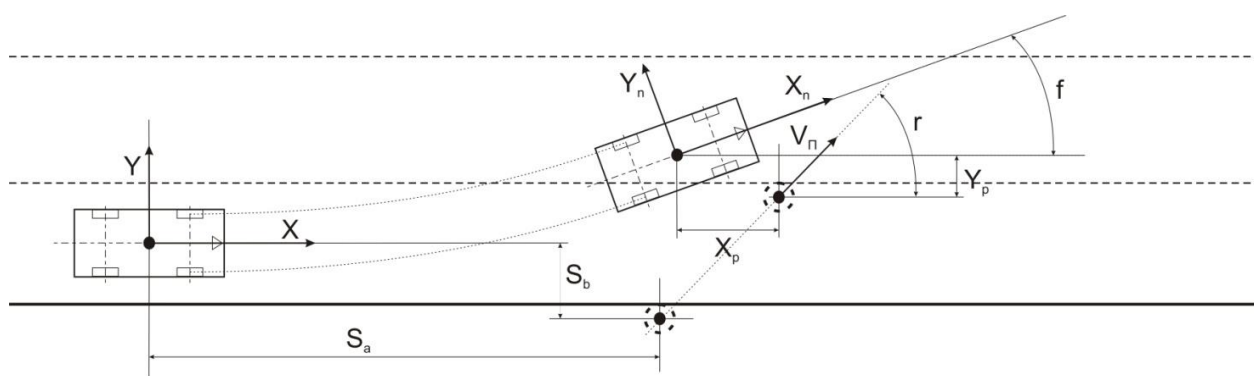


Рисунок 3.14 – Схема для определения координат пешехода и автомобиля

Примем за условие, что центром данной окружности является геометрический центр проекции пешехода на плоскость проезжей части автомобильной дороги. Это дает возможность учитывать ДТС, когда

пешеход несет крупные предметы, ведет за руку ребенка и др. Значения  $r_n$  приведены в табл.3.7.

Таблица 3.7 – Геометрические параметры проекции пешехода на плоскость проезжей части

| Возраст человека |                       | Ширина, м | Толщина, м | Площадь проекции, м <sup>2</sup> | Радиус, $r_n$ , м |
|------------------|-----------------------|-----------|------------|----------------------------------|-------------------|
| Взрослый         | в летней одежде       | 0,46      | 0,28       | 0,100                            | 0,359             |
|                  | в демисезонной одежде | 0,40      | 0,30       | 0,113                            | 0,346             |
|                  | в зимней одежде       | 0,50      | 0,32       | 0,125                            | 0,390             |
|                  | с ребенком на руках   | 0,75      | 0,48       | 0,285                            | 0,585             |
|                  | с ручным багажом      | 0,90-1,10 | 0,75       | 0,350-0,825                      | 0,866             |
|                  | с рюкзаком            | 0,50      | 0,80       | 0,315                            | 0,632             |
|                  | с пакетом             | 0,75      | 0,40       | 0,235                            | 0,548             |
| Подросток        |                       | 0,43-0,38 | 0,27-0,22  | 0,090-0,067                      | 0,315             |
| Ребенок          |                       | 0,34-0,30 | 0,21-0,17  | 0,056-0,040                      | 0,247             |

Положение пешехода относительно подвижной системы координат автомобиля в момент начала опасной ДТС всецело зависит от положения пешехода в этот момент и его скорости движения (рис.3.19).

Если вектор скорости пешехода направлен под углом  $r$  оси автомобиля, а вектор скорости автомобиля под углом  $f$ , координатное удаление пешехода может быть определено в подвижной системе для любого момента времени по следующим выражениям:

$$\begin{aligned}
 x_p &= \left( \int_0^t (v_n \cos r - v_x) dt \right) \cos f + \left( \int_0^t (v_n \sin r - v_y) dt \right) \sin f + S_a \cos f + S_b \sin f \\
 y_p &= - \left( \int_0^t (v_n \cos r - v_x) dt \right) \sin f + \left( \int_0^t (v_n \sin r - v_y) dt \right) \cos f - S_a \sin f + S_b \cos f
 \end{aligned}
 \quad (3.41)$$

При чем, зная значения или законы изменения скорости движения пешехода  $v_n$ , скорости движения автомобиля  $v_x$ ,  $v_y$ , углов  $r$  и  $f$ , можно реконструировать ДТС не только в численном виде, но и в графическом. Условие попадания точки геометрического центра пешехода  $A$  проверяется

анализом координат пешехода  $x_p$ ,  $y_p$ , относительно подвижной системы координат, по условию попадания центра  $A$  в коридор движения транспортного средства (его полосу движения с учетом интервала безопасности  $\Delta\delta$ , определяемого как  $\Delta\delta = 0,126V_a + \Delta_{ст}$ , при переходе пешеходом автомобильной дороги, или как  $\Delta\delta = 0,126V_a + \Delta_{ст} \pm 0,277V_n$ , при движении пешехода вдоль дороги, где:  $\Delta_{ст}$  – статический интервал безопасности, равный  $(0,5 \div 1,0)$  м) и определяется по формуле вида:

$$|y_p| < B_z + r_n \quad (3.42)$$

где:  $B_z$  – половина габаритной ширины транспортного средства.

Далее проверяется величина  $x_p$  и устанавливается его знак, т.к. проекция транспортного средства несимметрична относительно оси  $y$ , т.е. центр масс транспортного средства не совпадает с его геометрическим центром. В зависимости от знака  $x_p$  анализируется вероятность попадания точки  $A$  в область контакта габаритной проекции транспортного средства и окружности проекции пешехода (по радиусу):

$$\text{При } x_p > 0: \quad x_p < A_z + r_n \quad (3.43)$$

$$\text{При } x_p < 0: \quad |x_p| < (L_z - A_z) + r_n$$

Область ограниченная неравенствами, является прямоугольной, площадью –  $((L_z + 2 r_n) \times 2(B_z + r_n))$ . Помимо этого для наружных габаритных точек транспортного средства данная проверка не является достаточной.

Необходимо установить, являются ли координаты  $x_p$ ,  $y_p$  одновременно большими, чем соответствующие габаритные размеры транспортного средства:

$$\left. \begin{array}{l} x_p > A_z \\ |y_p| > B_z \end{array} \right\} x_p > 0$$

$$\left. \begin{array}{l} |x_p| > L_z - A_z \\ |y_p| > B_z \end{array} \right\} x_p < 0 \quad (3.44)$$

Если данная система неравенств выполняется, то условие наезда на пешехода (графически – при попадании центра  $A$  в сегменты радиусом  $r_n$  в габаритных углах транспортного средства) произойдет при выполнении неравенств:

При  $x_p > 0$ :

$$\sqrt{(x_p - A_z)^2 + (y_p - B_z)^2} \leq r_n \quad (3.45)$$

При  $x_p < 0$ :

$$\sqrt{(x_p - L_z + A_z)^2 + (y_p - B_z)^2} \leq r_n \quad (3.46)$$

Данная модель проста, для расчета, с помощью нее можно как проверить наличие возможности водителя избежать наезда, так достоверность показаний участников ДТП.

Таким образом, оперируя исходными данными, зная законы их изменения, можно определить момент возникновения опасности для движения в относительной системе координат, т.к. опасность возникает при конкретной совокупности обстоятельств и эта совокупность неповторима.

### **3.4. Особенности анализа первичного и вторичного травмирования пешеходов**

При анализе указанной выборки по ДТЭ в СЗФО, были составлены основные (типовые) сценарии сближения ТС с пешеходом, характерные для всех исследованных в ДТЭ фактических ДТП за указанный период, при этом по имеющимся по этим ДТП данным судебно-медицинских исследований установлена частота распределения случаев с различными индексами AIS по ним, что показано в таблице 3.8.

Из представленных данных следует, что наиболее частый сценарий сближения по фактическим ДТП это перекрестный наезд на пешехода, при этом из-за наибольшей частоты встречаемости перекрестных сценариев в

общей статистике исследуемых ДТП на них приходится большая доля травм в составе политравмы.

Таблица 3.8 – Степени тяжести политравмы пешехода (индекс AIS)

| Описание сценария                                                                 | Степень тяжести политравмы пешехода (индекс AIS) |                      |                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------|------------------------|
|                                                                                   | Легкий вред (AIS0-2)                             | Тяжкий вред (AIS3-5) | Летальный исход (AIS6) |
| Перекрестный наезд, пешеход движется справа налево, относительно ТС               | 34,80%                                           | 36,80%               | 37,20%                 |
| Перекрестный наезд, пешеход движется слева направо, относительно ТС               | 33,00%                                           | 36,90%               | 36,10%                 |
| Попутный наезд, ТС движется прямолинейно, пешеход движется прямолинейно или стоит | 3,50%                                            | 3,80%                | 4,60%                  |
| Попутный наезд, ТС совершает перестроение                                         | 1,70%                                            | 1,80%                | 1,30%                  |
| Попутный наезд, пешеход смещается в полосу движения ТС                            | 4,60%                                            | 2,90%                | 3,40%                  |
| Попутный наезд, пешеход и ТС смещаются в сторону друг друга                       | 1,00%                                            | 1,00%                | 1,10%                  |
| Встречный наезд, ТС движется прямолинейно, пешеход неподвижен                     | 0,90%                                            | 0,70%                | 1,00%                  |
| Встречный наезд, ТС совершает перестроение                                        | 1,10%                                            | 0,90%                | 1,20%                  |
| Встречный наезд, пешеход смещается в полосу движения ТС                           | 0,70%                                            | 0,60%                | 0,90%                  |
| Встречный наезд, пешеход и ТС смещаются в сторону друг друга                      | 1,40%                                            | 1,10%                | 1,70%                  |
| ТС осуществляет маневр поворота налево, пешеход до ДТП движется встречно          | 4,40%                                            | 4,50%                | 3,10%                  |
| ТС осуществляет маневр поворота налево, пешеход до ДТП движется попутно           | 5,90%                                            | 5,20%                | 4,50%                  |
| ТС осуществляет поворот направо, пешеход до ДТП движется встречно                 | 4,40%                                            | 1,90%                | 2,10%                  |
| ТС осуществляет поворот направо, пешеход до ДТП движется попутно                  | 2,60%                                            | 1,90%                | 1,80%                  |

При этом в фазах механизма наезда на пешехода следует выделить: первичное травмирование от контактно-следового взаимодействия с ТС (в частности для фронтальных наездов при попутных, перекрестных и встречных контактах с передним бампером, капотом, ветровым стеклом, передними стойками крыши, передом панели крыши); вторичное

травмирование при падении на покрытие проезжей части (грунт обочины, кювета и т.п.); вторичное травмирование при вторичных ударах (отброс тела на другое попутное или встречное ТС, падение на элемент дорожного обустройства и т.п.).

Далее были отобраны ДТЭ в которых скорость движения ТС в момент наезда была определена категорично, при этом пострадавшими являлись взрослые лица старше 18 лет, при этом из выборки были попутно исключены случаи ухудшения тяжести по причинам дополнительных факторов находящихся в связи с ДТП, например, заражение крови сразу после ДТП при попадании пешехода в кювет со стоячей водой и т.п., при этом отбирались случаи в которых по данным СМЭ было возможно категорично разделить локализации телесных повреждений на первичные (от удара о ТС) и вторичные (от падения/волочения после сброса с ТС). Всего было отобрано 348 материалов ДТЭ по наездам на пешеходов.

Также использовались данные по наутрым тестам с манекнами тела человека и кадаврами из базы NHTSA, приведенные в Приложении Б.

В результате, на базе полученных подвыборок были получены:

– зависимость изменения значения индекса AIS от скорости в момент наезда для пешеходов при ударе о ТС (см. рисунок 3.15), полученная зависимость (3.47) имеет классический экспоненциальный вид (коэффициент детерминации  $R^2 = 0,921$ ):

$$AIS = 2,09651e^{0,0154V} \quad (3.47)$$

– зависимость изменения значения индекса AIS от скорости в момент наезда для пешеходов при падении тела (см. рисунок 3.16), полученная зависимость (3.48) имеет полиномиальный вид третьего порядка (коэффициент детерминации  $R^2 = 0,908$ ):

$$AIS = 1E-05V^3 - 0,0017V^2 + 0,0738V + 1,6297 \quad (3.48)$$

Для уточнения полученных зависимостей по возрастным группам в дальнейшем потребуется увеличение объема исходной выборки.

Учитывая известные работы по применению логит-моделей [79,129-130] в оценке риска наступления летального исхода и/или получения критических или фатальных значений индексов травмирования (включая оценки таких индексов как MAIS, НИС и ISS [131]) полученные зависимости можно применять в качестве базового компонента риска для логит-моделей, описываемых в виде (3.49), которые позволяют определить статистическую корреляция между вероятностью травмирования и независимыми переменными (факторами). На основе такого корреляционного моделирования можно сравнить коэффициенты шансов (OR) тяжести травм пешехода между различными условиями дорожно-транспортного происшествия.

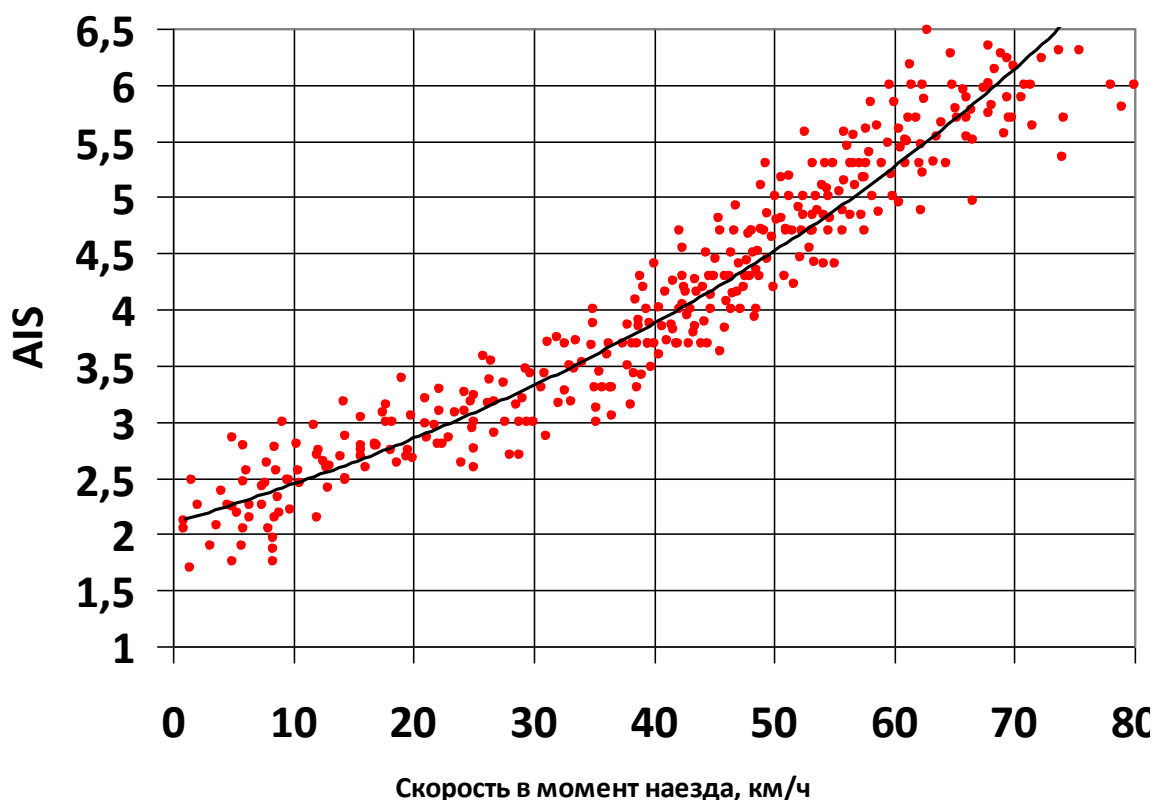


Рисунок 3.15 – Распределение значений AIS к скорости  $V$  в момент наезда (для пешеходов при первичном травмировании (ударе о ТС))

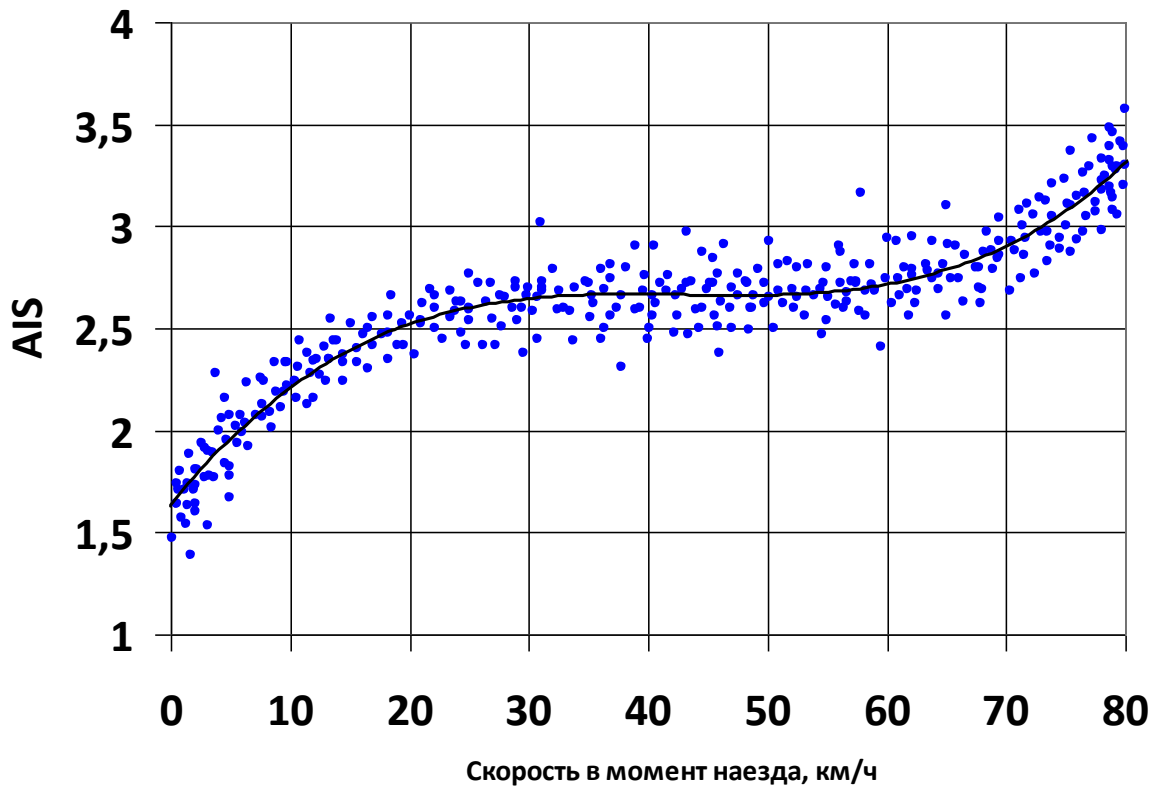


Рисунок 3.16 – Распределение значений AIS к скорости  $V$  в момент наезда (для пешеходов) при вторичном траммировании (падении тела)

$$\ln \frac{p}{(1-p)} = \sum_{i=1}^n (\beta_0 + \beta_i \cdot X_i) \quad (3.49)$$

где  $\ln$  – знак натурального логарифма;

$p$  – вероятность тяжелой травмы пешехода или велосипедиста с индексом AIS = 3, 4, 5, 6 (AIS3+);

$p/(1-p)$  – вероятность легкой травмы пешехода или велосипедиста по сравнению с тяжелой (с индексом AIS = 0, 1, 2);

$\beta_0$  – базовый компонент риска, в качестве которого может использоваться оценка по полученным выше зависимостям;

$\beta_i$  – весовые коэффициенты  $i$ -го бинарного фактора;

$X_i$  –  $i$ -й бинарный фактор (по принципу да/нет) риска, оказывающий влияние на травмирование (например: возраст, наличие рюкзака на спине и т.п.).

Такого рода статистическое моделирование может быть выполнено в программном обеспечении MatLab с использованием процедуры SurveyLogistic, которая учитывает весовые коэффициенты выборки и обеспечивает результаты отношения шансов (OR – odds ratio) серьезных травм в зависимости от различных возможных факторов риска.

Таким образом, модели аналогичные рассмотренной, позволяют объединить в себе единый методический подход к оценке риска травмирования и решения специализированных задач ДТЭ, в частности установление причинной связи между установленным превышением максимально допустимой по ПДД скорости движения водителем и полученными пешеходом или велосипедистом объемом телесных повреждений (политравмы в целом).

Исследованию вторичного травмирования посвящено достаточно много публикаций, среди них следует выделить следующие особенности, а именно: известные публикации по тестам с кадаврами [132-134], вызывают куда больше вопросов, чем дают ответов в рассматриваемой проблемной области, так как кадавры во всех случаях экспериментальных наездов были статичны и зачастую их возраст был много более 60 лет. Серийных и систематических исследований по всем возрастным группам как на кадаврах, так и на манекенах, направленных именно на оценку вторичных ударов в целом в мировой практике крайне мало. При этом, во многих публикациях не указано в какой фазе торможения находится ТС в момент начала контакта [135].

Импульсная модель описанная в [136] не учитывает поперечное перемещение (по оси  $z$ , относительно схем представленных там же [136], таким образом также не учитывается собственная скорость пешехода и ее влияние на фактическую траекторию отброса тела. Кроме того, в имеющемся корпусе работ данной направленности, не учитывается что фактически при динамической осадке передней части при экстренном торможении высота передней кромки капота отлична от тестового (т.е. от тесте с наездом без

торможения). Имеются также публикации [137] по учету влияния скорости движения пешехода на вторичное травмирование, однако в них рассматривается слишком небольшая выборка и учитывается скорость движения пешехода не более 5 км/ч, тогда как при быстром беге может быть порядка 18-19 км/ч [117].

Таким образом, требуется более обширный объем исследований, для определения связей между первичным и вторичным травмированием пешеходов с учетом обширного объема варьирования параметров влияния на отброс и падение пешехода.

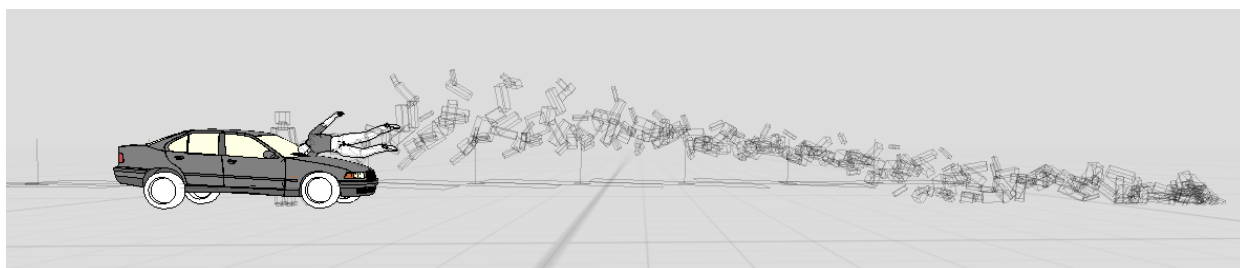
В рамках данного исследования, полученные травмы для каждого сегмента тела человека были оценены по сокращённой шкале оценки телесных повреждений (*Abbreviated Injury Score*) (AIS) по [92], а также использовался индекс Критерия травмы головы - НИС (Head Injury Criterion) по [138]. При этом в рамках анализа выполненных ДТЭ оценка AIS выполнялась по данным судебно-медицинских заключений, а при численном моделировании по величинам осевых ускорений.

В рамках данной работы показаны результаты численного моделирования в программе Virtual Crash 5, для анализа скорости удара головой и величин замедлений в центре тяжести головы и шеи пешеходов при первичном и вторичных ударах, для следующих использованных моделей: модели антропоморфного манекена человека (мужские, женские, ребенка 10 лет) и модели ТС следующих классов: компактный, спортивный, седан, кроссовер, минивэн, однообъемный (всего по 3 представился в каждом классе).

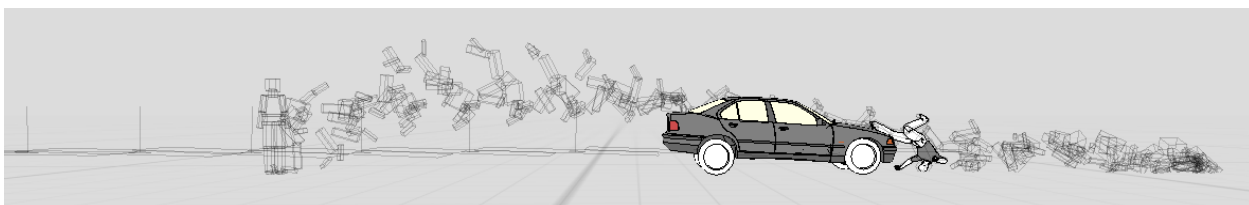
При моделировании кроме того, варьировались: скорость движения ТС (от 20 до 60 км/ч), скорость движения пешехода (от 0 (стоящий пешеход) до 18 км/ч), фазы шага в момент начала первичного КСВ, угол входа к продольной оси ТС, контактная зона на ТС (передняя левая часть, центральная передняя часть, правая передняя часть, т.е. 25%, 50% и 75% от габаритной ширины), фаза торможения ТС (наезд без торможения, наезд в

момент начала срабатывания тормозного привода, наезд после достижения установившегося замедления). По каждому эксперименту в серии строились графики изменения скорости центров тяжести головы (ЦТ) и шеи, а также замедлений/ускорений на данных относительно времени события.

Пример одного эксперимента (из всей серии экспериментов, для седана – автомобиля марки БМВ-320, в кузове Е36) с явными первичным и вторичными ударами головой, а также сдвигом шеи показан на рис.1.10. В данном примере: тестовый автомобиль движется со скоростью 60 км/ч, манекен пешехода движется со скоростью 1,5 км/ч в момент наезда, фаза шага (обе ноги на поверхности, левая впереди), наезд имеет место передней правой частью ТС показан на рисунке 3.17.



а)



б)

Рисунок 3.17 – Пример симуляции наезда. а) 0,124 с момента начала первичного КСВ, первичный удар головой о низ ветрового стекла; б) 1,241 с с момента начала первичного КСВ, вторичный удар головой при падении, сдвиг шеи

График изменения скорости центров тяжести головы (ЦТ) и шеи, а также замедлений/ускорений на данных сегментах тела относительно времени события для примера, показанного на рисунке 3.18.



Рисунок 3.18 – Графики изменения скорости ЦТ головы, шеи и замедлений/ускорений головы для примера, показанного на рисунке 3.17

При выполнении анализа полученных моделей перемещений по численным экспериментам учитывался показатель высотного соотношения передней кромки капота к высоте ЦТ бедра модели антропоморфного манекена —  $R_H$ , в м. Показатель  $R_H$  использовался при получении зависимостей изменения AIS и HIC. Данный показатель позволил более точно учитывать геометрию контактной зоны, чем представление зависимостей по классам ТС, при анализе полученных данные по трамированию.

Суммарное распределение тяжести травм по частям тела в анализируемой выборке по ДТЭ было проанализировано на первичные и вторичные травмы, при этом на рисунке 3.19 показано распределение тяжести травм по частям тела в анализируемой выборке при вторичном ударе (падении на покрытие). Откуда следует, что при индексах AIS5 и выше, наибольшие по тяжести травмы преобладают (по мере убывания) на голове, позвоночнике и шее пострадавших. Таким образом, следует считать, что наибольший вес в достижение летального исхода или тяжкого вреда

здоровью пешеходов вносят удары головой, вынуждающие смещения шеи от ударов головы и травмы нижележащих отделов позвоночника при падении.

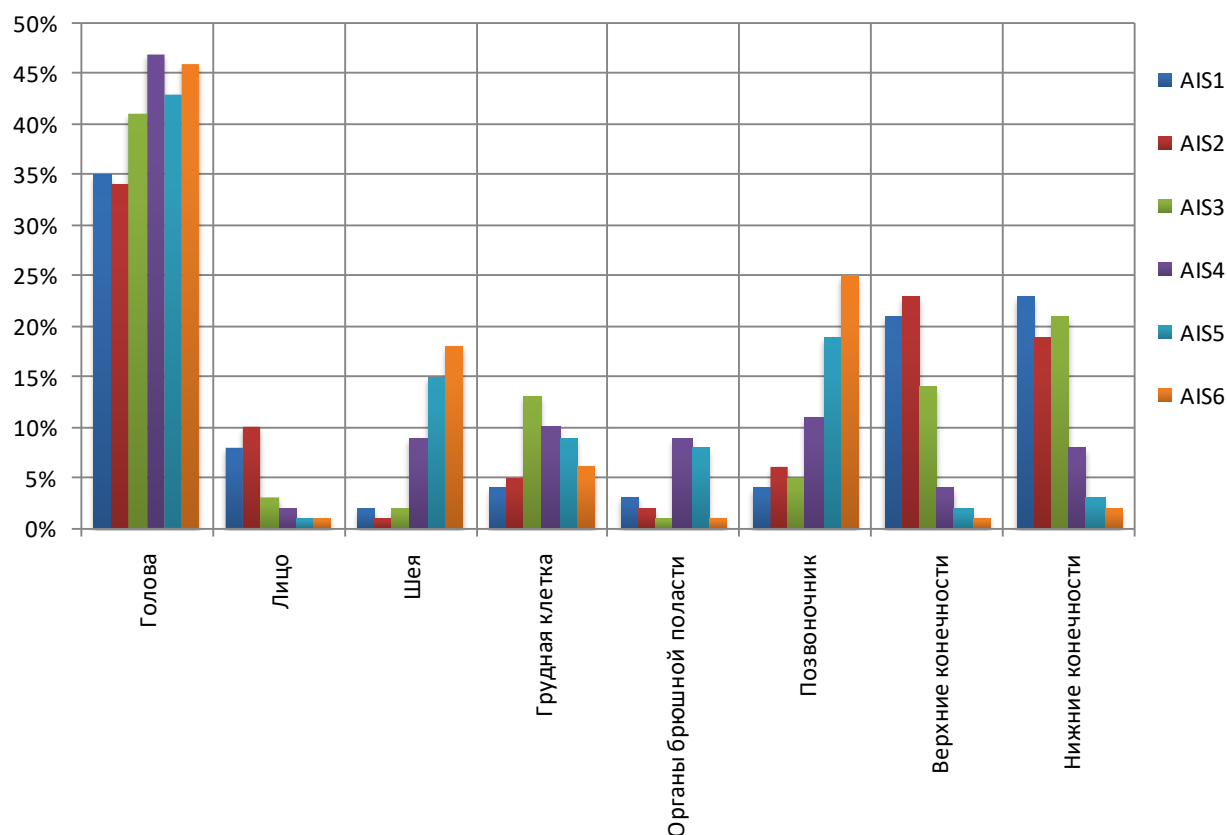


Рисунок 3.19 – Распределение тяжести травм по частям тела в анализируемой выборке при вторичном ударе (падении на покрытие)

При этом установлено, что замедления головы при вторичных ударах в различных сочетаниях варьируемых показателей в полученных моделях (в частности при случаях когда проекция на ось  $z$  вектора скорости головы направлена вниз, а угол вращения вертикальной оси пешехода находится во 2 квадранте), показывают их значительное преобладание над первичными, так в примере показанном на рисунке 3.18, пиковая величина замедления головы при вторичном ударе составляет почти 115g, при этом имеет место также замедление в 42g на шее, что приводит к значению AIS6 (летальный исход) именно в результате вторичного травмирования (падения на проезжую часть).

Учитывая известные работы [129,130] по применению логит-моделей в оценке риска наступления тяжкого вреда здоровью пешехода и/или летального исхода, которые позволяют определить статистическую корреляцию между вероятностью травмирования и независимыми переменными (факторами), были разработаны модели для решения частных задач ДТЭ. В частности, для оценки травмирования при вторичном ударе (падении) при сравнении случаев движения с различными скоростями (например: с фактической и с максимально допустимой) по результатам моделирования были использованы следующие переменные: скорость движения ТС, скорость движения пешехода, масса пешехода и  $R_H$ .

$$p_{AIS} = \ln \frac{p}{(1-p)} \quad (3.50)$$

где  $\ln$  – знак натурального логарифма;

$p$  – вероятность тяжелой травмы пешехода с индексом AIS = 3,4,5,6 (AIS3+);

$p/(1-p)$  – вероятность легкой травмы пешехода по сравнению с тяжелой (с индексом AIS = 0, 1, 2).

В ходе статистического моделирования в программном обеспечении MatLab с использованием процедуры SurveyLogistic, которая учитывает весовые коэффициенты выборки и обеспечивает результаты отношения шансов (OR – odds ratio) серьезных травм в зависимости от различных указанных факторов риска, была получена следующая зависимость расчета вероятности получения тяжкого вреда или летального исхода:

$$p = -8,897 + 0,032V_A + 0,013V_{II} + 0,027m_{II} + 5,798R_H \quad (3.51)$$

где  $V_A$  – скорость движения ТС в момент наезда, км/ч;

$V_{II}$  – скорость движения пешехода, км/ч;

$m_{II}$  – масса пешехода в кг;

$R_H$  – высотное соотношение высоты передней кромки капота к высоте бедра в момент контакта, м

Таким образом, модели аналогичные рассмотренной, позволяют объединить себя в единый методический подход к оценке риска травмирования и решения специализированных задач ДТЭ.

### **3.5. Имитационная гибридная модель тела человека для анализа травмирования и методика параметризации геометрии факторной группы А для реализации МОР в ДТЭ**

С целью формирования факторной группы В (см. табл.1.3) была разработана гибридная модель антропоморфного манекена (ГМАМ), которая совмещает в себе «скелетный» многозвенный каркас многомассовой системы, использующий принципы моделей типа MADYMO с оболочкой из КЭ разной плотности и заданных свойств КЭ, реализованный как связанная полимодель: Matlab/Simulink/Simscape – Autodesk Fusion с экспортом в Ansys. Типизация антропоморфных данных производится путем смены параметров модели (геометрия модели параметризирована) на перестройке модели по указанной связке.

По сравнению с полными АМ моделями типа THUMS, особенностью является возможность отражать локализации телесных повреждений (ЛТП) на модели, чего нет для моделей MADYMO, существенно сокращается время расчета МКЭ, сопоставление ошибки перемещений не превышает 5%, для задач (в том числе индексированных) ДТЭ (ГМАМ к THUMS и к тестам NHTSA).

Выполнялось сравнение величин достигаемых значений сил (в Н) на центре тяжести (ЦТ) головы, шеи, груди, таза, бедра, колена и голени ГМАМ относительно тестовых значений, ранее применявшимися для верификации моделей THUMS 4 (тесты с кадаврами). На рисунке 3.20 показан пример сравнения тестовых значений силы (приведенных от 3-х осей) на ЦТ головы. Верификация ГМАМ показала высокую сходимость по траекториям ЦТ указанных частям геометрии ГМАМ (см. рисунок 3.21).

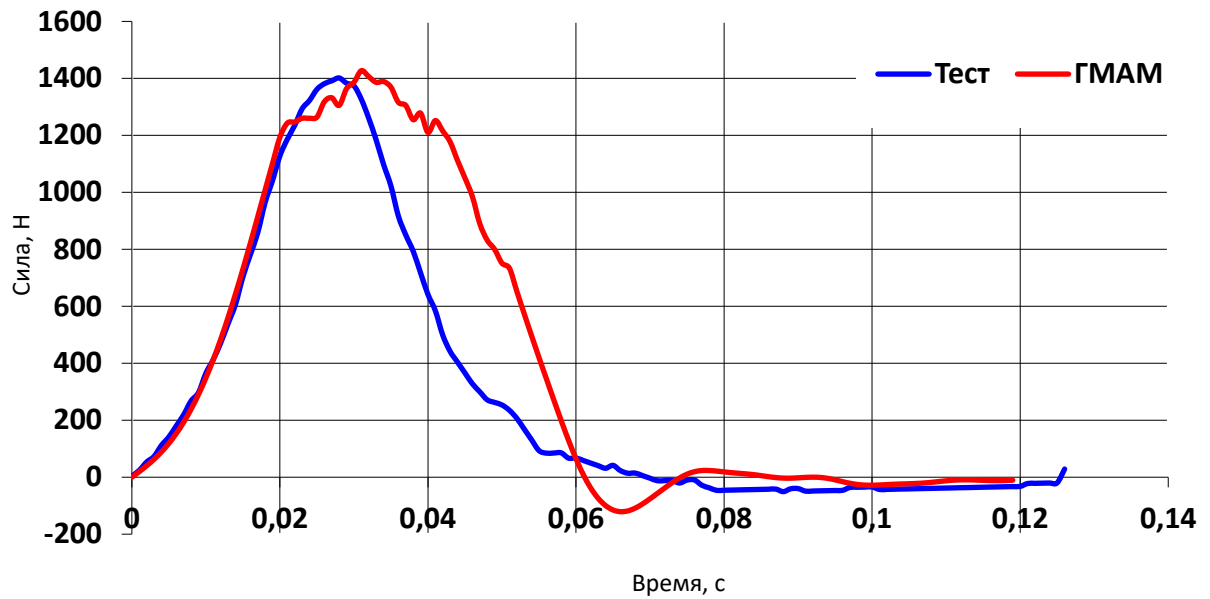


Рисунок 3.20 – Результаты верификации ГМАМ. Сравнение силы на ЦТ головы ГМАМ с данным теста с кадавром

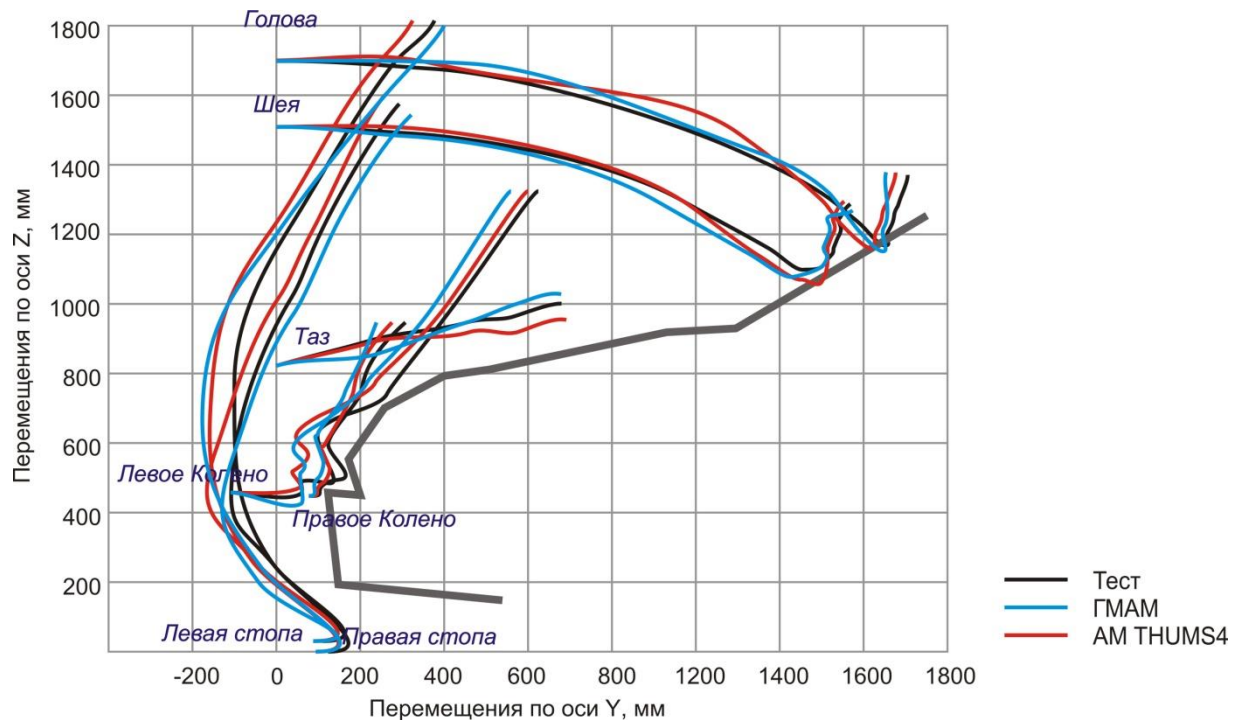


Рисунок 3.21 – Результаты верификации ГМАМ. Сравнение траекторий перемещений ЦТ

Методика параметризации геометрии факторной группы А (см. таблицу 1.3) для реализации МОР в ДТЭ для формирования суррогатов моделей была реализована на базе датасета в 27858 ТС, путем обработки `xlsx` таблиц геометрии. Код программы на Python для параметризации геометрии

факторной группы А при формировании суррогатов моделей, путем обработки *xlsx* таблицы массы/геометрии с применением иерархической кластеризации по методу Уорда приведен в Приложении Г.2. На рисунке 3.22 показан пример кластеризации в зависимости от числа поколений.

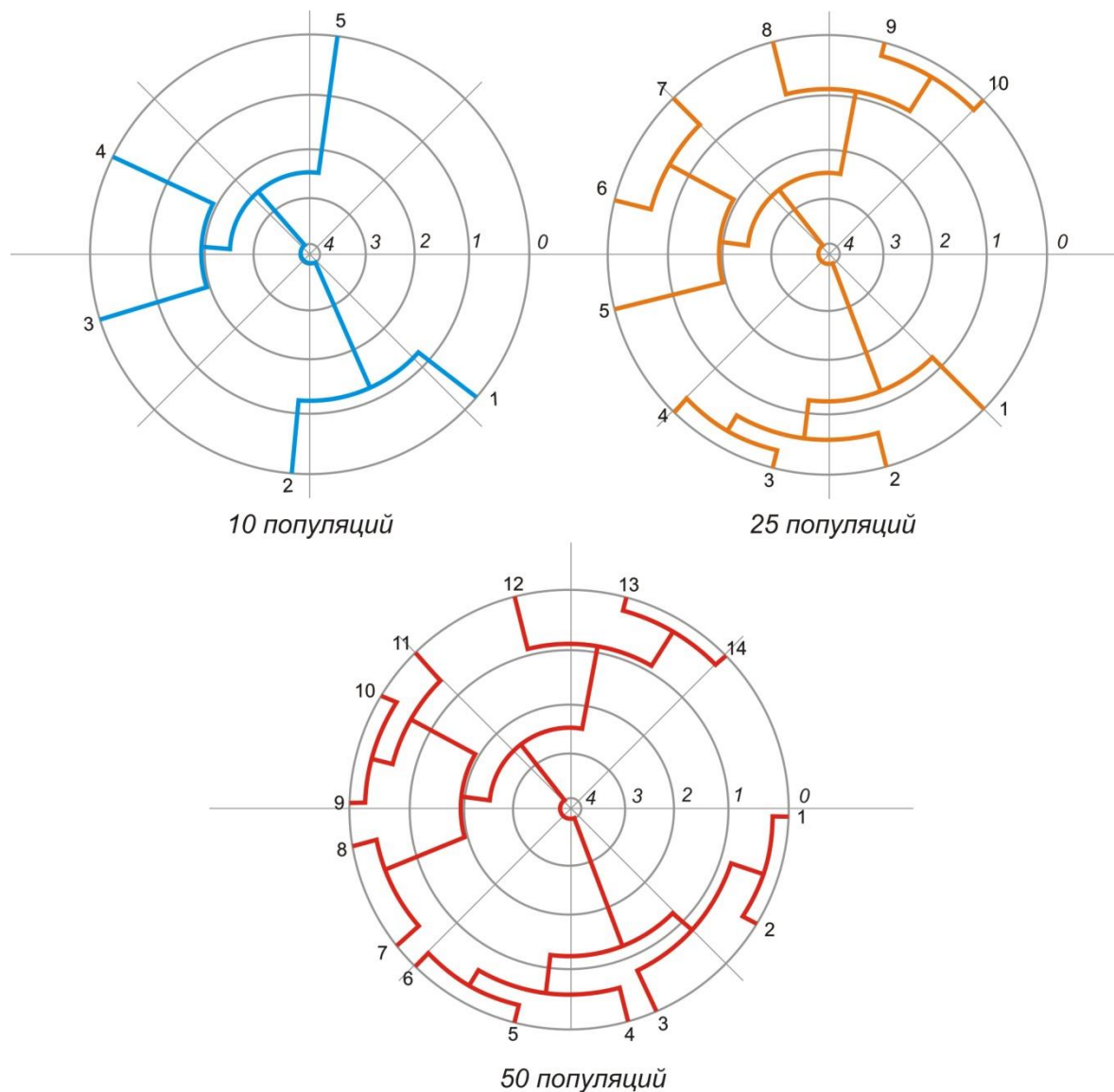


Рисунок 3.22 – Дендрограммы кластерного многообразия в зависимости от числа поколений (10; 50; 100)

Для снижения объема дальнейших вычислений, в работе принято кластерное деление на 5 кластеров. Итоговое разделение показано в таблице 3.9.

Данные в таблице 3.9 представлены в формате «Среднее  $\pm$  Стандартное отклонение» для учета вариативности внутри кластера. Далее в главах 4,5 и 6

при использовании конечно-элементного моделирования (суррогатных КЭМ) использовались: средние значения как базовые параметры, стандартные отклонения для определения граничных условий и корреляции между параметрами (например, большие углы наклона обычно сочетаются с низкой высотой бампера).

Таблица 3.9 – Итоговые средние значения геометрических и массовых параметров по кластерам

| № п/п | Параметр (по табл.1.3), ед. измер.             | Кластер 1 (Спортивные) | Кластер 2 (Городские) | Кластер 3 (Внедорожники) | Кластер 4 (Премиум) | Кластер 5 (Компактные) |
|-------|------------------------------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------|------------------------|
| 1     | Масса автомобиля, кг                           | 1420±85                | 1580±75               | 2140±120                 | 1850±95             | 1210±65                |
| 2     | Угол наклона бамперной касательной, град       | 32.4±1.8               | 25.1±1.2              | 28.6±2.1                 | 22.8±1.5            | 19.3±0.9               |
| 3     | Угол наклона передней нижней доли капота, град | 45.2±2.3               | 38.7±1.7              | 42.1±2.5                 | 35.6±1.9            | 33.8±1.4               |
| 4     | Угол наклона задней доли капота, град          | 38.5±2.1               | 33.2±1.5              | 36.8±2.3                 | 31.4±1.8            | 29.7±1.3               |
| 5     | Угол наклона ветрового стекла, град            | 26.7±1.4               | 24.3±1.1              | 28.2±1.8                 | 23.5±1.3            | 22.1±0.8               |
| 6     | Высота центральной точки бампера, мм           | 520±18                 | 560±22                | 580±25                   | 540±20              | 490±15                 |
| 7     | Высота нижней точки бампера, мм                | 310±15                 | 340±18                | 380±22                   | 330±17              | 290±12                 |
| 8     | Длина продольной доли бампера, мм              | 1180±45                | 1050±38               | 1250±55                  | 1120±42             | 970±32                 |
| 9     | Передний свес, мм                              | 680±25                 | 620±22                | 720±30                   | 650±27              | 590±20                 |
| 10    | Длина бампера, мм                              | 510±20                 | 470±18                | 550±25                   | 490±21              | 430±16                 |
| 11    | Высота передней точки капота, мм               | 740±22                 | 780±25                | 820±30                   | 760±24              | 710±19                 |
| 12    | Высота задней точки капота, мм                 | 910±28                 | 950±32                | 980±35                   | 930±30              | 880±25                 |
| 13    | Высота передней доли крыши, мм                 | 1390±35                | 1420±40               | 1470±45                  | 1410±38             | 1360±32                |

Данные параметры позволяют создать репрезентативные конечно-элементные модели для каждого кластера, оптимизировав баланс между

точностью и вычислительной эффективностью. При этом по результатам кластеризации автомобилей на 5 кластеров в контексте наезда на пешехода можно дать следующие выводы:

1. Влияние геометрии передней части на первичное КСВ. Кластеры с более агрессивной геометрией (большие углы наклона капота и бампера, низкая высота передней кромки) демонстрируют повышенную опасность при первичном контакте. В частности, кластер 3 (средняя высота бампера 320-350 мм и углы наклона  $>30^\circ$ ) создает риск прямого удара в ноги пешехода с высокой кинетической энергией, что увеличивает вероятность перелома костей голени. В то же время кластер 5 с плавными линиями (углы  $<25^\circ$ , высота бампера  $>400$  мм) способствует более "мягкому" первичному КСВ, частично гася энергию удара за счет деформации пластиковых элементов.

2. Особенности фазы заброса тела на капот. Кластеры 1 и 4 (с высокими значениями углов наклона капота  $40-45^\circ$  и плавным переходом к ветровому стеклу) показывают худшие характеристики по забросу тела. Их геометрия создает эффект "трамплина", увеличивая вертикальную составляющую скорости тела после удара. Напротив, кластер 2 с почти горизонтальным профилем капота (угол наклона  $28-32^\circ$ ) и увеличенной длиной переднего свеса демонстрирует меньшую вертикальную составляющую, что снижает высоту подброса тела и, соответственно, потенциальную тяжесть вторичного травмирования (вторичное КСВ при падении).

3. Факторы сброса тела и завершающей фазы стадии первичного КСВ в механизме ДТП. Наиболее опасными оказались автомобили кластера 3 (высокие значения всех углов и минимальная высота крыши), где траектория сброса тела проходит по нарастающей – от резкого подброса на капоте до сильного удара о ветровое стекло с последующим отбросом на большое расстояние. Кластер 5, характеризующийся пониженной высотой капота (680–720 мм) и увеличенной длиной бампера, демонстрирует более контролируемый сброс с меньшей горизонтальной скоростью, что

теоретически может снизить риск фатальных травм при падении на проезжую часть.

При этом масса автомобиля оказывает двойное влияние: тяжелые автомобили (кластер 4, >2100 кг) сильнее ударяют в начале первичном контакте, но лучше гасят энергию при забросе, тогда как легкие (кластер 2, <1500 кг) могут привести к более сложной траектории движения тела после удара.

Особенности принятой кластеризации для разных антропометрических типов отразились в наличии критических параметров влияния на травмирование пешехода относительно роста пешехода (см. таблицу 3.10).

Таблица 3.10 – Выявленные особенности некоторых кластеров

| № п/п | Рост пешехода      | Кластер   | Основной параметр влияния        |
|-------|--------------------|-----------|----------------------------------|
| 1     | Дети 110–140см     | Кластер 3 | Высота бампера $510 \pm 25$ мм   |
| 2     | Взрослые 160–175см | Кластер 1 | Угол капота $42.3 \pm 2.0^\circ$ |
| 3     | Высокие >185см     | Кластер 4 | Высота ветрового стекла          |

В качестве базы сравнительного анализа результатов численного моделирования использовались в экспериментальной базе: результаты натурных тестов NHTSA (выборка из 10 тестов с АМ типа Ploar-2 и 2 теста с кадаврами – см. Приложение Б).

Численных эксперименты при анализе особенностей первичного и вторичного травмирования проводились на базе АМ типа MADYMO в программах PC-Crash 8, VirtualCrash 5 (для кластера на 5 типов кузовов группы А, 3 типа группы В для ГМAM, с вариацией по скорости движения ТС (от 20 до 120 км/ч), скорости движения пешехода (от 0 (стоящий пешеход) до 16 км/ч), фазы шага в момент начала первичного КСВ, угла входа к продольной оси ТС, контактной зоны на ТС (передняя левая часть, центральная передняя часть, правая передняя часть, т.е. 25%, 50% и 75% от габаритной ширины), фазы торможения ТС (наезд без торможения, наезд в

момент начала срабатывания тормозного привода, наезд после достижения установившегося замедления).

По каждому эксперименту в серии строились графики изменения скорости центров тяжести головы (ЦТ) и шеи, а также замедлений/ускорений на данных ЦТ относительно времени события (всего: более 3000 тестов). Накапливались также сопутствующие данные: время первичного КСВ, дальность перемещений в стадиях: КСВ – оброс – конечное положение. Результаты включены в Приложение В.

При выполнении анализа полученных моделей перемещений по численным экспериментам учитывался показатель высотного соотношения передней кромки капота к высоте ЦТ бедра модели антропоморфного манекена (ГМАМ) –  $R_H$ , в м. Показатель  $R_H$  использовался при получении зависимостей изменения AIS и NIC. Данный показатель позволил более точно учитывать геометрию контактной зоны, чем представление зависимостей по классам ТС, при анализе полученных данных по травмированию. Результаты применения ГМАМ и методики параметризации геометрии факторной группы А были использованы при разработке методики оценки риска травмирования в составе комплекса методик производства ДТЭ по ДТП с участием пешеходов.

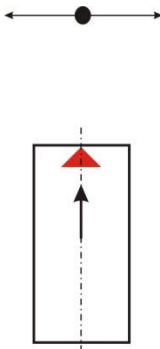
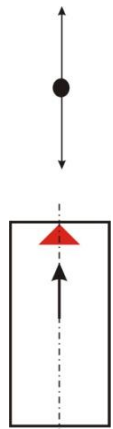
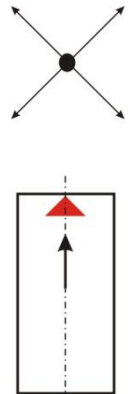
### 3.6. Сценарии стадии сближения

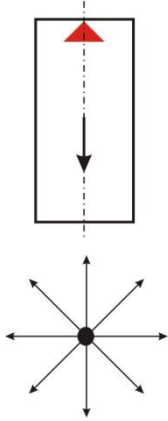
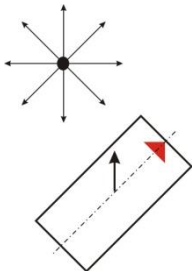
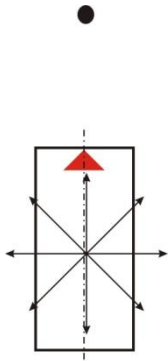
Вышказанна выборка по ДТЭ также была использованная для обобщения данных по повторяющимся обстоятельствам дорожно-транспортных ситуаций, предшествовавших ДТП (наезду на пешехода), что позволило сформировать типовые сценарии стадии сближения пешехода с ТС в механизме ДТП. Данные сценарии показаны в таблице 3.11.

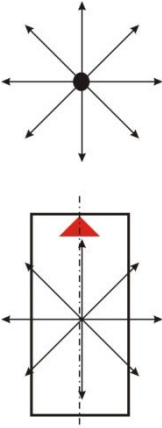
Всего по таблице 3.11 выделено 23 типовых сценария сближения ТС и пешехода, при этом в их индексации использованы буквенно-цифровые

обозначения, включающие базовый признак и первичный, вторичных признаки.

Таблица 3.11 – Типовые сценарии стадии сближения

| № п/п | №п п/п | Базовые признаки сценария                                                                                                            | Иллюстрация                                                                         | Первичные признаки сценария            | Вторичные признаки сценария | Индекс типового сценария |
|-------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 1     | 2      | 3                                                                                                                                    | 4                                                                                   | 5                                      | 6                           | 7                        |
| 1     | 1.1    | <b>Перекрестный.</b><br>ТС движется без потери устойчивости, пешеход пересекает полосу движения ТС под углом $90^\circ \pm 15^\circ$ |    | Пешеход движется слева направо         | Из-за попутного ТС          | ПЛ1                      |
|       | 1.2    |                                                                                                                                      |                                                                                     |                                        | Из-за встречного ТС         | ПЛ2                      |
|       | 1.3    |                                                                                                                                      |                                                                                     |                                        | Из-за не подвижного объекта | ПЛ3                      |
|       | 1.4    |                                                                                                                                      |                                                                                     | Пешеход движется справа налево         | Из-за попутного ТС          | ПП1                      |
|       | 1.5    |                                                                                                                                      |                                                                                     |                                        | Из-за не подвижного объекта | ПП2                      |
| 2     | 2.1    | <b>Попутный</b><br>ТС движется без потери устойчивости, пешеход движется попутно или навстречу ТС под углом $0^\circ \pm 15^\circ$   |  | Фронтальный                            | С подхватом тела пешехода   | ПФ1                      |
|       | 2.2    |                                                                                                                                      |                                                                                     |                                        | Без подхвата тела пешехода  | ПФ2                      |
|       | 2.3    |                                                                                                                                      |                                                                                     | Боковой                                | С подхватом тела пешехода   | ПБ1                      |
|       | 2.4    |                                                                                                                                      |                                                                                     |                                        | Без подхвата тела пешехода  | ПБ2                      |
| 3     | 3.1    | <b>Косонаправленное.</b><br>Пешеход движется под углом $45^\circ \pm 30^\circ$                                                       |  | Левонаправленное перемещение пешехода  | Из-за подвижного объекта    | КЛЛ1                     |
|       | 3.2    |                                                                                                                                      |                                                                                     |                                        | Из-за не подвижного объекта | КЛЛ2                     |
|       | 3.3    |                                                                                                                                      |                                                                                     | Правонаправленное перемещение пешехода | Из-за подвижного объекта    | КЛП1                     |
|       | 3.4    |                                                                                                                                      |                                                                                     |                                        | Из-за не подвижного объекта | КЛП2                     |

| №<br>п/п | №п<br>п/п | Базовые<br>признаки<br>сценария                                                                                                                   | Иллюстрация                                                                         | Первичные<br>признаки<br>сценария                                       | Вторичные<br>признаки<br>сценария                               | Индекс<br>типового<br>сценария |
|----------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 1        | 2         | 3                                                                                                                                                 | 4                                                                                   | 5                                                                       | 6                                                               | 7                              |
| 4        | 4.1       | <b>Заднее.</b> ТС движется задним ходом, пешеход перемещается в любом направлении                                                                 |    | КСВ с задними и заднебоковыми поверхностями тела пешехода               | -                                                               | ЗДЗ                            |
|          | 4.2       |                                                                                                                                                   |                                                                                     | КСВ с передними и переднебоковыми поверхностями тела пешехода           | -                                                               | ЗДП                            |
| 5        | 5.1       | <b>В заносе.</b> В момент наезда ТС перемещается с потерей устойчивости (в том числе из-за предшествующего столкновения / наезда / опрокидывания) |  | Потеря устойчивости из-за причин, не связанных в КСВ с ТС или объектами | Пешеход неподвижен                                              | БУ11                           |
|          | 5.2       |                                                                                                                                                   |                                                                                     | Потеря устойчивости из-за причин, не связанных в КСВ с ТС или объектами | Пешеход в движении                                              | БУ12                           |
|          | 5.3       |                                                                                                                                                   |                                                                                     |                                                                         | Пешеход неподвижен                                              | БУ21                           |
|          | 5.4       |                                                                                                                                                   |                                                                                     |                                                                         | Пешеход в движении                                              | БУ22                           |
| 6        | 6.1       | <b>Неподвижный</b> Пешеход лежит, сидит или стоит в полосе движения ТС, ТС движется в любом режиме направления к пешеходу                         |  | Пешеход не различим на фоне покрытия проезжей части                     | Пешеход лежит или сидит в результате не преднамеренного падения | НП1                            |
|          | 6.2       |                                                                                                                                                   |                                                                                     |                                                                         | Пешеход лежит или сидит преднамеренно                           | НП2                            |

| № п/п | №п п/п | Базовые признаки сценария                                                                                         | Иллюстрация                                                                       | Первичные признаки сценария                                                            | Вторичные признаки сценария | Индекс типового сценария |
|-------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 1     | 2      | 3                                                                                                                 | 4                                                                                 | 5                                                                                      | 6                           | 7                        |
| 7     | 7.1    | <b>Повторный удар.</b><br>Пешеход перемещается в любом направлении к ТС в результате отброса при первичном наезде |  | К моменту начала вторичного КСВ пешеход не находится в контакте с опорной поверхностью | -                           | ПУ1                      |
|       | 7.2    |                                                                                                                   |                                                                                   | К моменту начала вторичного КСВ пешеход находится в контакте с опорной поверхностью    | -                           | ПУ2                      |

Указанная индексация использовалась в дальнейшей работе при выполнении как численных экспериментов, так и при проверке комплекса методик относительно примеров фактических ДТП отобранных для оценки в исследовании.

Во всех сценариях, где имела место смена направления движения пешеходом к типовому индексу (столбец 7 таблицы 3.11) добавляется буква «Р», аналогично если имела место смена направления водителем – отворот руля, к индексу добавляется буква «В».

### 3.7. Выводы по Главе 3

1. При выполнении анализа полученных моделей перемещений по численным экспериментам учитывался показатель высотного соотношения передней кромки капота к высоте ЦТ бедра модели антропоморфного манекена (ГМАМ) –  $R_H$ , в м. Показатель  $R_H$  использовался при получении

зависимостей изменения AIS и НИС. Данный показатель позволил более точно учитывать геометрию контактной зоны, чем представление зависимостей по классам ТС, при анализе полученных данных по травмированию. Результаты применения ГМАМ и методики параметризации геометрии факторной группы А были использованы при разработке методики оценки риска травмирования в составе комплекса методик производства ДТЭ по ДТП с участием пешеходов.

2. Предложена методика расчета риска получения травм в оценке по шкале AIS, определены зависимости для расчета базового компонента риска. При этом впервые произведена оценка индексов травмирования от падения пострадавшего отдельно от индексов травмирования получаемых при ударе о ТС.

3. Использование предложенной логит-модели в конкретном факторном пространстве исследуемого ДТП позволяет получить оценку травмирования для различных соотношений действовавших факторов. В том числе может быть решена задача установления причинной связи между установленным превышением максимально допустимой по ПДД скорости движения водителем и полученными пешеходом или велосипедистом объемом телесных повреждений (политравмы в целом).

4. При выполнении анализа полученных моделей перемещений по численным экспериментам введен показатель высотного соотношения передней кромки капота к высоте ЦТ бедра модели антропоморфного манекена –  $R_H$ , в м. Данный показатель позволил более точно учитывать геометрию контактной зоны, чем представление зависимостей по классам ТС, при анализе полученных данные по травмированию.

5. Установлено, что замедления головы при вторичных ударах в различных сочетаниях варьируемых показателей в полученных моделях, в частности при случаях когда проекция на ось  $z$  вектора скорости головы направлена вниз, а угол вращения вертикальной оси пешехода находится во 2 квадранте, показывают их значительное преобладание над первичными, что в

большинстве случаев приводит к высоким значениям AIS (именно в результате вторичного травмирования (падения на проезжую часть).

6. Определены весовые коэффициенты для используемой в логит-модели вероятности получения тяжкого вреда или летального исхода, учитывающей скорость движения ТС, скорость движения пешехода, масса пешехода и высотное соотношение высоты передней кромки капота к высоте бедра в момент контакта.

## **ГЛАВА 4. КОМПЛЕКС МЕТОДИК ПРОИЗВОДСТВА ДТЭ ПО ДТП С УЧАСТИЕМ ПЕШЕХОДОВ**

### **4.1. Методика расчета затрат скорости на КСВ на базе суррогатных КЭМ**

В практике проведения дорожно-транспортных экспертиз (ДТЭ), использование конечно-элементных моделей (КЭМ) для оценки затрат энергии на деформации, а также при реализации процедур модельно-ориентированной реконструкции механизма ДТП по [9], на настоящий момент сильно ограничено. Это связано в первую очередь с узкой номенклатурой полных (основанных на САД модели геометрии ТС наиболее полно воспроизводящее серийное ТС) КЭМ, имеющейся в наличии для ДТЭ, что не позволяет при МОР работать с КЭМ конкретной марки и модельного ряда. Также малый объем применения КЭМ в ДТЭ, ограничивается сложностью построения модели удара, требующей больших временных затрат и наличия специального программного обеспечения, а также необходимостью обладания экспертом большого опыта работы с программными системами инженерного анализа на базе метода конечных элементов. В этой связи необходима разработка отдельной субпроцедуры МОР для формирования упрощенных, суррогатных КЭМ (СКЭМ) путем обобщения массово-габаритных параметров ТС и значений коэффициентов жесткости.

Ранее в [62,80] было показано существенное влияние на результаты ДТЭ качества съемки первичной пространственно-следовой информации с места ДТП и с объектов исследования (ТС). При этом отмечено, что МОР ДТП

Примерами применения упрощенных и полных КЭМ как на основе оболочечных, так и основе гибридных моделей могут послужить работы [139-145]. Однако широкого применения в практике ДТЭ в РФ они не нашли,

так как в большинстве своем показывают лишь базовые принципы решений и работают с КЭМ сильно упрощающими фактически условия контактно-следового взаимодействия. Кроме того, следует отметить слабую информированность экспертов по ДТЭ с данными работами, выявленную как сопутствующее явление при составлении анализов и обзоров в [62,80].

Таким образом, выделение предлагаемой методики в обособленный вид субпроцедуры при МОР обосновано рядом насущных для ДТЭ потребностей: снижения размерности КЭМ, расширением геометрической номенклатуры профилей контактной зоны при расчете затрат энергии на локальные зоны деформаций, необходимостью в ДТЭ наглядного сопряжения локализаций деформаций ТС между собой и с внешними объектами, в том числе и локализациями телесных повреждений пешехода и сокращения времени вычислений. Следует отметить, что существующие полноадекватные КЭМ (ПКЭМ) допускают моделирование ударного воздействия на весьма ограниченном типе кузовов. В общем доступе по исследовательским ресурсам NHTSA базовые модели для LS-Dyna включают всего 13 КЭМ (далее в скобках указаны года модельного ряда): Тойота Ярис, (2010), Хонда Аккорд (2014,2017), Шевролле Сильверадо (2007, 2014), Додж Караван (2007), Додж Неон (1996), Тойота Венза (2010), Тойота РАВ4 (1997), Форд Эксплорер (2003), Форд Таурус (2001), Форд Эконолайн (2007), Форд Ф250 (2006).

Учитывая предложенную методику параметризации геометрии факторной группы А (см. табл.1.3) для задач ДТЭ ДТП с участием пешеходов методику формирования суррогатной КЭМ можно представить в виде последовательности операций (субпроцедур) показанных на рис.4.1, где кластеризация по жесткости выполнялась путем иерархической кластеризации генетическим алгоритмом инструментами субприложений Matlab для Statistics and Machine Learning Toolbox. 3. Код программы на Python для формирования суррогатной КЭМ по рис.4.1 показан в Приложении Г.3.

Рисунок 4.1 иллюстрирует последовательность субпроцедур формирования суррогатной оболочечной конечно-элементной модели (КЭМ) для задач ДТЭ, ЭП ДТП и ПБ ТС и ЭДО. Математический аппарат включает следующие этапы:

1. 3D лазерное сканирование и формирование облака точек  
На этом этапе используется метод лазерного сканирования для получения точных геометрических данных автомобиля. Математически это описывается как набор точек в трёхмерном пространстве  $P = \{(x_i, y_i, z_i)\}_{i=1}^N$ , где N - количество точек. Для коррекции выборки применяются методы фильтрации (например, статистическое удаление выбросов) и сглаживания (например, метод наименьших квадратов для аппроксимации поверхности).

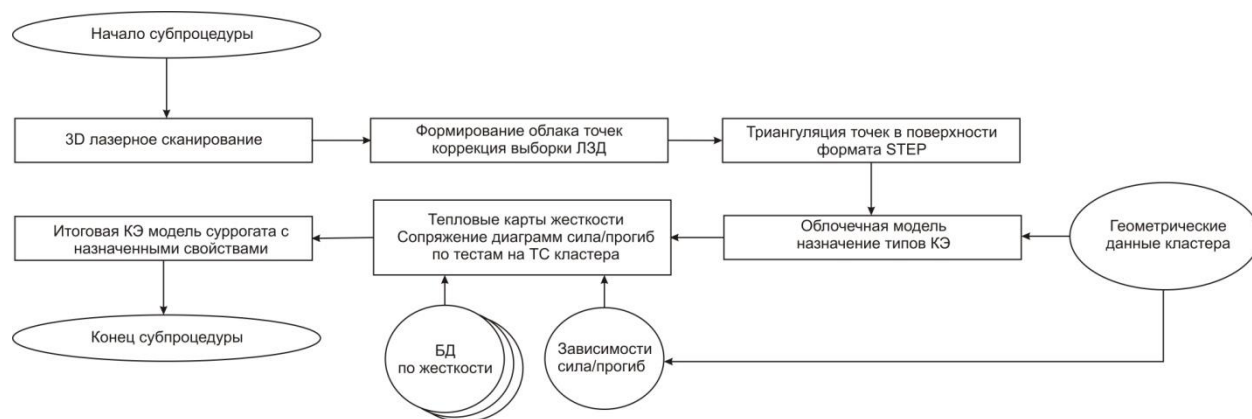


Рисунок 4.1 – Последовательность субпроцедур в ДТЭ при МОР по формированию суррогатной оболочечной КЭМ

2. Триангуляция точек в поверхности формата STEP  
Триангуляция выполняется с помощью алгоритмов минимизации образования «острых» треугольников. Математически это преобразует облако точек в сетку треугольников  $T = \{(v_{i1}, v_{i2}, v_{i3})\}_{i=1}^M$ , где  $v_{ij}$  - вершины треугольников. Формат STEP обеспечивает совместимость с широким спектром CAD-систем, имеющимся на рынке РФ.

3. Оболочечная модель и назначение типов конечных элементов (КЭ)  
Поверхность разбивается на оболочечные элементы (например, элементы типа Shell 181 в ANSYS). Жёсткость элементов задаётся через матрицу

жёсткости  $K_e$ , которая зависит от модуля Юнга  $E$ , коэффициента Пуассона  $\nu$  и толщины элемента  $t$ . Для параметризации используются данные из таблицы 3.11 (например, средние значения углов и высот).

4. Итоговая КЭ модель суррогата с назначенными свойствами. На этом этапе применяются данные из баз данных [146,147], где коэффициенты жёсткости (модуль Юнга  $E$  и коэффициент Гука) назначаются элементам модели. Для кластеров используется метод Уорда, который минимизирует дисперсию внутри кластеров:

$$\Delta(A, B) = \frac{|A| \cdot |B|}{|A| + |B|} \cdot \|\mu_A - \mu_B\|^2, \quad (4.1)$$

где  $\mu_A$  и  $\mu_B$  - центроиды кластеров  $A$  и  $B$ . Результатом является суррогатная модель, которая аппроксимирует поведение реального автомобиля.

5. Тепловые карты жёсткости и сопряжение диаграмм сила/прогиб. Тепловые карты строятся на основе распределения модуля Юнга  $E$  по модели. Для сопряжения с экспериментальными данными (например, тестами NHTSA) используется метод наименьших квадратов для минимизации разницы между расчётными и экспериментальными значениями.

Методика демонстрирует высокий потенциал для применения в ДТЭ, особенно в условиях ограниченных временных ресурсов и необходимости быстрого получения точных результатов. При этом она может быть экстраполирована на построение СКЭМ для различных видов столкновений и наездов на препятствие.

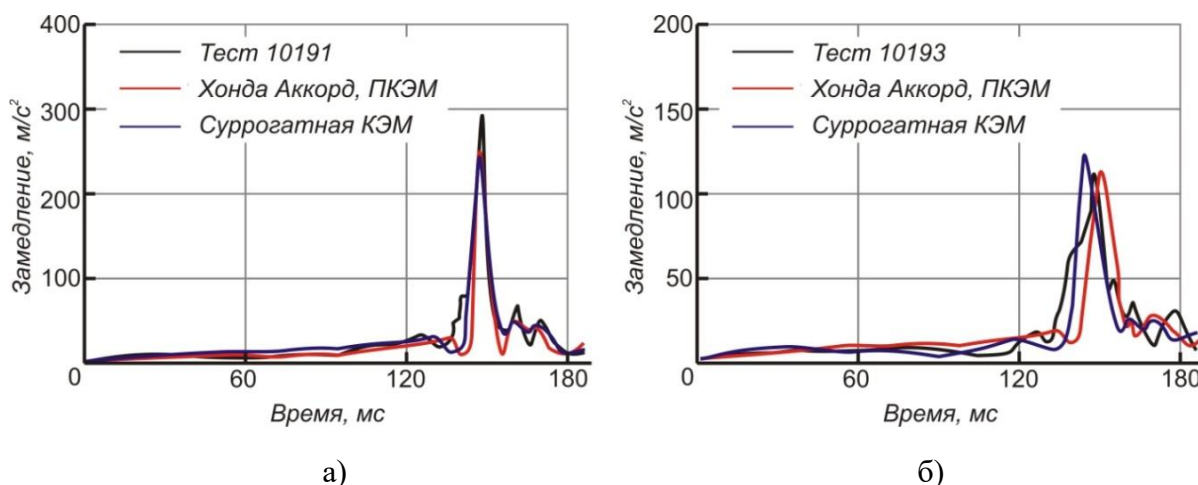


Рисунок 4.2 – Результаты сравнения ПКЭМ с суррогатной КЭМ:  
а) фронтальный удар; б) – боковой удар

Сравнение результатов применения ПКЭМ и суррогатной КЭМ оболочечной КЭМ с назначением свойств по методике параметризации жесткости аналогичной изложенной выше методике параметризации геометрии приводилось к выбранным тестам NHTSA (10 с АМ типа Polar-2 и 2 с кадаврами – см. также Приложение Б), на рис.4.2 показан пример сходимости расчетных и фактических значений суммарного замедления на ЦТ ТС относительно двух тестов.

Предложенная методика показала для задач ДТЭ погрешность расчета по скорости ТС на КСВ до  $\pm 3$  км/ч, при снижении времени расчета в среднем на 50%. Применение методики расчета затрат скорости на КСВ на базе суррогатных КЭМ при определении фактической скорости ТС в момент наезда на пешехода позволило получить сходимость конечной ЦМ ДТП в МОР с результатами расчета скорости по видеозаписям с ошибкой не более 5%, при этом имело место снижение затрат времени на производство ДТЭ в среднем до 18%.

#### 4.2. Методика расчета риска травмирования

С учетом данных полученных в ходе численного моделирования с использованием ГМАМ были определены:

– зависимость изменения значения индекса AIS от скорости в момент наезда для пешеходов при первичном травмировании (коэффициент детерминации  $R^2 = 0,921$ )

$$AIS = 2,09651e^{0,0154V} \quad (4.2)$$

– зависимость изменения значения индекса AIS от скорости в момент наезда для пешеходов при вторичном травмировании (коэффициент детерминации  $R^2 = 0,908$ )

$$AIS = 1E-05V^3 - 0,0017V^2 + 0,0738V + 1,6297 \quad (4.3)$$

Для оценки травмирования при вторичном ударе (падении) при сравнении случаев движения с различными скоростями (например: с

фактической и с максимально допустимой) по результатам моделирования были использованы следующие переменные: скорость движения ТС, скорость движения пешехода, масса пешехода и  $R_H$ .

Пример фрагмента текста Заключения по ДТЭ с расчетом ИТ и оценкой наличия причинно-следственной связи между превышением скорости движения и тяжестью ТП полученных пешеходом (данный пример также в данной главе включен в таблицу 4.1, строка 5):

С технической точки зрения, учитывая выполненные расчеты и результаты моделирования, даже при решении задачи реконструкции перемещений ОИ в минимальных значениях, установленное превышение максимально допустимой в данной ДТС скорости движения ТС на 44,5 км/ч ( $104,5 - 60 = 44,5$  км/ч) находится в причинной связи с данным ДТП, а именно: если бы до ДТП водитель «А» двигался бы со скоростью не более 60 км/ч, то данное ДТП не имело бы места, так как при этом пешеход успевал бы покинуть полосу движения а/м.

Индекс травмирования AIS в момент наезда (первичное КСВ) при ударе о ТС, при фактической скорости движения а/м марки А,  $V_A = 104,5$  км/ч составил бы:

$$AIS = 2,09651e^{0,0154 \cdot 104,5} = 10,5$$

При максимально допустимой скорости движения  $V_D$  равной 60 км/ч, индекс травмирования AIS составил бы:

$$AIS = 2,09651e^{0,0154 \cdot 60} = 5,28$$

Соответственно индекс травмирования AIS при падении тела (вторичное КСВ) при фактической скорости движения а/м марки А в момент наезда,  $V_A = 104,5$  км/ч составил бы:

$$AIS = 0,00001(104,5)^3 - 0,0017(104,5)^2 + 0,0738 \cdot 104,5 + 1,6297 = 2,2$$

При максимально допустимой скорости движения  $V_D$  равной 60 км/ч, индекс травмирования AIS составил бы:

$$AIS = 0,00001(60)^3 - 0,0017(60)^2 + 0,0738(60) + 1,6297 = 1,95$$

Таким образом, первичный индекс травмирования AIS пешехода «Б» при максимально допустимой скорости движения при ударе об а/м марки А был бы ниже фактического в 2 раза ( $10,5/5,28 = 1,988$ ), а индекс вторичного травмирования при ударе о покрытие (при падении) был бы ниже в 1,1 раза ( $2,2/1,95 = 1,1$ ).

Это с технической точки зрения означает, что превышение максимально допустимой скорости на 44,5 км/ч, допущенное водителем «А» находится в причинной связи с полученным объемом (тяжестью) травм пешеходом «Б». Полученное, позволяет также не исключить, что при максимально допустимой скорости движения равной 60 км/ч, при ударе об а/м марки А и при падении после него пешеход «Б» мог получить тяжесть травм ниже летального порога (AIS=6).

Это означает, что двигаясь со скоростью движения не менее  $V_A \approx 104,5$  км/ч водитель а/м марки А сам поставил себя в такие условия, когда рабочая ситуация дорожного движения стала для него нерабочей, т.е. аварийной и требующей выполнения требований п.10.1ч.2 Правил дорожного движения РФ. Следовательно, в данной ДТС, действия водителя «А» не соответствовали требованиям пп.1.3, 1.5, 10.1, 10.2 Правил дорожного движения РФ.

Далее, в ходе статистического моделирования в программном обеспечении MatLab с использованием процедуры SurveyLogistic, которая учитывает весовые коэффициенты выборки и обеспечивает результаты отношения шансов (OR – odds ratio) серьезных травм в зависимости от различных указанных факторов риска, была получена следующая зависимость расчета вероятности получения тяжкого вреда или летального исхода:

$$p = -8,897 + 0,032V_A + 0,013V_{\Pi} + 0,027m_{\Pi} + 5,798R_H \quad (4.4)$$

где  $V_A$  – скорость движения ТС в момент наезда, км/ч;  $V_{\Pi}$  – скорость движения пешехода, км/ч;  $m_{\Pi}$  – масса пешехода в кг;  $R_H$  – высотное соотношение высоты передней кромки капота к высоте бедра в момент

контакта, м. Код программы на языке Python для методики расчета риска травмирования приведен в Приложении Г.4.

Таблица 4.1 – Сводная таблица применения расчетов по формулам 4.1–4.3 для задач А1, А2, Б, В и Г

| Индекс задачи по табл. 2.7 | Скорость ТС (км/ч) | Скорость пешехода (км/ч) | Масса пешехода (кг) | R <sub>Н</sub> (м) | AIS (первичное) по (4.1) | AIS (вторичное) по (4.2) | Вероятность тяжкого вреда/летального исхода по (4.3) | Вывод                                                                                    |
|----------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| A1                         | 58,7               | 5,2                      | 70                  | 0,45               | 5,42                     | 1,93                     | 0,78                                                 | При скорости 58,7 км/ч первичное травмирование (AIS = 5,42) близко к летальному порогу   |
| A1                         | 62,3               | 4,8                      | 65                  | 0,50               | 5,92                     | 1,97                     | 0,82                                                 | Увеличение скорости до 62,3 км/ч повышает AIS до 5,92, что увеличивает риск тяжких травм |
| A1                         | 67,5               | 6,1                      | 75                  | 0,48               | 6,64                     | 2,05                     | 0,88                                                 | При 67,5 км/ч AIS=6,64 превышает летальный порог, подтверждая высокий риск               |
| A1                         | 71,2               | 5,5                      | 68                  | 0,52               | 7,12                     | 2,10                     | 0,91                                                 | Скорость 71,2 км/ч приводит к критическому AIS = 7,12                                    |
| A1                         | 76,8               | 5,0                      | 72                  | 0,47               | 7,89                     | 2,18                     | 0,95                                                 | AIS=7,89 указывает на почти гарантированный летальный исход                              |
| A2                         | 59,4               | 5,3                      | 74                  | 0,49               | 5,50                     | 1,94                     | 0,79                                                 | Скорость 59,4 км/ч дает AIS = 5,50, что близко к критическому значению                   |
| A2                         | 63,7               | 4,7                      | 67                  | 0,51               | 6,05                     | 1,98                     | 0,84                                                 | При 63,7 км/ч AIS = 6,05 превышает летальный порог                                       |
| A2                         | 68,9               | 5,9                      | 71                  | 0,46               | 6,82                     | 2,07                     | 0,89                                                 | AIS = 6,82 подтверждает высокую тяжесть травм                                            |

Продолжение таблицы 4.1

| Индекс задачи по табл. 2.7 | Скорость ТС (км/ч) | Скорость пешехода (км/ч) | Масса пешехода (кг) | R <sub>H</sub> (м) | AIS (первичное) по (4.1) | AIS (вторичное) по (4.2) | Вероятность тяжкого вреда/летального исхода по (4.3) | Вывод                                                                      |
|----------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| A2                         | 72,5               | 5,2                      | 69                  | 0,53               | 7,30                     | 2,12                     | 0,92                                                 | При 72,5 км/ч AIS=7,30 указывает на крайне тяжелые последствия             |
| A2                         | 78,1               | 4,9                      | 73                  | 0,50               | 8,10                     | 2,20                     | 0,96                                                 | AIS=8,10 демонстрирует почти неизбежный летальный исход                    |
| Б                          | 57,2               | 5,1                      | 70                  | 0,47               | 5,30                     | 1,92                     | 0,76                                                 | Вторичное травмирование при 57,2 км/ч дает AIS=1,92, что ниже критического |
| Б                          | 61,5               | 4,6                      | 66                  | 0,52               | 5,80                     | 1,96                     | 0,81                                                 | При 61,5 км/ч вторичный AIS=1,96 остается ниже порога тяжелых травм        |
| Б                          | 66,8               | 5,8                      | 74                  | 0,49               | 6,50                     | 2,03                     | 0,87                                                 | AIS=2,03 при 66,8 км/ч показывает умеренный риск                           |
| Б                          | 70,4               | 5,3                      | 67                  | 0,54               | 7,00                     | 2,09                     | 0,90                                                 | Вторичный AIS=2,09 при 70,4 км/ч указывает на рост тяжести травм           |
| Б                          | 75,6               | 4,8                      | 71                  | 0,48               | 7,75                     | 2,16                     | 0,94                                                 | При 75,6 км/ч вторичный AIS=2,16 приближается к опасным значениям          |
| В                          | 56,8               | 5,4                      | 69                  | 0,46               | 5,25                     | 1,91                     | 0,75                                                 | Вторичное травмирование при 56,8 км/ч: AIS=1,91, риск минимален            |
| В                          | 60,3               | 4,5                      | 72                  | 0,51               | 5,70                     | 1,95                     | 0,80                                                 | AIS=1,95 при 60,3 км/ч остается в безопасных пределах                      |

| Индекс задачи по табл.2.7 | Скорость ТС (км/ч) | Скорость пешехода (км/ч) | Масса пешехода (кг) | R <sub>н</sub> (м) | AIS (первичное) по (4.1) | AIS (вторичное) по (4.2) | Вероятность тяжкого вреда/летального исхода по (4.3) | Вывод                                                                 |
|---------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| В                         | 65,7               | 5,7                      | 68                  | 0,50               | 6,35                     | 2,01                     | 0,86                                                 | При 65,7 км/ч вторичный AIS=2,01 показывает умеренную опасность       |
| В                         | 69,2               | 5,0                      | 70                  | 0,55               | 6,85                     | 2,08                     | 0,89                                                 | AIS=2,08 при 69,2 км/ч указывает на рост риска.                       |
| В                         | 74,9               | 4,7                      | 73                  | 0,49               | 7,65                     | 2,15                     | 0,93                                                 | При 74,9 км/ч вторичный AIS=2,15 приближается к критическим значениям |
| Г                         | 58,1               | 5,6                      | 71                  | 0,44               | 5,38                     | 1,93                     | 0,77                                                 | Действия пешехода при 58,1 км/ч: AIS=5,38, высокий риск               |
| Г                         | 62,8               | 4,9                      | 64                  | 0,53               | 5,95                     | 1,97                     | 0,83                                                 | При 62,8 км/ч AIS=5,95 превышает летальный порог                      |
| Г                         | 67,1               | 6,0                      | 76                  | 0,47               | 6,60                     | 2,04                     | 0,88                                                 | AIS=6,60 указывает на крайне тяжелые последствия                      |
| Г                         | 71,8               | 5,4                      | 67                  | 0,56               | 7,25                     | 2,11                     | 0,91                                                 | При 71,8 км/ч AIS=7,25 подтверждает летальный риск                    |
| Г                         | 77,3               | 5,1                      | 72                  | 0,48               | 8,05                     | 2,19                     | 0,95                                                 | AIS=8,05 демонстрирует неизбежность тяжких последствий                |

С целью проверки практического применения реализации в Приложении Г.4 были отобраны 25 примеров фактических ДТП, из базы

ИБДД, выполненных в рамках уголовных дел с участием пешеходов в период с 2019 по 2024 годы. Из них, были отобраны на каждую типовую задачу (таблица 2.9) было выбрано по 5 ДТЭ. Результаты показаны в таблице 4.1.

В результате применения методики расчета риска травмирования в практике производства ДТЭ, установлено что при решении типовых (индексированных) задач А1, А2, Б, В, Г объем вероятностных и условных выводов в ДТЭ снижется до нуля при применении метода в МОР.

Приведенные примеры кроме того, наглядно демонстрируют, что увеличение скорости транспортного средства напрямую влияет на тяжесть травм пешехода. При первичном травмировании (задачи А1 и А2) значения AIS быстро достигают и превышают летальный порог ( $AIS=6$ ) уже при скоростях выше 60 км/ч, что подтверждает критическую опасность превышения допустимых скоростей. Для вторичного травмирования (задачи Б и В) зависимость менее выражена, но также наблюдается рост AIS с увеличением скорости, особенно заметный при значениях выше 70 км/ч.

Результаты для задачи Г показывают, что действия пешехода (например, подпрыгивание или приседание) в сочетании с высокой скоростью ТС значительно увеличивают риск тяжких травм или летального исхода. Вероятность тяжкого вреда, рассчитанная по формуле 4.3, достигает 95% при скоростях выше 75 км/ч, что подчеркивает необходимость строгого соблюдения скоростного режима для снижения риска ДТП. Таким образом, применение методик 4.1-4.3 позволяет объективно оценить причинно-следственные связи и минимизировать субъективные выводы в ДТЭ.

#### **4.3. Методика оптимизации цифровой модели механизма ДТП выполненной при МОР генетическим алгоритмом**

Оптимизация выполнялась для факторных групп: С, D, E и F (см. таблицу 1.3). В процессинге МОР осуществлялась передача результатов

симуляции (пространства значений выходных показателей ЦМ механизма ДТП) в виде табличных данных в предварительно настроенную процедуру Global Optimization Toolbox совместно с Genetic Algorithm Toolbox в Matlab. Однако данный способ показал большие временные затраты для выбора решения, в этой связи была разработана программа на языке Python для внедрения возможности параллельных вычислений и возможности сравнения с другими методами оптимизации.

В Приложении Г.5 показанный код разработанной программы, который реализует три метода оптимизации: генетический алгоритм (GA), метод Монте-Карло (MC) и итерационный метод (координатный спуск). Рассмотрим особенности реализации каждого цикла оптимизации пошагово.

### 1. Генетический алгоритм (GA).

Цикл оптимизации:

1.1. Инициализация популяции: создается начальная популяция из 50 индивидов (`population_size`). Каждый индивид представляет собой набор параметров (значения из `bounds`), закодированных как список вещественных чисел.

1.2. Оценка приспособленности: для каждого индивида вызывается `evaluate_model()`, который преобразует индивида в словарь параметров (`individual_to_params()`) и передает параметры в модель Simulink через MATLAB Engine, после чего получает результат моделирования (оценку травматизма) как значение приспособленности (`fitness`).

1.3. Селекция: используется турнирная селекция (`selTournament` с размером турнира 3). Особи с лучшими значениями `fitness` имеют больше шансов быть выбранными для размножения.

1.4. Кроссовер (рекомбинация): выбранные особи подвергаются кроссоверу с вероятностью 70% (`cx_prob`). Используется смешивающий кроссовер (`cxBlend`), который создает потомков как линейную комбинацию родителей.

1.5. Мутация: Особи подвергаются гауссовской мутации с вероятностью 20% (`mut_prob`). Мутация добавляет случайное значение из нормального распределения ( $\sigma=1$ ) к каждому параметру.

1.6. Замена популяции: новое поколение полностью заменяет старое (стратегия `eaSimple`). Лучшие особи могут сохраняться (элитизм неявно присутствует благодаря селекции).

1.7. Сбор статистики: на каждом поколении записываются статистики: `min`, `avg` и `max fitness`. Критерий остановки: алгоритм выполняется для 30 поколений (`generations`). После завершения возвращается лучший индивид и лог оптимизации.

1.8. Параллелизация вычислений: Оценка `fitness` выполняется параллельно через `multiprocessing.Pool`. MATLAB Engine запускает модель Simulink в отдельных процессах.

## 2. Метод Монте-Карло (MC).

Цикл оптимизации:

2.1. Инициализация: лучшие параметры инициализируются как `None`. Лучшее значение `fitness` устанавливается как  $+\infty$ .

2.2. Случайный поиск: для 1000 итераций (`iterations`) генерируется случайный набор параметров (`params`) в заданных границах. Вычисляется `fitness` через `evaluate_model()`. Если `fitness` лучше текущего лучшего, обновляются `best_params` и `best_fitness`.

2.3. Сохранение истории: на каждой итерации параметры и `fitness` сохраняются в `param_history` и `fitness_history`. Каждые 10 итераций сохраняется кадр для анимации (`save_mc_frame()`).

2.4. Визуализация: после завершения создается анимация из сохраненных кадров (`create_optimization_animation()`).

Особенности: нет направленного поиска – только случайные пробы, эффективен для исследования всего пространства параметров.

## 3. Итерационный метод (координатный спуск)

Цикл оптимизации:

3.1. Инициализация: начальная точка – средние значения границ параметров. Вычисляется начальный fitness.

3.2. Поиск по координатам: для 100 итераций (iterations): перебираются все параметры по очереди, для каждого параметра пробуются: увеличение значения на  $\text{step\_size} * \text{диапазон}$  и уменьшение значения на  $\text{step\_size} * \text{диапазон}$ . Если изменение приводит к улучшению fitness, принимается новое значение.

3.3. Адаптация шага: если улучшений нет, шаг уменьшается ( $\text{step\_size} *= 0.9$ ).

3.4. Сохранение истории: на каждой итерации сохраняются параметры и fitness. Каждые 5 итераций сохраняется кадр для анимации.

Особенности: локальный метод, чувствительный к начальной точке. Быстро сходится вблизи оптимума, но может застревать в локальных минимумах.

#### 4. Общий цикл взаимодействия с моделью Simulink

Для всех методов оценка fitness происходит через `evaluate_model()`, а именно преобразование параметров: Индивид (список значений) → словарь параметров (например, {'A1': 15.2, 'B1': 70.5 и т.д.}). Вызов модели Simulink, где параметры передаются в MATLAB как структура. Далее запускается модель `PedCrash` с этими параметрами. После получения результата: модель возвращает скалярное значение (например, уровень травматизма 0..1). Это значение используется как fitness (чем меньше, тем лучше).

5. Визуализация и сравнение. После выполнения всех методов отображаются: тепловая карта - показывает корреляции между параметрами на основе всех проб. Доступны стили: `seaborn`, `plotly` и другие.

6. Сравнение методов отображается путем построения графика сходимости (fitness vs итерации/поколения) для всех методов. Для GA используется лог поколений, для МС и итерационного – история fitness.

7. Анимации показывают изменение параметров и fitness в процессе оптимизации. Для МС и итерационного метода создаются GIF-анимации.

Ключевые особенности реализации показанной в Приложении Г.5:

Возможность параллелизации, в ГА оценка fitness параллельно осуществляется через multiprocessing.Pool. MATLAB Engine: каждый вызов модели выполняется в отдельном процессе. Код обладает гибкостью реализации, а именно границы параметров и настройки алгоритмов задаются в setup\_parameters(), а также можно легко добавлять новые методы оптимизации.

В качестве примеров были 12 фактических ДТЭ, где скорость ТС либо неопределялась, либо рассчитывалась по отбросу тела. Сводные данные по выбранным примерам и по результатам оптимизации позы пешехода при поиске минимума ошибки между КПОИ фактическим и по ЦМ показаны в таблице 4.2. Прочерк (-) в ячейках таблицы означает, что скорость ТС не рассчитывалась по действующим методам. При этом позиция тела к КП привязывалась по трем точкам туловища, в отличие от обычной проверки смещения КП модели от КП фактического только по центру масс.

Таблица 4.2 – Сводные данные по выбранным примерам и по результатам оптимизации позы пешехода

| № примера | Сценарий сближения по таблице 3.9 | Расчетная скорость действующими методами (км/ч) | Скорость ТС по ЦМ (км/ч) | Скорость пешехода по ЦМ (км/ч) | Результат оптимизации походки |                  |                      |
|-----------|-----------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------|----------------------|
|           |                                   |                                                 |                          |                                | Поперечное смещение (м)       | Доля походки (%) | Скорость пеш. (км/ч) |
| 1         | ПЛ1                               | –                                               | 63,5                     | 6,5                            | 0,404                         | 11,1             | 6,5                  |
| 2         | ПЛ1                               | –                                               | 66,3                     | 6,0                            | 0,411                         | 43,4             | 6,0                  |
| 3         | ПЛ2                               | 72,5                                            | 116,2                    | 4,9                            | 0,383                         | 18,2             | 4,9                  |
| 4         | ПЛ2                               | –                                               | 64,2                     | 5,7                            | 0,404                         | 26,3             | 5,6                  |
| 5         | ПП1                               | 62,2                                            | 76,2                     | 4,9                            | 0,411                         | 55,6             | 4,9                  |
| 6         | ПП1                               | 56,5                                            | 70,4                     | 6,9                            | 0,418                         | 43,4             | 7,0                  |
| 7         | ПФ1                               | –                                               | 112,6                    | 6,6                            | 0,390                         | 46,5             | 6,6                  |
| 8         | ПФ1                               | 89,7                                            | 97,6                     | 4,9                            | 0,411                         | 73,7             | 4,9                  |
| 9         | ПБ1                               | –                                               | 74,3                     | 5,5                            | 0,418                         | 13,1             | 5,5                  |
| 10        | ПБ1                               | –                                               | 63,2                     | 5,9                            | 0,404                         | 86,9             | 5,9                  |
| 11        | КЛЛ1                              | –                                               | 74,1                     | 5,9                            | 0,418                         | 77,8             | 5,9                  |
| 12        | КЛЛ1                              | 82,7                                            | 96,7                     | 5,4                            | 0,411                         | 64,6             | 5,4                  |

На рисунках 4.3–4.14 показаны примеры итоговых изолний при минимизации ошибки расположения КПОИ (по трем точкам туловища) оптимизации позы пешехода в момент начала КСВ по набору факторов из групп С и Е (группа факторов стадий КСВ – отброс – КП и группа факторов травмирования).

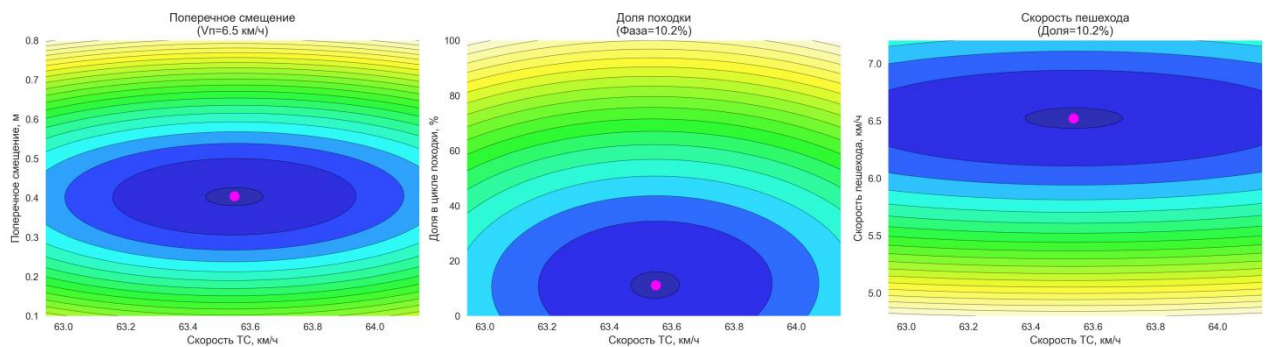


Рисунок 4.3 – Изолинии минимизации ошибки по КПОИ для примера 1

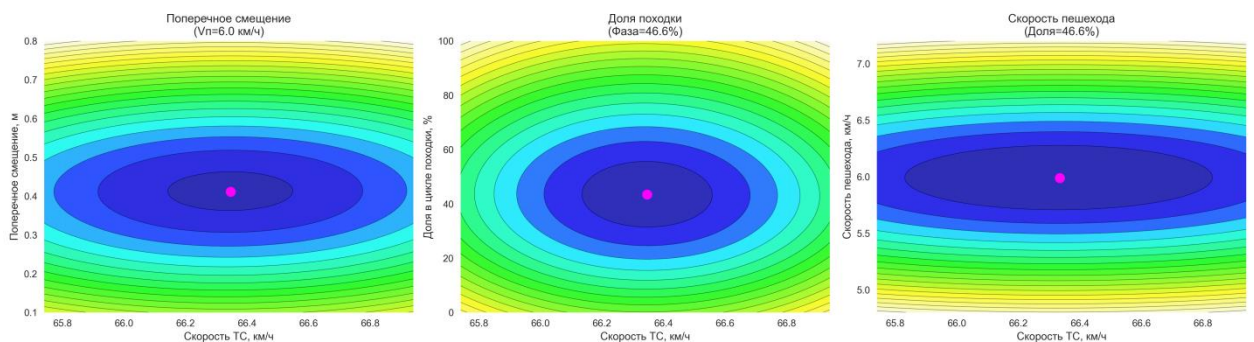


Рисунок 4.4 – Изолинии минимизации ошибки по КПОИ для примера 2

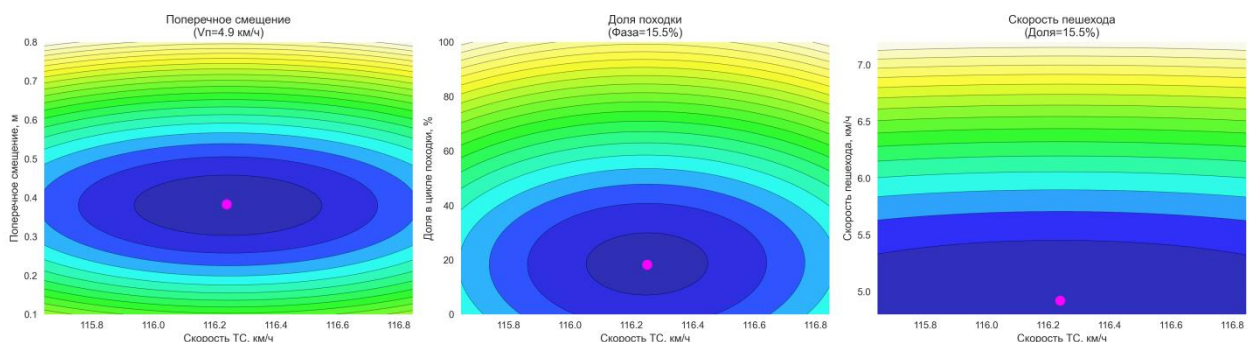


Рисунок 4.5 – Изолинии минимизации ошибки по КПОИ для примера 3

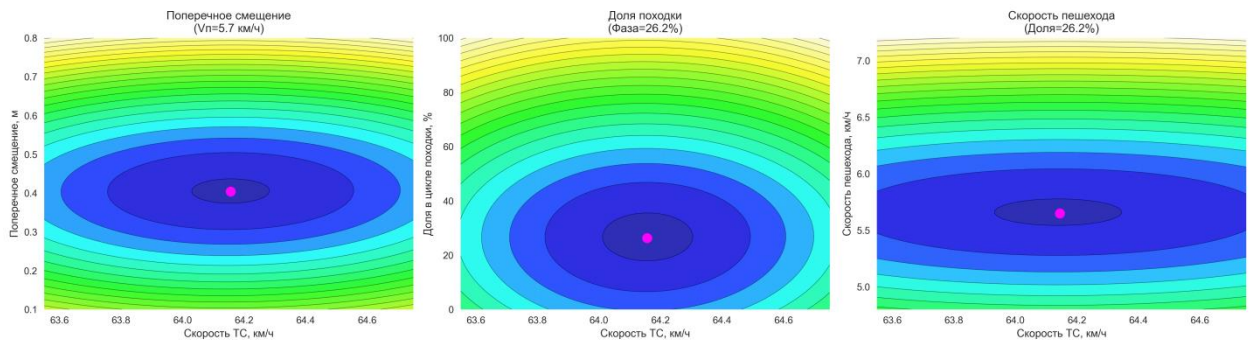


Рисунок 4.6 – Изолинии минимизации ошибки по КПОИ для примера 4

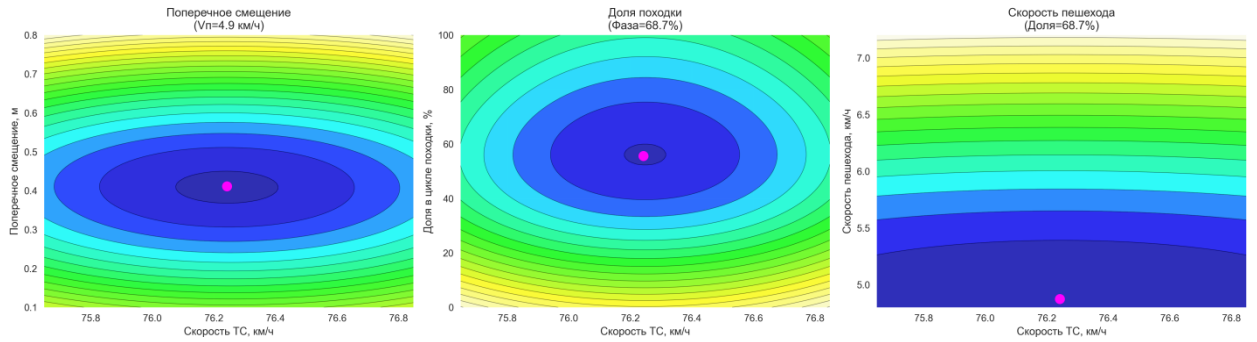


Рисунок 4.7 – Изолинии минимизации ошибки по КПОИ для примера 5

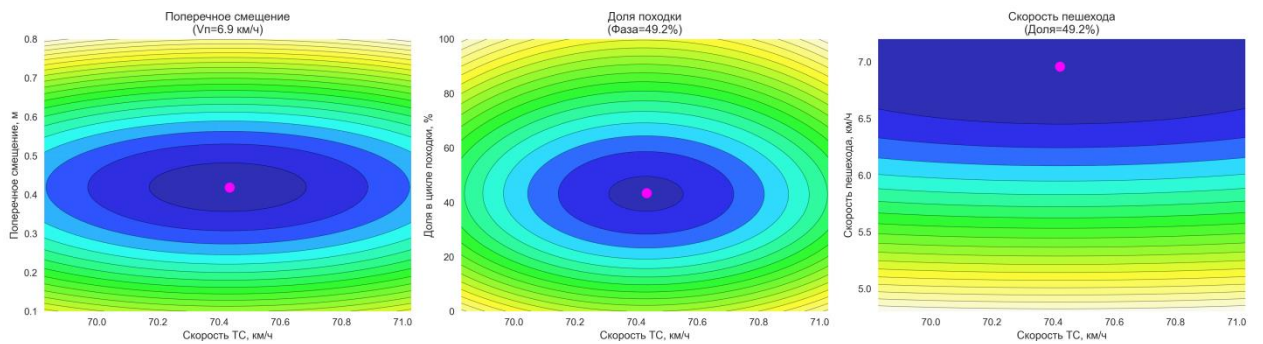


Рисунок 4.8 – Изолинии минимизации ошибки по КПОИ для примера 6

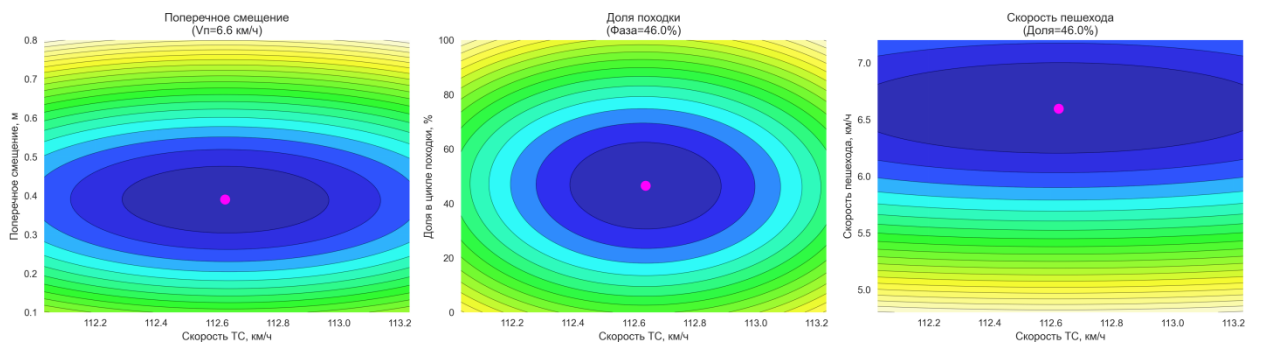


Рисунок 4.9 – Изолинии минимизации ошибки по КПОИ для примера 7

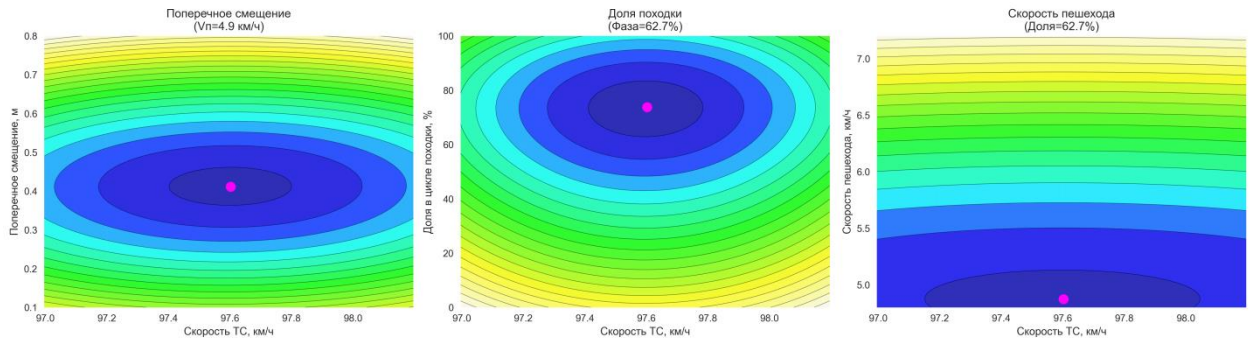


Рисунок 4.10 – Изолинии минимизации ошибки по КПОИ для примера 8

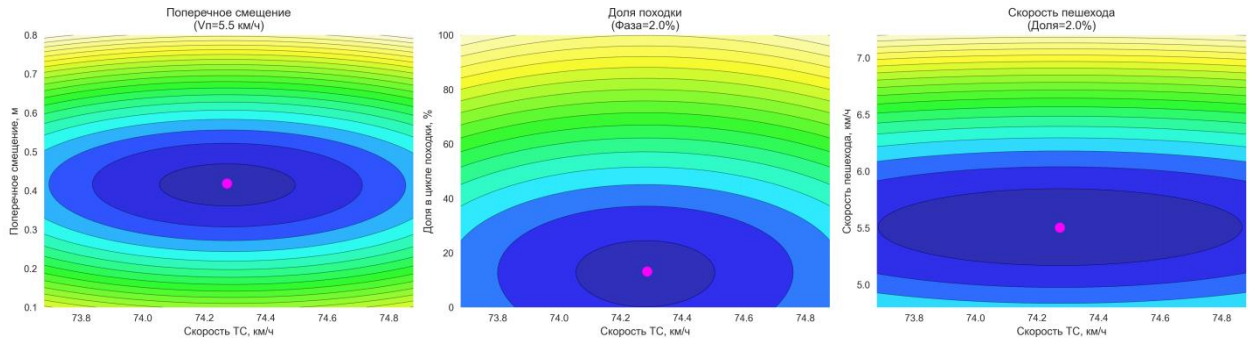


Рисунок 4.11 – Изолинии минимизации ошибки по КПОИ для примера 9

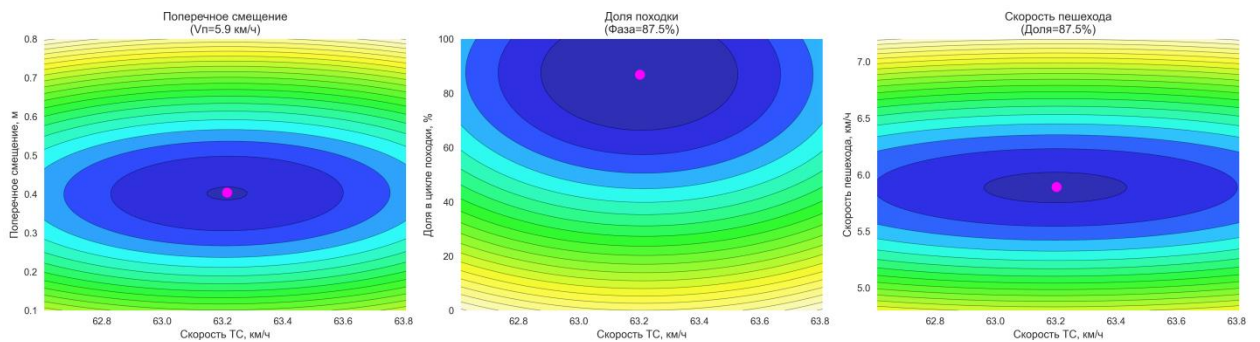


Рисунок 4.12 – Изолинии минимизации ошибки по КПОИ для примера 10

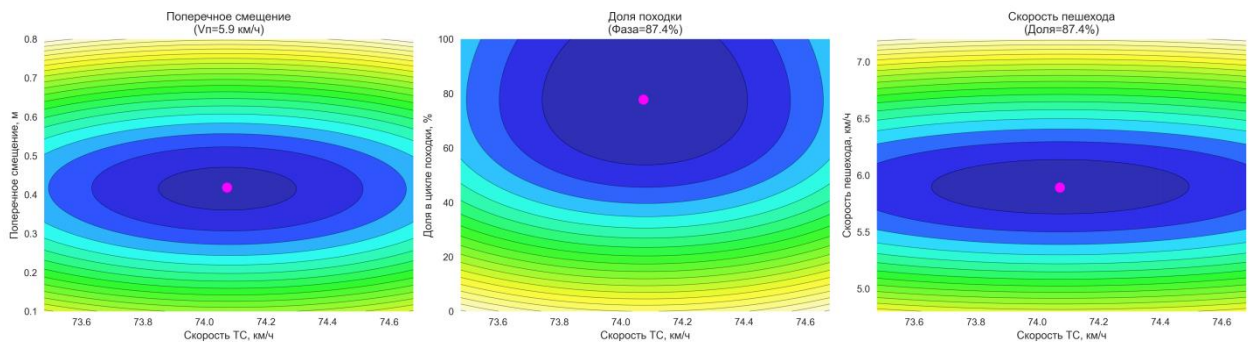


Рисунок 4.13 – Изолинии минимизации ошибки по КПОИ для примера 11

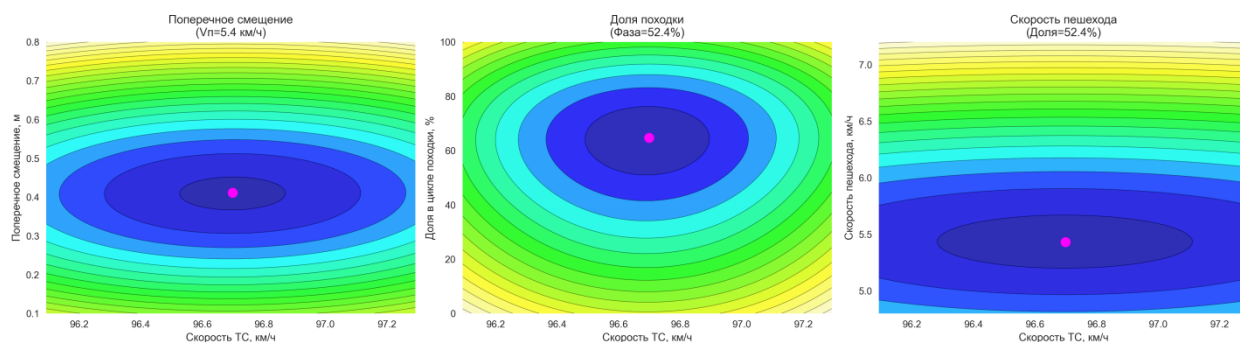


Рисунок 4.14 – Изолинии минимизации ошибки по КПОИ для примера 12

При применении в МОР методики оптимизации цифровой модели механизма ДТП на основе генетического алгоритма установлено, что площади областей вариативных значений ЦМ могут быть уменьшены на 87%, при сравнении с методами итерационной оптимизации и методом Монте-Карло [148,149].

В общем виде, под коэволюционными алгоритмами понимается система взаимодействующих между собой генетических алгоритмов, образующих множество популяций индивидов-решений. Согласно [150,151] коэволюционный генетический алгоритм (КГА) является представителем мультиалгоритмического подхода в классе эволюционных алгоритмов.

Для задач связанных с установлением места наезда на пешехода, области занимаемые вертикально накладываемыми популяциями сужаются по одной из осей до ширины коридора перемещения локальной зоны деформаций (контактной зоны) ТС, в частности рис.4.15 показан пример кооперативного вертикального наложения областей популяций для задачи сужения расчетной области фактического контакта ТС с пешеходом.

Для случаев анализа эффективности предлагаемого метода были отобраны 30 ДТП (соответственно по 10 перекрестных наездов на пешехода, попутных и встречных наездов на пешехода) в которых место контакта (наезда) было определено как область большой площади, внесение которой в масштабную схему места ДТП не позволило дать категоричный вывод о положении точки начала КСВ (в частности область расположена частично в зоне пешеходного перехода и/или частично за пределами проезжей части (на обочине)).

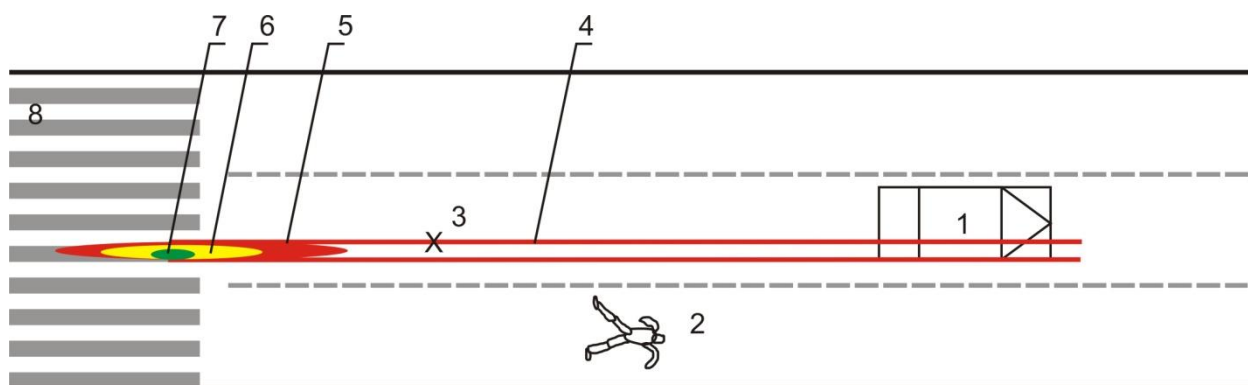


Рисунок 4.15 – Типовой расчетный случай, принятый за базовый для исследования. На рисунке обозначено: 1 – конечное после ДТП положение автомобиля; 2 – конечное после ДТП положение тела пострадавшего; 3 – место указанное на схеме ДТП водителем; 4 – границы коридора перемещений локальной зоны деформаций автомобиля; 5 – расчетная область, подлежащая оптимизации; 6 – популяционная область в ходе оптимизации; 7 – получаемая оптимизированная область; 8 – пешеходный переход.

Таблица 4.3 – Результаты оценки эффективности методик

| №  | Вид наезда   | оптимизация по действующим методикам      |                                    |                       | оптимизация КГА с вертикальным наложением популяций |                                    |                       |
|----|--------------|-------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|
|    |              | площадь расчетной области, м <sup>2</sup> | категоричность полученного решения | t <sub>др</sub> , мин | площадь расчетной области, м <sup>2</sup>           | категоричность полученного решения | t <sub>др</sub> , мин |
| 1  | перекрестный | 8,1                                       | Нет                                | 16                    | 3,3                                                 | Да                                 | 9                     |
| 2  |              | 12,4                                      | Нет                                | 24                    | 3,5                                                 | Да                                 | 14                    |
| 3  |              | 6,7                                       | Нет                                | 12                    | 2,4                                                 | Да                                 | 5                     |
| 4  |              | 8,8                                       | Нет                                | 15                    | 2,7                                                 | Да                                 | 6                     |
| 5  |              | 14,6                                      | Нет                                | 26                    | 3,7                                                 | Да                                 | 8                     |
| 6  |              | 5,6                                       | Нет                                | 11                    | 1,2                                                 | Да                                 | 6                     |
| 7  |              | 7,3                                       | Нет                                | 16                    | 3,2                                                 | Да                                 | 6                     |
| 8  |              | 4,2                                       | Нет                                | 8                     | 1,6                                                 | Да                                 | 4                     |
| 9  |              | 4,6                                       | Нет                                | 9                     | 1,5                                                 | Да                                 | 4                     |
| 10 |              | 3,1                                       | Нет                                | 7                     | 1,2                                                 | Да                                 | 3                     |
| 11 | попутный     | 12,4                                      | Нет                                | 27                    | 3,4                                                 | Да                                 | 12                    |
| 12 |              | 14,6                                      | Нет                                | 30                    | 4,4                                                 | Да                                 | 13                    |
| 13 |              | 18,9                                      | Нет                                | 32                    | 3,8                                                 | Да                                 | 14                    |
| 14 |              | 11,1                                      | Нет                                | 24                    | 2,8                                                 | Да                                 | 11                    |
| 15 |              | 21,5                                      | Нет                                | 36                    | 3,9                                                 | Да                                 | 18                    |

| №  | Вид наезда | оптимизация по действующим методикам      |                                    |                       | оптимизация КГА с вертикальным наложением популяций |                                    |                       |
|----|------------|-------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|
|    |            | площадь расчетной области, м <sup>2</sup> | категоричность полученного решения | t <sub>др</sub> , мин | площадь расчетной области, м <sup>2</sup>           | категоричность полученного решения | t <sub>др</sub> , мин |
| 16 | попутный   | 13,7                                      | Нет                                | 30                    | 2,4                                                 | Да                                 | 15                    |
| 17 |            | 14,8                                      | Нет                                | 30                    | 3,5                                                 | Да                                 | 15                    |
| 18 |            | 8,9                                       | Нет                                | 17                    | 1,8                                                 | Да                                 | 8                     |
| 19 |            | 7,6                                       | Нет                                | 16                    | 1,7                                                 | Да                                 | 7                     |
| 20 |            | 15,8                                      | Нет                                | 28                    | 4,1                                                 | Да                                 | 14                    |
| 21 | встречный  | 15,4                                      | Нет                                | 29                    | 3,8                                                 | Да                                 | 13                    |
| 22 |            | 17,8                                      | Нет                                | 31                    | 3,1                                                 | Да                                 | 13                    |
| 23 |            | 16,8                                      | Нет                                | 33                    | 2,8                                                 | Да                                 | 14                    |
| 24 |            | 22,3                                      | Нет                                | 38                    | 4,5                                                 | Да                                 | 16                    |
| 25 |            | 18,8                                      | Нет                                | 29                    | 3,7                                                 | Да                                 | 15                    |
| 26 |            | 16,4                                      | Нет                                | 27                    | 4,2                                                 | Да                                 | 12                    |
| 27 |            | 12,3                                      | Нет                                | 17                    | 3,2                                                 | Да                                 | 8                     |
| 28 |            | 10,4                                      | Нет                                | 15                    | 2,5                                                 | Да                                 | 7                     |
| 29 |            | 8,7                                       | Нет                                | 12                    | 2,1                                                 | Да                                 | 6                     |
| 30 |            | 9,8                                       | Нет                                | 11                    | 2,7                                                 | Да                                 | 4                     |

Результаты оценки эффективности предлагаемого метода оптимизации, по площади расчетной области и по критерию категоричности вывода о местоположении точки начала КСВ показаны в таблице 4.3. При оптимизации действующим методом применялся штатный генетический алгоритм в программе PC-Crash 13.0. В ходе решения задач оптимизации по каждому из ДТП в выборке измерялось время достижения решения – t<sub>др</sub>, см. табл.4.3.

С целью проверки эффективности методики, было выполнено сравнение методов оптимизации для ЦМ ДТП по применимости для задач по таблице 2.7, по сходимости (уменьшение площади области фактического местоположения точки начала КСВ) и по категоричности, которое показано в таблице 4.4. В сравнение были включены также методы роя частиц, метод

эллипсоидов и линейная оптимизация (использовались аппаратные решения Matlab/Simulink).

Таблица 4.4 – Сравнение с другими методами оптимизации

| №<br>п/п | Метод<br>оптимиза-<br>ции                                  | Скорость<br>(время<br>решения,<br>мин) | Эффектив-<br>ность<br>(уменьше-<br>ние<br>площади,<br>%) | Кategori-<br>чность<br>вывода | Локальные показатели<br>ЦМ по примеру на<br>рис.4.3<br>(точность/сходимость)                                                       | Применимость<br>для задач А1,<br>А2, Б, В, Г |
|----------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 1        | Генетиче-<br>ский<br>алгоритм                              | 9–16                                   | 87%                                                      | Да                            | – Доля в цикле походки:<br>высокая сходимость<br>– Скорость<br>пешехода/ТС: точная<br>– Поперечное смещение:<br>стабильное         | 100%                                         |
| 2        | Метод<br>Монте-<br>Карло                                   | 15–38                                  | 10–30%                                                   | Нет                           | – Доля в цикле походки:<br>низкая<br>– Скорости: случайные<br>отклонения<br>– Поперечное смещение:<br>нестабильное                 | 22–35%                                       |
| 3        | Итерацион-<br>ный<br>метод<br>(коорди-<br>натный<br>спуск) | 4–7                                    | 50–60%                                                   | Частично                      | – Доля в цикле походки:<br>средняя<br>– Скорости: локальные<br>минимумы<br>– Поперечное смещение:<br>зависит от начальной<br>точки | 28–35%                                       |
| 4        | КГА с<br>вертикаль-<br>ным<br>наложени-<br>ем              | 3–18                                   | 60–90%                                                   | Да                            | – Доля в цикле походки:<br>высокая<br>– Скорости: точные<br>– Поперечное смещение:<br>минимальный разброс                          | 100%                                         |
| 5        | Метод<br>роя<br>частиц                                     | 8–20                                   | 70–85%                                                   | Да                            | – Доля в цикле походки:<br>хорошая<br>– Скорости: устойчивая<br>– Поперечное смещение:<br>малые колебания                          | 90%                                          |
| 6        | Метод<br>эллипсо-<br>идов                                  | 10–25                                  | 65–80%                                                   | Да                            | – Доля в цикле походки:<br>средняя<br>– Скорости: точная<br>– Поперечное смещение:<br>требует тонкой<br>настройки                  | 85%                                          |
| 7        | Линейная<br>оптимиза-<br>ция                               | 2–5                                    | 30–50%                                                   | Нет                           | – Доля в цикле походки:<br>плохая<br>– Скорости:<br>приближенные<br>– Поперечное смещение:<br>не учитывается                       | 40%                                          |

Сравнение различных методов оптимизации выявило их сильные и слабые стороны. ГА и КГА оказались наиболее универсальными и применимыми для всех типов задач (А1, А2, Б, В, Г), обеспечивая высокую скорость, точность и стабильность результатов. В то время как метод Монте-Карло и линейная оптимизация показали низкую эффективность и неспособность гарантировать категоричность выводов, методы роя частиц и эллипсоидов заняли промежуточное положение, демонстрируя хорошие, но не максимальные результаты.

Сравнение скорости и эффективности методов оптимизации для ЦМ ДТП по группам факторов используемых в работе по таблице 1.3 показано в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Сводная таблица сравнения скорости и эффективности методов оптимизации для ЦМ ДТП

| Метод оптимизации                          | Скорость (время решения) при оптимизации ЦМ ДТП по группам таблицы 1.3 |                     |                     | Эффективность решения (уменьшение площади области вариации) | Меры оценки эффективности ДТЭ        |                                         | Применимость для задач по таблице 2.7 |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|
|                                            | С                                                                      | С и D               | С, D и F            |                                                             | Категоричность / погрешность расчета | Сходимость (% смещения от фактического) |                                       |
| Генетический алгоритм (ГА)                 | Высокая (9-16 мин)                                                     | Высокая (12-22 мин) | Высокая (19-27 мин) | Высокая (уменьшение до 87%)                                 | Высокая / 5%                         | Высокая / 3%                            | Высокая (90%)                         |
| Метод Монте-Карло                          | Низкая (до 28 мин)                                                     | Низкая (до 45 мин)  | Низкая (до 50 мин)  | Низкая (незначительное уменьшение, до 30%)                  | Низкая / 25%                         | Низкая / 15%                            | Низкая (22-35%)                       |
| Итерационный метод                         | Низкая (до 20 мин)                                                     | Низкая (до 25 мин)  | Низкая (до 40 мин)  | Средняя (уменьшение до 60%)                                 | Допустимая / 10%                     | Допустимая / 5%                         | Средняя (28-45%)                      |
| Кооперативный ГА с вертикальным наложением | Высокая (3-18 мин)                                                     | Высокая (10-22 мин) | Высокая (18-25 мин) | Очень высокая (уменьшение до 90%)                           | Высокая / 3%                         | Высокая / 3%                            | Очень высокая (100%)                  |

Таким образом, генетический алгоритм демонстрирует высокую эффективность в уменьшении площади расчетной области (до 87%) и обеспечивает категоричные выводы, что критично для экспертных исследований. Однако его скорость работы варьируется в зависимости от сложности задачи, что может быть улучшено за счет параллельных вычислений, как реализовано в Приложении Г.5. ГА особенно эффективен для оптимизации параметров, таких как доля в цикле походки, скорость пешехода, скорость ТС и поперечное смещение тела (рис. 4.3).

Метод Монте-Карло обладает низкой скоростью и недостаточной эффективностью, так как основан на случайном поиске. Он не обеспечивает категоричных выводов и требует значительных временных затрат, что делает его непригодным для оперативного применения в задачах А1, А2, Б, В и Г. Однако МС полезен для предварительного исследования пространства параметров.

Итерационный метод (координатный спуск) показывает высокую скорость, но его эффективность ограничена локальными минимумами. Он подходит для задач, где начальная точка близка к оптимуму, но не гарантирует категоричных выводов для сложных случаев, таких как определение места наезда на пешехода.

Кооперативный генетический алгоритм (КГА) с вертикальным наложением сочетает высокую скорость и эффективность. Он значительно сокращает площадь расчетной области (до 90%) и обеспечивает категоричные выводы, что подтверждается результатами для задач А1, А2, Б, В и Г. КГА особенно полезен для задач с большими неопределенностями, например, при сужении области контакта ТС с пешеходом (рис. 4.4).

Применимость для типовых задач: ГА и КГА демонстрируют 100% применимость для задач А1, А2, Б, В и Г, в отличие от МС и итерационного метода, которые ограничены из-за низкой точности или скорости. Предложенные методы на основе ГА и КГА сокращают время производства

ДТЭ в 1,6 раза по сравнению с традиционными методами, такими как МКЭ или Madymo, при сопоставимой точности.

Рекомендации: Для оптимизации ЦМ ДТП, особенно в задачах с высокой неопределенностью, рекомендуется использовать КГА с вертикальным наложением или стандартный ГА с параллельными вычислениями. Эти методы обеспечивают баланс между скоростью выполнения данной части ДТЭ, эффективностью, сходимостью и категоричностью выводов, что делает их идеальными для практического применения в ДТЭ.

**Практическая значимость и перспективы методики:** разработанная методика оптимизации на основе ГА и КГА имеет высокую практическую значимость для анализа ДТП, особенно в случаях, где требуется точное определение места наезда на пешехода. Возможность параллельных вычислений и интеграция с MATLAB/Simulink значительно сократили временные затраты, что делает метод применимым в реальных условиях. Дальнейшие исследования могут быть направлены на адаптацию алгоритмов для более сложных сценариев ДТП и интеграцию с другими инструментами моделирования для повышения универсальности и точности анализа.

#### **4.4. Результаты оценки эффективности применения разработанного комплекса методик в сравнении с действующими методами ДТЭ**

С целью проверки практического применения комплекса методик были отобраны 15 примеров фактических ДТЭ, из базы ИБДД, выполненных в рамках уголовных дел с участием пешеходов в период с 2019 по 2024 годы. Из них, 10 примеров были отобраны из общей рассмотренной выборки экспертной практики, по тем ДТЭ, где уже было определено наличие превышения скорости или расчет показал близкое к максимально допустимому значение скорости (например,  $63 \pm 5$  км/ч) и 5 примеров, где показатели оценки не определялись в исследовании вообще. При этом, далее по тексту настоящей работы, в местах приведения примеров ДТЭ, из состава показываемых фрагментов исследований по ДТП с участием пешеходов исключены упоминания о фактических данных ТС и лиц, участвовавших в ДТП.

Таблица 4.6 – Сравнение результатов применения комплекса методик

| № примера | Индекс сближения по таблице 3.11 | Индекс критерия группы В по таблице 1.3 | Полученные значения по виду решения в ДТЭ             |                    |                                        | Наличие превышения допустимой скорости | Расчет ИТ / наличие причинной связи между фактической скоростью и тяжестью ТП | Влияние на выводы ДТЭ                                                             |
|-----------|----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
|           |                                  |                                         | Действующие методы и методика расчета по отбросу тела | СКЭМ с учетом ГМАМ | Комплекс методик, с учетом оптимизации |                                        |                                                                               |                                                                                   |
| 1         | ПЛ1                              | C1                                      | 91,4                                                  | 95,4               | 96,7                                   | да                                     | AIS = 9,22 при фактической скорости против AIS = 8,3 при допустимой / Да      | Существенно, $\Delta V = 5,3$ км/ч, ИТ в зоне тяжкого вреда или летального исхода |
|           |                                  | C2                                      | 4,3                                                   | 4,8                | 4,9                                    |                                        |                                                                               |                                                                                   |
|           |                                  | B3                                      | –                                                     | 20                 | 25                                     |                                        |                                                                               |                                                                                   |
|           |                                  | F8                                      | –                                                     | 5                  | 7                                      |                                        |                                                                               |                                                                                   |
| 2         | ПЛ3                              | C1                                      | 114,3                                                 | 117,6              | 118,9                                  | да                                     | AIS = 13,1 при фактической скорости против AIS = 8,3 при допустимой / Да      | Существенно, $\Delta V = 4,5$ км/ч, ИТ в зоне тяжкого вреда или летального исхода |
|           |                                  | C2                                      | –                                                     | 6,2                | 6,0                                    |                                        |                                                                               |                                                                                   |
|           |                                  | B3                                      | –                                                     |                    |                                        |                                        |                                                                               |                                                                                   |
|           |                                  | F8                                      | –                                                     |                    |                                        |                                        |                                                                               |                                                                                   |
| 3         | ПЛ2                              | C1                                      | 77,0                                                  | 82,9               | 83,2                                   | да                                     | AIS = 7,55 при фактической скорости против AIS = 5,28 при допустимой / Да     | Существенно, $\Delta V = 5,2$ км/ч, ИТ в зоне тяжкого вреда или летального исхода |
|           |                                  | C2                                      | 4,7                                                   | 4,9                | 5,1                                    |                                        |                                                                               |                                                                                   |
|           |                                  | B3                                      | –                                                     | 40                 | 45                                     |                                        |                                                                               |                                                                                   |
|           |                                  | F8                                      | –                                                     | 11                 | 12                                     |                                        |                                                                               |                                                                                   |

Продолжение таблицы 4.6

| № примера | Индекс сближения по таблице 3.11 | Индекс критерия группы В по таблице 1.3 | Полученные значения по виду решения в ДТЭ |       |       | Наличие превышения допустимой скорости | Расчет ИТ / наличие причинной связи между фактической скоростью и тяжестью ТП | Влияние на выводы ДТЭ                                                                                    |
|-----------|----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-------|-------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4         | ПБ1                              | C1                                      | 73,3                                      | 82,2  | 83,7  | да                                     | AIS = 7,6 при фактической скорости против AIS = 5,28 при допустимой / Да      | Существенно, $\Delta V = 10,4$ км/ч, ИТ в зоне тяжкого вреда или летального исхода                       |
|           |                                  | C2                                      | —                                         | 7,1   | 6,9   |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
|           |                                  | B3                                      | —                                         | 75    | 75    |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
|           |                                  | F8                                      | —                                         | 3     | 0     |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
| 5         | ПП1                              | C1                                      | 102,4                                     | 105,8 | 104,7 | да                                     | AIS = 10,5 при фактической скорости против AIS = 5,28 при допустимой / Да     | Существенно, $\Delta V = 10,4$ км/ч, ИТ в зоне тяжкого вреда или летального исхода                       |
|           |                                  | C2                                      | —                                         | 4,5   | 4,6   |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
|           |                                  | B3                                      | —                                         | 55    | 55    |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
|           |                                  | F8                                      | —                                         | 0     | 0     |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
| 6         | ПФ1                              | C1                                      | 63,2                                      | 67,8  | 68,2  | да                                     | AIS = 5,99 при фактической скорости против AIS = 5,28 при допустимой / Да     | Существенно, $\Delta V = 5$ км/ч к полученным результатам, ИТ в зоне тяжкого вреда или летального исхода |
|           |                                  | C2                                      | —                                         | 7,1   | 7,0   |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
|           |                                  | B3                                      | —                                         | 10    | 15    |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
|           |                                  | F8                                      | —                                         | 5     | 7     |                                        |                                                                               |                                                                                                          |

Продолжение таблицы 4.6

| № примера | Индекс сценария сближения по таблице 3.11 | Индекс критерия группы В по таблице 1.3 | Полученные значения по виду решения в ДТЭ |       |       | Наличие превышения допустимой скорости | Расчет ИТ / наличие причинной связи между фактической скоростью и тяжестью ТП | Влияние на выводы ДТЭ                                                                                       |
|-----------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-------|-------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7         | ПЛ2                                       | C1                                      | 93,3                                      | 97,8  | 100,5 | да                                     | AIS = 9,85 при фактической скорости против AIS = 8,38 при допустимой / Да     | Существенно, $\Delta V = 7,2$ км/ч к полученным результатам, ИТ в зоне тяжкого вреда или летального исхода  |
|           |                                           | C2                                      | –                                         | 5,5   | 5,3   |                                        |                                                                               |                                                                                                             |
|           |                                           | B3                                      | –                                         | 45    | 45    |                                        |                                                                               |                                                                                                             |
|           |                                           | F8                                      | –                                         | 25    | 25    |                                        |                                                                               |                                                                                                             |
| 8         | ПП1                                       | C1                                      | 114,3                                     | 143,2 | 142,8 | да                                     | AIS = 18,9 при фактической скорости против AIS = 11,4 при допустимой / Да     | Существенно, $\Delta V = 28,5$ км/ч к полученным результатам, ИТ в зоне тяжкого вреда или летального исхода |
|           |                                           | C2                                      | –                                         | 7,6   | 7,5   |                                        |                                                                               |                                                                                                             |
|           |                                           | B3                                      | –                                         | 55    | 60    |                                        |                                                                               |                                                                                                             |
|           |                                           | F8                                      | –                                         | 0     | 0     |                                        |                                                                               |                                                                                                             |
| 9         | ПФ1                                       | C1                                      | 89,7                                      | 92,5  | 94,5  | да                                     | AIS = 8,9 при фактической скорости против AIS = 8,38 при допустимой / Нет     | Значимо, $\Delta V = 4,8$ км/ч к полученным результатам, ИТ в зоне тяжкого вреда или летального исхода      |
|           |                                           | C2                                      | –                                         | 0     | 0     |                                        |                                                                               |                                                                                                             |
|           |                                           | B3                                      | –                                         | 0     | 0     |                                        |                                                                               |                                                                                                             |
|           |                                           | F8                                      | –                                         | 90    | 90    |                                        |                                                                               |                                                                                                             |

Продолжение таблицы 4.6

| № примера | Индекс сценария сближения по таблице 3.11 | Индекс критерия группы В по таблице 1.3 | Полученные значения по виду решения в ДТЭ |       |       | Наличие превышения допустимой скорости | Расчет ИТ / наличие причинной связи между фактической скоростью и тяжестью ТП | Влияние на выводы ДТЭ                                                                                    |
|-----------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-------|-------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10        | ПЛ2                                       | C1                                      | 66,7                                      | 69,5  | 70,4  | да                                     | AIS = 6,2 при фактической скорости против AIS = 5,28 при допустимой / Да      | Значимо, $\Delta V = 3,6$ км/ч к полученным результатам, ИТ в зоне тяжкого вреда или летального исхода   |
|           |                                           | C2                                      | 4,5                                       | 5,2   | 5,1   |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
|           |                                           | B3                                      | –                                         | 45    | 45    |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
|           |                                           | F8                                      | –                                         | 5     | 7     |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
| 11        | ПЛ1                                       | C1                                      | –                                         | 92,2  | 93,5  | да                                     | AIS = 8,84 при фактической скорости против AIS = 6,1 при допустимой / Да      | Существенно, $\Delta V = 23,5$ км/ч к допустимой скорости, ИТ в зоне тяжкого вреда или летального исхода |
|           |                                           | C2                                      | –                                         | 4,5   | 4,6   |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
|           |                                           | B3                                      | –                                         | 75    | 75    |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
|           |                                           | F8                                      | –                                         | 0     | 0     |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
| 12        | ПП1                                       | C1                                      | –                                         | 108,8 | 110,2 | да                                     | AIS = 11,44 при фактической скорости против AIS = 8,38 при допустимой / Да    | Существенно, $\Delta V = 20,2$ км/ч к допустимой скорости, ИТ в зоне тяжкого вреда или летального исхода |
|           |                                           | C2                                      | –                                         | 5,6   | 5,7   |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
|           |                                           | B3                                      | –                                         | 45    | 45    |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
|           |                                           | F8                                      | –                                         | 30    | 30    |                                        |                                                                               |                                                                                                          |

| № примера | Индекс сценария сближения по таблице 3.11 | Индекс критерия группы В по таблице 1.3 | Полученные значения по виду решения в ДТЭ |       |       | Наличие превышения допустимой скорости | Расчет ИТ / наличие причинной связи между фактической скоростью и тяжестью ТП | Влияние на выводы ДТЭ                                                                                    |
|-----------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-------|-------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 13        | ПБ1                                       | C1                                      | –                                         | 71,1  | 73,3  | да                                     | AIS = 6,48 при фактической скорости против AIS = 5,28 при допустимой / Да     | Существенно, $\Delta V = 13,3$ км/ч к допустимой скорости, ИТ в зоне тяжкого вреда или летального исхода |
|           |                                           | C2                                      | –                                         | 6,6   | 6,4   |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
|           |                                           | B3                                      | –                                         | 20    | 20    |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
|           |                                           | F8                                      | –                                         | 0     | 0     |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
| 14        | ПФ2                                       | C1                                      | –                                         | 95,6  | 97,8  | да                                     | AIS = 9,45 при фактической скорости против AIS = 5,28 при допустимой / Да     | Существенно, $\Delta V = 37,8$ км/ч к допустимой скорости, ИТ в зоне тяжкого вреда или летального исхода |
|           |                                           | C2                                      | –                                         | 4,4   | 4,8   |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
|           |                                           | B3                                      | –                                         | 0     | 0     |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
|           |                                           | F8                                      | –                                         | 90    | 90    |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
| 15        | ПЛ2                                       | C1                                      | –                                         | 103,3 | 105,6 | да                                     | AIS = 10,66 при фактической скорости против AIS = 8,38 при допустимой / Да    | Существенно, $\Delta V = 15,6$ км/ч к допустимой скорости, ИТ в зоне тяжкого вреда или летального исхода |
|           |                                           | C2                                      | –                                         | 4,4   | 4,5   |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
|           |                                           | B3                                      | –                                         | 45    | 45    |                                        |                                                                               |                                                                                                          |
|           |                                           | F8                                      | –                                         | 0     | 0     |                                        |                                                                               |                                                                                                          |

Сравнительный анализ проводился по критериям таблицы 1.3, с учетом индексации сценариев сближения по таблице 3.11, оценивались: скорость ТС в момент КСВ (C1), скорость пешехода в момент КСВ (C2), доля в походке (B3), угол сагиттальной плоскости в момент КСВ (F8). Результаты применения предложенных методик относительно данных фактических ДТЭ, выполнявшихся по отобранным примерам показан в таблице 4.6. Прочерк (–) в ячейках таблицы означает, что показатель не рассчитывался по действующим методам.

На основе анализа показанных 15 примеров ДТЭ по ДТП с участием пешеходов, можно сделать следующие выводы. Применение комплекса методик, включая СКЭМ с учётом ГМАМ и оптимизацию, позволило получить более точные значения скорости ТС в момент контакта с пешеходом, что в среднем увеличило расчётные показатели на 3–5 км/ч по сравнению с традиционными методами. Это, в свою очередь, подтвердило наличие причинной связи между превышением скорости и тяжестью травм, а также показало, что даже незначительное изменение расчетной скорости может переводить последствия ДТП в зону тяжкого вреда или летального исхода.

Кроме того, данный анализ примеров ДТП, показывал важность учёта дополнительных параметров, таких как скорость пешехода (C2), доля в походке (B3) и угол сагиттальной плоскости (F8), которые ранее часто игнорировались. Например, в случаях, где эти показатели не рассчитывались, применение новых методик позволило существенно уточнить выводы. Результаты также продемонстрировали, что индекс травмирования при фактической скорости ТС значительно превышал значения, рассчитанные для допустимой скорости, что подчёркивает критическую роль скоростного режима в предотвращении тяжёлых последствий ДТП. Таким образом, комплекс методик подтвердил необходимость использования комплексного

подхода для повышения точности и обоснованности (категоричности и полноты) выводов ДТЭ.

#### **4.5. Выводы по Главе 4**

1. Методика формирования суррогатных КЭМ показала для задач ДТЭ погрешность расчета по скорости ТС на КСВ до  $\pm 3$  км/ч, при снижении времени расчета в среднем на 50%. Применение методики расчета затрат скорости на КСВ на базе суррогатных КЭМ при определении фактической скорости ТС в момент наезда на пешехода позволило получить сходимость конечной ЦМ ДТП в МОР с результатами расчета скорости по видеозаписям с ошибкой не более 5%, при этом имело место снижение затрат времени на производство ДТЭ в среднем до 18%.

2. В результате применения методики расчета риска травмирования в практике производства ДТЭ, установлено что при решении типовых (индексированных) задач А1, А2, Б, В, Г объем вероятностных и условных выводов в ДТЭ снижется до нуля при применении метода в МОР.

3. При применении в МОР методики оптимизации цифровой модели механизма ДТП на основе генетического алгоритма установлено, что площади областей вариативных значений ЦМ могут быть уменьшены на 87%, при сравнении с методами итерационной оптимизации и методом Монте-Карло.

4. Полученные результаты сравнения методов показывают что при сопоставимой точности результата (9 из 10 ДТЭ где индексированная задача – А1, А2, Б, В и Г была решена категорично) время производства ДТЭ по предложенным зависимостям оценки риска в среднем в 1,6 раза меньше временных затрат на производство ДТЭ более сложными методами. При этом для оценки риска по предложенным зависимостям не требуется специальная подготовка эксперта.

## **ГЛАВА 5. КОМПЛЕКС МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭП ДТП И ПБ ТС В ОПУС**

### **5.1. Метод оптимизации геометрии продольных и поперечных сечений фронтальной части кузова легковых ТС на базе генетического алгоритма**

Фронтальная часть кузова легкового транспортного средства (ТС) играет ключевую роль в обеспечении пассивной безопасности пешеходов и водителя. Оптимизация её геометрии позволяет снизить травмоопасность при наезде, улучшая показатели таких параметров, как индексы травмирования и распределение ударных нагрузок (энергопоглощение).

Для решения такой многопараметрической задачи применяются генетические алгоритмы (ГА), позволяющие эффективно находить компромисс между безопасностью, аэродинамикой и дизайном [152-162]. ВАТС требуют новых подходов к безопасности, так как их дизайн может существенно отличаться от традиционных ТС. Исключив потребительскую эстетику при полном переходе к ВАТС, ограничения по дизайну могут быть сняты. Что открывает потенциально новые направления для повышения ПБ ТС.

В настоящем исследовании использовались факторные группы А-Е по табл.1.3. Оптимизация приводилась не к ЦМ ТС, а ЦМ всего механизма ДТП, что позволило учесть особенности типовых ДТП по ранее выделенным сценариям.

Для оптимизации геометрии продольных и поперечных сечений фронтальной части кузова легковых ТС была применена комбинация генетического алгоритма (ГА) и энергопоглощающих структур, вдохновленных оригами, таких как оригами (трубки) Креслинга [163] и поверхности Миура-ори [164,165]. Эти структуры образуют связанную сетку (аналогичную кольчуге), интегрированную в капот, бампер и верх крыльев

ТС, что позволяет эффективно поглощать энергию удара при наезде на пешехода. Пример варианта размещения трубок Креслинга на Миура-ори и основных размеров объектов структуры показан на рис.5.1.

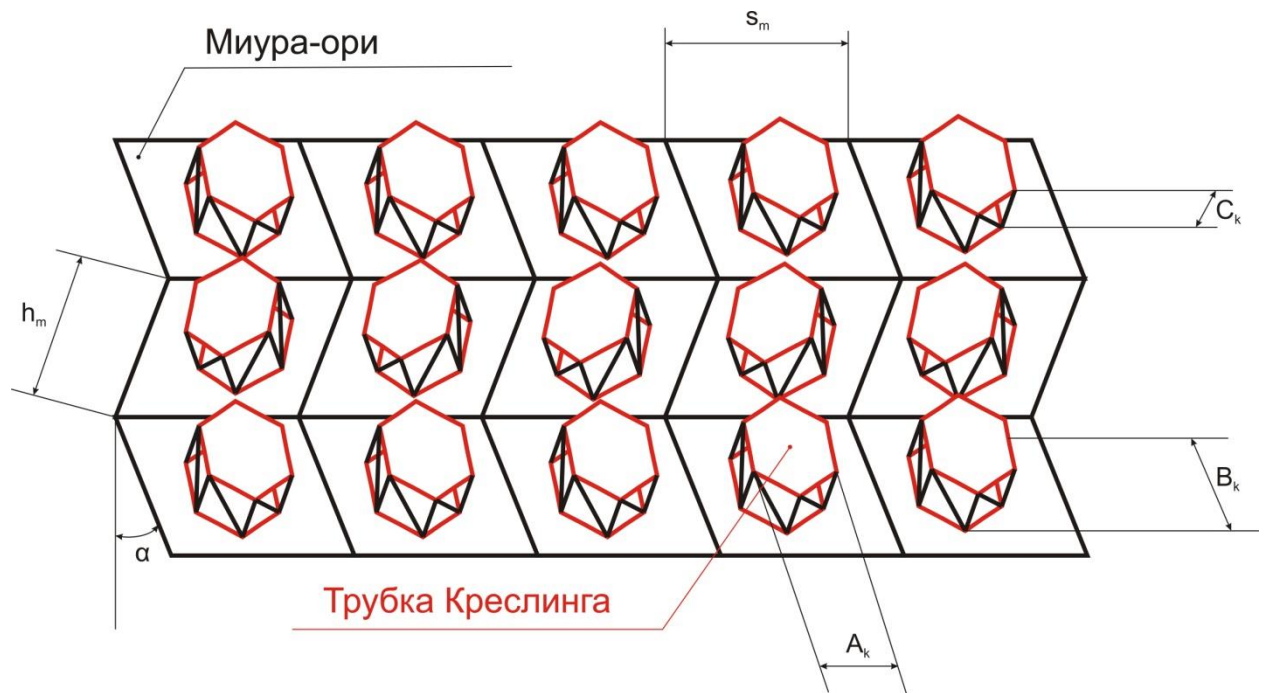


Рисунок 5.1 – Пример вводимой структуры из Миура-ори и Креслинга

Аддитивное производство этих элементов обеспечивает точное соответствие расчетным параметрам и возможность создания сложных геометрий.

Процедуры поиска решений включали следующие основные действия: Поверхности Миура-ори задавались параметрически. Структуры Креслинга моделировались как система связанных ячеек с жесткостью, зависящей от угла раскрытия. Каждая ячейка структуры связана с узлами КЭМ кузова. Энергопоглощение рассчитывается как сумма вкладов всех ячеек.

При применении метода оптимизации геометрии продольных и поперечных сечений фронтальной части кузова легковых ТС на базе генетического алгоритма достигнуто снижение индексов травмирования пешехода в среднем до 23% (для группы из 5 кластеров при параметризации факторной группы А по методу изложенному выше, см. также рис.3.27).

Пример итоговых продольных сечений при делении на пять кластеров по рис.3.27 показаны на рис.5.2, соответственно итоговые поперечные сечения также при делении на пять кластеров показаны на рис.5.3.

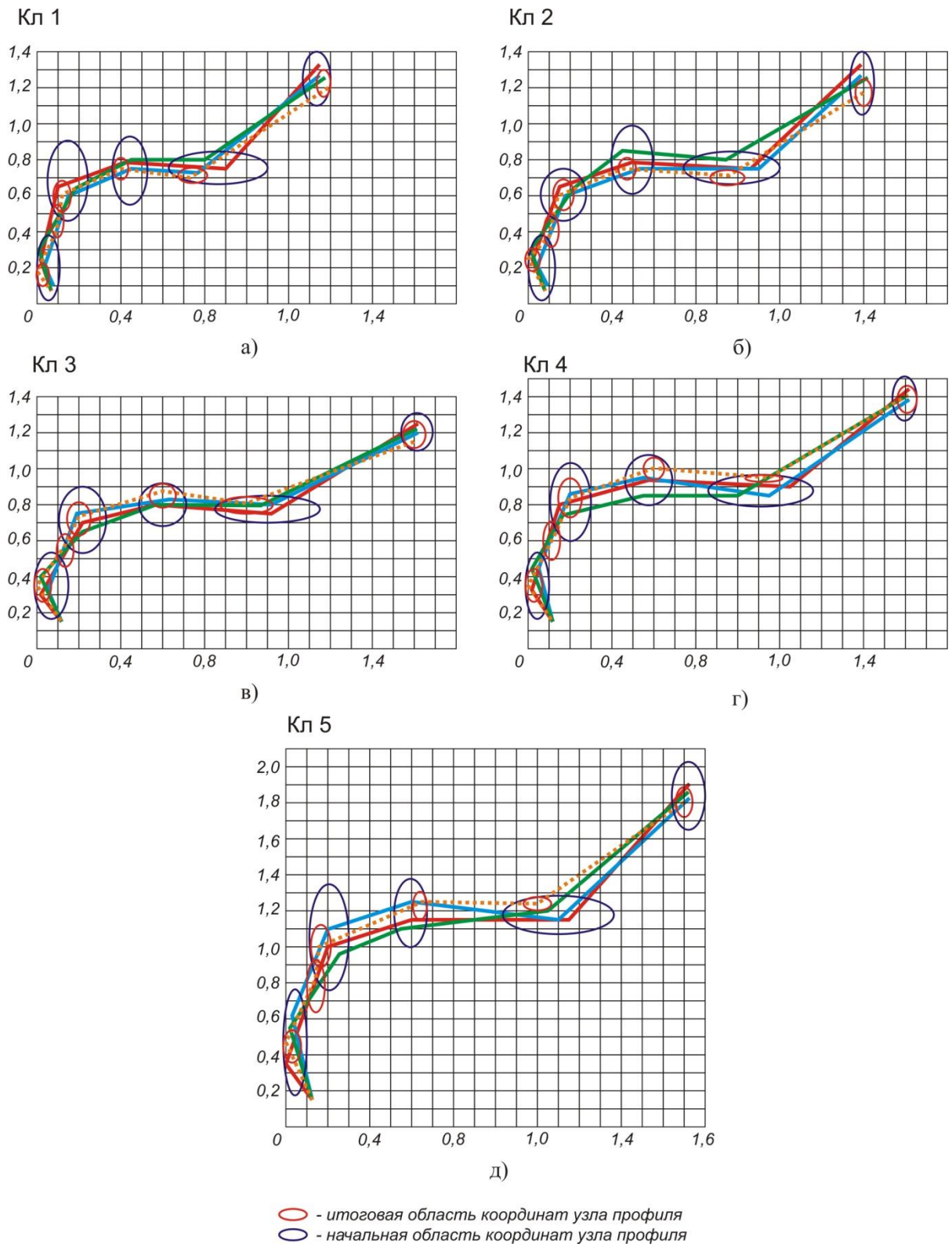


Рисунок 5.2 – Итоговые продольные сечения для деления на пять кластеров по рис.3.27. Сплошные линии – первые поколения, пунктирные линии – конечный профиль сечения после оптимизации.

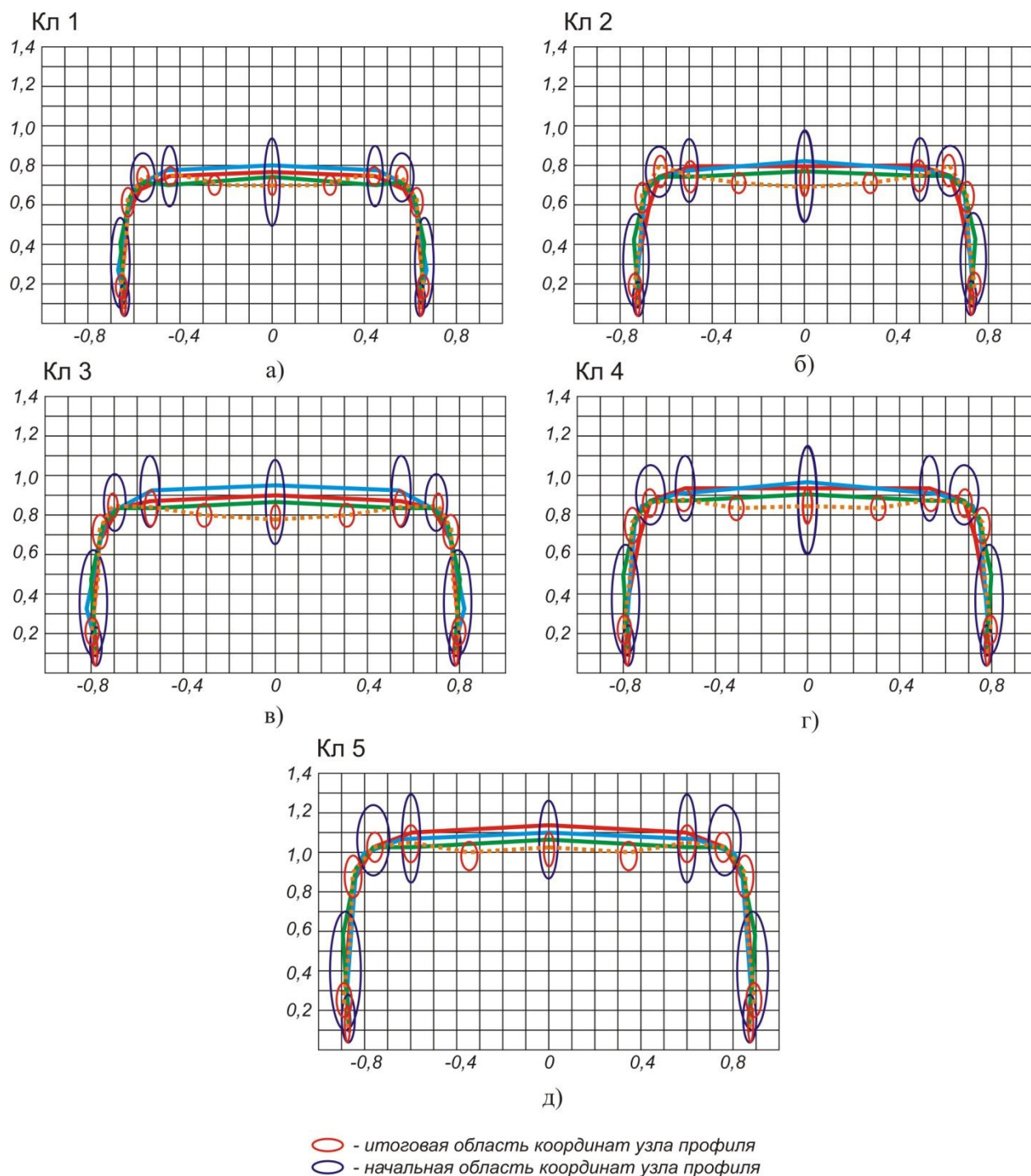


Рисунок 5.3 – Итоговые поперечные сечения для деления на пять кластеров по рис.3.27. Сплошные линии – первые поколения, пунктирные линии – конечный профиль сечения после оптимизации

Код программы на Python для оптимизации генетическим алгоритмом продольных и поперечных сечений кузова автомобиля по минимальным величинами индексов травмирования NHC, ASI, AIS приведен в Приложении Г.6.

Отметим основные результаты оптимизации:

а) Снижение индексов травмирования: НІС: уменьшение на 15–20% за счет сглаживания жестких зон капота; ASI: снижение на 10–15% благодаря оптимизации формы бампера; AIS: улучшение на 5–10% из-за перераспределения энергии удара.

б) Изменения геометрии: на продольных сечениях смещение точек капота вверх (+8–12 мм) для увеличения зоны деформации; на поперечных сечениях заужение центральной части бампера (-5%) для снижения локальных перегрузок.

в) Тепловая карта решений: наибольший вклад в улучшение безопасности вносят параметры: высота капота (корреляция с НІС:  $R_2=0,92$ ) и угол наклона ветрового стекла (корреляция с ASI:  $R_2=0,85$ ).

Полученные результаты указывают на потенциал генетических алгоритмов в области повышения пассивной безопасности транспортных средств. Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение факторных групп, учет дополнительных параметров ДТП или применение аналогичных методов для других зон автомобиля, что может привести к еще более значительному улучшению показателей безопасности.

Кроме того, определено влияние структур на поглощение энергии, а именно, получено, что сетка из трубок Креслинга и Миура-ори распределяет ударную нагрузку, при ударе трубки деформируются, поглощая энергию за счёт пластических деформаций, при этом поверхности Миура-ори обеспечивают постепенное сжатие, уменьшая пиковые нагрузки.

Внедрение структур на основе оригами позволило: снизить индексы травмирования: НІС на 15–20%, ASI на 10–15%, AIS на 5–10%, а также улучшить распределение энергии удара за счёт адаптивной геометрии и обеспечить контролируемую деформацию, уменьшая риск тяжёлых травм.

Наибольший эффект достигнут для пешеходов среднего роста (160–175 см), где угол капота и высота бампера критичны. Дальнейшая оптимизация может быть направлена на поиск лучших решений по типу трубок Креслинга,

их размерам, размерам Миура-ори, топологической оптимизации с учетом конструктивных особенностей подкапотных пространств и т.д.

Структуры, подобные трубкам Креслинга и поверхностям Миура-ори, могут быть интегрированы не только во фронтальную часть кузова, но и в другие зоны ТС, подверженные ударам: боковые двери и стойки (для защиты при боковых столкновениях), крыша (усиление при опрокидывании, задний бампер (смягчение удара при наезде сзади). Это позволит создать комплексную систему пассивной безопасности, адаптированную к различным сценариям ДТП.

При этом, очевидно, что аддитивное производство открывает новые возможности для изготовления сложных энергопоглощающих структур, с возможностью создания структур с переменной жёсткостью, оптимизированных под конкретные зоны удара, с использованием композитных материалов.

Перспективным направлением также будет является разработка структур с изменяемыми свойствами в реальном времени, преднапряжённые элементы (активация деформации при ударе для более эффективного поглощения энергии), структуры с памятью формы (материалы, способные восстанавливать исходную конфигурацию после деформации), интеграция с датчиками (системы, которые могут адаптировать жёсткость структур в зависимости от силы и направления удара).

Структуры на основе оригами обладают значительным потенциалом для революции в области пассивной безопасности. Их способность эффективно поглощать энергию, сочетание лёгкости и прочности, а также возможности аддитивного производства делают их ключевым элементом будущих ВАТС. Дальнейшие исследования и внедрение этих технологий позволят значительно снизить травматизм в ДТП, особенно в условиях роста автономного транспорта и урбанизации.

## 5.2. Метод расчета оценки удобства обслуживания (безопасности доступа к обслуживанию в состояниях ОПУС) для пешеходов с вариацией факторов оценки

Всего применялся 51 фактор оценки в 6 группах (окружающей среды, социально-экономические, транспортные, транзита, землепользования, демографические) и факторы групп J и K (16 факторов – см. табл.1.2 и 5.1).

Индексы факторов по таблице 5.1 начинаются с префиксов: LU — землепользование, TR — транзитные факторы, TF — транспортные факторы, SE — социально-экономические, DEM — демографические, ENV — окружающая среда. Для производных факторов (например, TR1\_shelter) добавлены суффиксы, уточняющие параметр, такие обозначения были обусловлены удобством для дальнейшего написания программного кода (см. Приложение Г).

Таблица 5.1 – Факторы и их группы для оценки удобства обслуживания

| № п/п | Группа факторов          | Наименование фактора                                             | Индекс фактора |
|-------|--------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------|
| 1     | Факторы землепользования | Плотность жилых единиц поблизости                                | LU1            |
| 2     |                          | Смешанное землепользование поблизости                            | LU2            |
| 3     |                          | Близость к многофункциональным зданиям                           | LU3            |
| 4     |                          | Близость к многоквартирным зданиям                               | LU4            |
| 5     |                          | Близость к коммерческим зданиям                                  | LU5            |
| 6     |                          | Наличие розничной торговли                                       | LU6            |
| 7     |                          | Близость к паркам                                                | LU7            |
| 8     |                          | Близость к местам активного отдыха                               | LU8            |
| 9     |                          | Близость к университету                                          | LU9            |
| 10    |                          | Близость к школам                                                | LU10           |
| 11    |                          | Культурно-развлекательная зона                                   | LU11           |
| 12    |                          | Промышленная зона                                                | LU12           |
| 13    |                          | Близость к свободным участкам                                    | LU13           |
| 14    |                          | Расстояния до соседних зданий                                    | LU14           |
| 15    |                          | Максимальный уклон                                               | LU15           |
| 16    |                          | Расстояние от ближайшего водоема                                 | LU16           |
| 17    |                          | Расстояние от центра делового района                             | LU17           |
| 18    | Транзитные факторы       | Доступ к транзитным остановкам / количество транзитных остановок | TR1            |
| 19    |                          | Частота движения пассажирского транспорта                        | TR2            |

| №<br>п/п | Группа факторов                        | Наименование фактора                                      | Индекс<br>фактора |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------|
| 20       | Транспортные<br>факторы                | Наличие тротуаров на близлежащих улицах                   | TF1               |
| 21       |                                        | Наличие тротуаров на соседних улицах                      | TF2               |
| 22       |                                        | Ширина тротуара                                           | TF3               |
| 23       |                                        | Наличие велосипедной дорожки                              | TF4               |
| 24       |                                        | Доступ к многоцелевым тропам                              | TF5               |
| 25       |                                        | Связность многоцелевых троп поблизости                    | TF6               |
| 26       |                                        | Связность уличной сети поблизости                         | TF7               |
| 27       |                                        | Плотность перекрестков поблизости                         | TF8               |
| 28       |                                        | Ближайшие четырехсторонние перекрестки                    | TF9               |
| 29       |                                        | Сигнализируемый перекресток поблизости                    | TF10              |
| 30       |                                        | Буфер между тротуаром и улицей на близлежащих улицах      | TF11              |
| 31       |                                        | Наличие уличных деревьев на близлежащих улицах            | TF12              |
| 32       |                                        | Наличие уличного освещения на близлежащих улицах          | TF13              |
| 33       |                                        | Количество магистральных дорог поблизости                 | TF14              |
| 34       |                                        | Количество коллекторных дорог поблизости                  | TF15              |
| 35       |                                        | Длина квартала близлежащих улиц                           | TF16              |
| 36       |                                        | Количество основных магистралей поблизости                | TF17              |
| 37       |                                        | Скорость движения автомобилей на близлежащих жилых улицах | TF18              |
| 38       |                                        | Автомобильные места на близлежащей парковке               | TF19              |
| 39       |                                        | Сложность пересечения близлежащих улиц                    | TF20              |
| 40       | Социально-<br>экономические<br>факторы | Плотность занятости поблизости                            | SE1               |
| 41       |                                        | Общая занятость                                           | SE2               |
| 42       |                                        | Наличие автомобилей у домохозяйств                        | SE3               |
| 43       |                                        | Доход домохозяйства                                       | SE4               |
| 44       | Демографические<br>факторы             | Общая численность населения                               | DEM1              |
| 45       |                                        | Плотность населения в окрестностях                        | DEM2              |
| 46       |                                        | Процент жителей района с высшим образованием              | DEM3              |
| 47       |                                        | Процент студентов                                         | DEM4              |
| 48       |                                        | Процент рабочих/мигрантов                                 | DEM5              |
| 49       |                                        | Возраст                                                   | DEM6              |
| 50       | Факторы<br>окружающей<br>среды         | Осадки                                                    | ENV1              |
| 51       |                                        | Температура                                               | ENV2              |

Пример получения оценки при оценке мер по выбору ширины пешеходной части:

$$\begin{aligned}
 K_y = & -1,2276 \ln (W_{ol} + W_1 + f_P \times \%_{OSP} + f_b \times W_b + f_{sw} \times W_s) + \\
 & + 0,0091 (V_{15}/L) + 0,0004 S_{PD}^2 + 6,0468
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

где:  $\ln$  – натуральный логарифм;

$W_{ol}$  – ширина внешней полосы движения (м);

$W_1$  – ширина обочины (м);

$f_p$  – коэффициент влияния уличной парковки;

$\%OSP$  – процент доли занятости уличной парковки;

$f_b$  – коэффициент занятости буферной зоны;

$W_b$  – ширина буфера (расстояние между краем тротуара и тротуаром) (м);

$f_{sw}$  – коэффициент ширины тротуара к ширине проезжей части;

$W_s$  – ширина тротуара;

$V_{15}$  – количество автотранспорта в пиковый 15-минутный период (в час);

$L$  – общее количество полос для движения ТС;

$S_{PD}$  – средняя скорость движения автотранспорта (км/ч).

Рассмотрим возможные сочетания оцениваемых факторов с их оценкой влияния, для этого представим сводную таблицу 5.2 с 10 примерами сочетаний факторов оценки удобства обслуживания для пешеходов. В таблице использованы качественные описания значений факторов (например, "высокая", "низкая", "наличие/отсутствие") вместо числовых подстановок.

Каждый пример демонстрирует, как сочетание факторов из разных групп (землепользование, транспорт, демография и др.) влияет на удобство обслуживания пешеходов. Очевидно, что влияние факторов может быть как положительным, так и отрицательным, в зависимости от контекста и комбинаций.

Рассмотрим примеры других зависимостей для выбранных сценариев (сочетаний факторов) по таблице 5.2, также сведя их в таблицу 5.3.

Качественные описания (высокая/низкая) заменены на индексы с пояснениями (например, DEM2 низкая).

*Пример расчета для сочетания 1 ( $K_1$ ):* если: LU1=1 (высокая плотность жилья), TF1=1 (тротуары есть), TF18=0,2 (скорость движения низкая), то:  $K_1=0,6 \cdot 1 + 0,4 \cdot 1 - 0,3 \cdot 0,2 = 0,6 + 0,4 - 0,06 = 0,94$  (высокий показатель)  $K_1$ .

Таблица 5.2 – Примеры сочетания факторов по таблице 5.1

| №  | Сочетание факторов                                                            | Описание влияния на удобство обслуживания                                                                                                                                                                                               |
|----|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Высокая плотность жилых единиц + Наличие тротуаров + Низкая скорость движения | Увеличение плотности жилых единиц и наличие тротуаров повышают доступность, а низкая скорость движения снижает риск для пешеходов. Удобство обслуживания улучшается за счет безопасности и комфорта передвижения.                       |
| 2  | Смешанное землепользование + Частота движения транспорта + Уличное освещение  | Смешанное землепользование увеличивает пешеходную активность, а частота движения транспорта и уличное освещение обеспечивают безопасность. Однако высокая частота движения может требовать дополнительных мер (например, светофоров).   |
| 3  | Близость к паркам + Широкие тротуары + Низкий уклон                           | Близость к паркам и широкие тротуары делают зону привлекательной для пешеходов, а низкий уклон повышает удобство передвижения, особенно для людей с ограниченной мобильностью.                                                          |
| 4  | Доступ к транзитным остановкам + Высокая плотность перекрестков + Осадки      | Доступ к транзитным остановкам и высокая плотность перекрестков улучшают связанность, но осадки могут снизить удобство, если тротуары не оборудованы навесами или дренажом.                                                             |
| 5  | Наличие велосипедных дорожек + Культурно-развлекательная зона + Высокий доход | Велосипедные дорожки и культурные объекты повышают привлекательность зоны, а высокий доход населения может свидетельствовать о лучшем содержании инфраструктуры, что улучшает общее удобство.                                           |
| 6  | Промышленная зона + Отсутствие тротуаров + Высокая скорость движения          | Промышленная зона с отсутствием тротуаров и высокой скоростью движения создает опасные условия для пешеходов, значительно снижая удобство обслуживания и безопасность.                                                                  |
| 7  | Близость к школам + Наличие уличных деревьев + Средняя температура            | Близость к школам и уличные деревья делают зону комфортной для детей и родителей, а умеренная температура способствует активному пешеходному движению.                                                                                  |
| 8  | Низкая плотность населения + Длинные кварталы + Отсутствие освещения          | Низкая плотность населения и длинные кварталы уменьшают пешеходную активность, а отсутствие освещения делает передвижение небезопасным в темное время суток, снижая удобство обслуживания.                                              |
| 9  | Высокая занятость + Сложность пересечения улиц + Наличие буферных зон         | Высокая занятость увеличивает поток пешеходов, но сложность пересечения улиц может создавать проблемы. Наличие буферных зон частично компенсирует это, улучшая безопасность.                                                            |
| 10 | Близость к водоему + Низкая связность троп + Высокий процент мигрантов        | Близость к водоему может повышать привлекательность, но низкая связность троп усложняет доступ. Высокий процент мигрантов может требовать дополнительной инфраструктуры (например, указателей на разных языках) для улучшения удобства. |

Таблица 5.3 – Сводная таблица с уравнениями для 10 примеров сочетаний факторов по таблице 5.2

| №  | Сочетание факторов (индексы)                       | Уравнение для оценки удобства обслуживания                                                | Интерпретация коэффициентов                                                                   |
|----|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Высокая LU1 +<br>Наличие TF1 +<br>Низкая TF18      | $K_1 = 0,6 \cdot LU1 + 0,4 \cdot TF1 - 0,3 \cdot TF18$                                    | Чем выше плотность жилья и наличие тротуаров, тем лучше. Скорость движения обратно влияет.    |
| 2  | LU2 + TR2 + TF13                                   | $K_2 = 0,5 \cdot \ln(LU2 \cdot TR2) + 0,2 \cdot TF13$                                     | Смешанная застройка и транспорт улучшают доступность, освещение усиливает эффект.             |
| 3  | LU7 + TF3 +<br>Низкий LU15                         | $K_3 = 0,7 \cdot LU7 + 0,5 \cdot TF3 - 0,4 \cdot LU15$                                    | Парки и широкие тротуары повышают комфорт, уклон снижает его.                                 |
| 4  | TR1 +<br>Высокая TF8 +<br>ENV1                     | $K_4 = -0,2 \cdot TR1 + 0,3 \cdot TF8 - 0,1 \cdot ENV1$                                   | Близость остановок и перекрестков помогает, но осадки ухудшают доступность.                   |
| 5  | TF4 + LU11 +<br>Высокий SE4                        | $K_5 = 0,4 \cdot TF4 + 0,3 \cdot LU11 + 0,2 \cdot SE4$                                    | Велодорожки и культурные зоны полезны, доход населения косвенно улучшает инфраструктуру.      |
| 6  | LU12 +<br>Отсутствие TF1 +<br>Высокая TF18         | $K_6 = -0,8 \cdot LU12 - 0,5 \cdot TF1 \text{отсутствие} - 0,6 \cdot TF18$                | Промзоны и отсутствие тротуаров критически ухудшают условия.                                  |
| 7  | LU10 + TF12 +<br>Умеренная ENV2                    | $K_7 = 0,6 \cdot LU10 + 0,3 \cdot TF12 + 0,1 \cdot (1 - \ ENV2 - 20\ /10)$                | Школы и деревья полезны, комфортная температура (20°C) усиливает эффект.                      |
| 8  | Низкая DEM2 +<br>Длинные TF16 +<br>Отсутствие TF13 | $K_8 = -0,7 \cdot DEM2 \text{низкая} - 0,4 \cdot TF16 - 0,9 \cdot TF13 \text{отсутствие}$ | Низкая плотность населения и отсутствие освещения резко снижают привлекательность.            |
| 9  | Высокая SE1 +<br>TF20 +<br>Наличие TF11            | $K_9 = 0,5 \cdot SE1 - 0,3 \cdot TF20 + 0,2 \cdot TF11$                                   | Занятость улучшает активность, но сложные переходы требуют буферных зон.                      |
| 10 | LU16 +<br>Низкая TF6 +<br>Высокий DEM5             | $K_{10} = 0,3 \cdot LU16 - 0,4 \cdot TF6 \text{низкая} + 0,1 \cdot DEM5$                  | Водоемы привлекательны, но плохая связность троп и мигранты требуют адаптации инфраструктуры. |

Рекомендации по использованию: для оптимизации необходимо найти сочетания с минимальными  $K_K$  (например, примеры 6 и 8), после чего устранить негативные факторы. При планировании реомендуется использовать уравнения при проектировании пешеходных зон (например,

расширение тротуаров TF3 в примере 3). Также допустимо при разработке и определении нормативных значений, через задание пороговых значения  $K_K$  (например,  $K > 0,7$  - зона комфортна). Таблица 5.3 иллюстрирует применение метода для количественной оценки влияния каждого фактора и выбора приоритетного мероприятия.

Метод применим для оценки ширины пешеходной части, ширины переходов, доступности объектов притяжения, размещения перехода и др. При применении метода расчета оценки удобства обслуживания (безопасности доступа к обслуживанию в состояниях ОПУС) для пешеходов с вариацией факторов оценки получено прогнозируемое снижение индексов травмирования пешехода до 58% при соотношении стоимости решений (введения организационных мер) к сокращению числа наездов до 1:8.

Метод оценки удобства обслуживания для пешеходов, основанный на 51 факторе, позволяет комплексно анализировать различные аспекты городской среды. Как видно из примеров, такие параметры, как ширина тротуара, загруженность транспорта, доступность объектов инфраструктуры и экологические условия, значительно влияют на итоговый индекс. Например, широкие тротуары и низкая скорость движения транспорта повышают удобство, тогда как плохая связность улиц или недостаточное освещение снижают его.

Социально-экономические и демографические факторы также играют важную роль. Районы с высокой плотностью населения, доступностью услуг и активной социальной жизнью (например, студенческие зоны) демонстрируют более высокие показатели удобства. Напротив, районы с высоким уровнем шума, загруженностью транспорта или отсутствием инфраструктуры становятся менее привлекательными для пешеходов.

Применение этого метода позволяет не только оценить текущее состояние пешеходной инфраструктуры, но и прогнозировать эффект от планируемых изменений. Например, введение организационных мер, таких

как расширение тротуаров или улучшение освещения, может значительно снизить количество наездов на пешеходов, как упоминалось в документе.

Таким образом, метод является мощным инструментом для градостроителей и транспортных планировщиков, помогая создавать более безопасную и комфортную среду для пешеходов. Его использование способствует достижению баланса между урбанизацией и качеством жизни, что особенно актуально в условиях роста городов.

### 5.3. Метод определения уровней безопасности участка дороги по оценке прогнозируемого времени выхода (ПВВ)

Введем математический аппарат смещения области конфликтов с учетом пространств состояний подсистем Водитель и Пешеход, в общем виде:

Пространство состояний транспортного средства (ТС) обозначим как  $S_{ТС}$ , где каждая точка  $S_{ТС} \in S_{ТС}$  описывается параметрами:  $v$  – скорость ТС (км/ч),  $a$  — ускорение/замедление ТС (м/с<sup>2</sup>),  $d$  – расстояние до пешеходного перехода (м).

Пространство состояний пешехода обозначим как  $S_{пеш}$ , где каждая точка  $S_{пеш} \in S_{пеш}$  описывается параметрами:  $v_p$  – скорость пешехода (км/ч),  $t_r$  – время реакции пешехода (с),  $p$  – позиция пешехода относительно перехода (м).

Тогда область конфликтов  $C$  определяется как пересечение подпространств  $S_{ТС}$  и  $S_{пеш}$ , где прогнозируемое время выхода (ПВВ) и скорость ТС создают риск наезда:

$$C = \{(S_{ТС}, S_{пеш}) \mid \text{ПВВ}(S_{ТС}, S_{пеш}) \leq T \wedge v \geq V_{\min}\}, \quad (5.2)$$

где  $T$  – критическое время (1.5 с, 3 с, 5 с для высокого, среднего и низкого риска соответственно),  $V_{\min}$  – минимальная скорость риска (16 км/ч, 32 км/ч, 48 км/ч).

По ПВВ и тяжести травм (к скорости транспортного средства) наезды на пешеходов были классифицированы по степени риска на три категории: низкая, умеренная и высокая. Было определено, что взаимодействие с высокой степенью риска, когда скорость превышает 48 км/ч и ПВВ меньше 1,5 секунды, конфликты с умеренным риском конфликта определяются как случаи, когда скорость транспортного средства выше 32 км/ч и ПВВ ниже 3 секунд, и конфликты с низким уровнем риска определяются, когда скорость транспортного средства выше 16 км/ч, но менее 32 км/ч и ПВВ меньше менее 5 секунд. Красным цветом обозначены конфликты с высоким риском, желтым – конфликты средней степени риска. Голубой цвет области обозначает конфликты с низким риском, а зеленый – безопасное взаимодействие.

Для количественной оценки смещения области конфликтов  $C$  после внедрения мероприятий по повышению безопасности дорожного движения (БДД) предлагается следующий математический аппарат: примем, что при внедрении мероприятий (например, установка неровностей, ограждений, камер) изменяются параметры областей состояний Пешеход / Водитель, что приводит к трансформации области конфликтов  $C$ .

Смещение описывается оператором  $\Phi$ , который преобразует исходную область  $C$  в новую  $C'$ :

$$C' = \Phi(C, \theta), \quad (5.3)$$

где  $\theta$  – вектор параметров мероприятий (например, высота неровности, длина ограждения, наличие камеры).

Влияние наиболее доступных и конкретных мер на область конфликтов показано в таблице 5.4.

Введем также количественную оценку смещения, для этого поределим две метрики эффективности:

а) доля смещенных конфликтов:

$$\Delta C = \frac{|C \setminus C'|}{|C|} \times 100\%, \quad (5.4)$$

где  $|C|$  – исходное число конфликтных ситуаций,  $|C \setminus C'|$  – количество устранённых конфликтов.

Таблица 5.4 – Влияние мер на смещение области конфликтов

| Мероприятие              | Изменяемые параметры                                             | Эффект на область конфликтов                                                     |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Искусственные неровности | $v \downarrow, a \uparrow v \downarrow, a \uparrow$ (замедление) | Уменьшает долю $C$ с высоким риском ( $v > 48$ км/ч, ПВВ $< 1.5$ с).             |
| Пешеходные ограждения    | $p$ (позиция пешехода) $\rightarrow$ безопасная зона             | Сокращает число пешеходов в опасной зоне, уменьшая $CC$ .                        |
| Камеры контроля скорости | $v \downarrow$ (снижение скорости)                               | Смещает $C$ из зоны высокого риска в умеренный ( $v \leq 32$ км/ч, ПВВ $> 3$ с). |
| Комбинация мер           | Комплексное воздействие                                          | Максимальное смещение $C$ (до 37% по экспериментальным данным).                  |

б) изменение распределения рисков:

$$P_{\text{нов}}(R) = \frac{|C_{R'}|}{|C'|}, R \in \{\text{высокий, умеренный, низкий}\}, \quad (5.5)$$

где  $C_{R'}$  – подмножество  $C'$  с уровнем риска  $R$ .

Прогнозируемое снижение травматизма на основе индексов AIS и НИС можно оценить ожидаемое уменьшение тяжести ДТП:

$$\Delta AIS = R \sum (P_{\text{исх}}(R) - P_{\text{нов}}(R)) \cdot AIS(R), \quad (5.6)$$

где  $AIS(R)$  – средний балл травм для уровня риска  $R$ .

В таблице 5.5 и на рис.5.4–5.6 представлена детальная оценка изменения области конфликтов  $C$  после внедрения мероприятий по БДД для трёх пешеходных переходов (показаны на рисунках 5.4–5.6) на примере трех пешеходных переходов в Ломоносовском районе Ленинградской области.

Таблица 5.5 – Сравнительный анализ эффективности мероприятий

| Параметр               | Пример и номер рисунка его иллюстрирующего                  |                                                             |                                                             |
|------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                        | Рис. 5.3: дер. Новая Буря                                   | Рис. 5.4: пос. Петровское                                   | Рис. 5.5: пос. Гостилицы                                    |
| Исходное состояние     | Высокий риск: 50% точек $C$ ( $v > 48$ км/ч, ПВВ $< 1,5$ с) | Высокий риск: 60% точек $C$ ( $v > 48$ км/ч, ПВВ $< 1,5$ с) | Высокий риск: 55% точек $C$ ( $v > 48$ км/ч, ПВВ $< 1,5$ с) |
| Внедрённые мероприятия | 1. Ограждения<br>2. Неровности<br>3. Камеры скорости        | 1. Ограждения<br>2. Неровности<br>3. Камеры скорости        | 1. Ограждения<br>2. Неровности<br>3. Камеры скорости        |

| Параметр                         | Пример и номер рисунка его иллюстрирующего                                                                         |                                                                                                                    |                                                                                                                    |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                  | Рис. 5.3: дер. Новая Буря                                                                                          | Рис. 5.4: пос. Петровское                                                                                          | Рис. 5.5: пос. Гостилицы                                                                                           |
| Изменение скорости $v$           | $v \downarrow$ на 25 км/ч (с 60 до 35 км/ч)                                                                        | $v \downarrow$ на 30 км/ч (с 65 до 35 км/ч)                                                                        | $v \downarrow$ на 20 км/ч (с 55 до 35 км/ч)                                                                        |
| Смещение $C$                     | Высокий риск: 50% $\rightarrow$ 15%<br>Умеренный риск: 30% $\rightarrow$ 50%<br>Низкий риск: 20% $\rightarrow$ 35% | Высокий риск: 60% $\rightarrow$ 10%<br>Умеренный риск: 25% $\rightarrow$ 55%<br>Низкий риск: 15% $\rightarrow$ 35% | Высокий риск: 55% $\rightarrow$ 20%<br>Умеренный риск: 30% $\rightarrow$ 50%<br>Низкий риск: 15% $\rightarrow$ 30% |
| Снижение доли $C_{\text{высок}}$ | $\Delta C = (50 - 15) / 50 \times 100\% = 70\%$                                                                    | $\Delta C = (60 - 10) / 60 \times 100\% = 83\%$                                                                    | $\Delta C = (55 - 20) / 55 \times 100\% = 64\%$                                                                    |
| Прогнозируемый эффект по AIS/NIC | Средний AIS $\downarrow$ с 3,2 до 1,8<br>NIC $\downarrow$ на 40%                                                   | Средний AIS $\downarrow$ с 3,5 до 1,5<br>NIC $\downarrow$ на 50%                                                   | Средний AIS $\downarrow$ с 3,0 до 2,0<br>NIC $\downarrow$ на 35%                                                   |
| Примечания                       | Наибольший эффект от неровностей (снижение $v$ )                                                                   | Комбинация мер дала максимальное смещение $C$                                                                      | Камеры менее эффективны из-за изначально меньшей $v$                                                               |

Применение для экспертной профилактики ДТП с участием пешеходов (а также и для других видов ДТП, по аналогии) может быть реализовано через оптимизацию мер БДД (подбор  $\theta$ , минимизирующий  $|C_{\text{высок}}'|$  и использование машинного обучения для прогноза  $\Phi(C, \theta)$ ), через прогнозирование эффективности (моделирование  $C'$  до внедрения мер, например, в SUMO или VISSIM), а также через оценку экономической эффективности (сравнение затрат на мероприятия с прогнозируемым снижением ДТП (по AIS/NIC)).

При применении метода определения уровней безопасности участка дороги по оценке прогнозируемого времени выхода (ПВВ) получено, что рациональное смещение области конфликтов в границы высоких и средний уровней ПБ может достигать до 37% при комплексном применении всех предложенных методов.

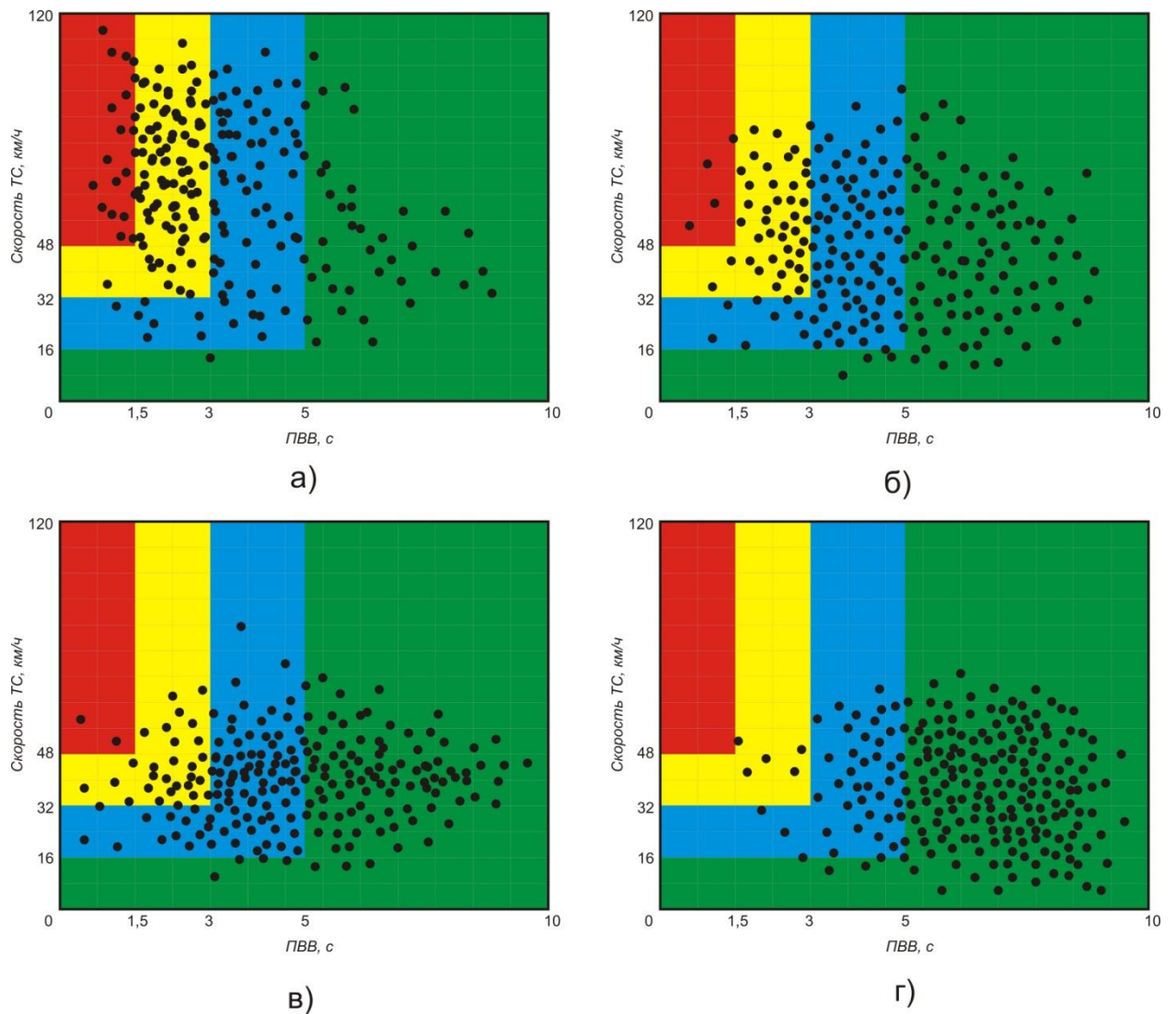


Рисунок 5.4 – Пример смещения области конфликтов при внедрении мероприятий по ОДД в районе пешеходного перехода дер.Новая Буря, Ленинградская область: а) расположение конфликтных точек до внедрения мероприятий; б) установка пешеходных ограждений; в) установка искусственных неровностей перед переходом; г) установка камеры контроля скорости совместно с мероприятиями б) и в)

Формализуем определение уровня безопасности участка дороги по оценке прогнозируемого времени выхода (ПВВ) в системе ОПУС. В частности, для определения уровня безопасности участка дороги предлагается интегральный показатель безопасности ( $S_{INT}$ ), объединяющий: прогнозируемое время выхода (ПВВ), тяжесть потенциальных травм (AIS/NIC), динамические условия, который можно рассчитывать по формуле:

$$S_{INT} = \left(1 - \frac{|C|}{|S|}\right) \times \frac{1}{1 + \langle AIS \rangle} \times e^{(-\lambda \cdot \frac{N_{OP}}{N})}, \quad (5.7)$$

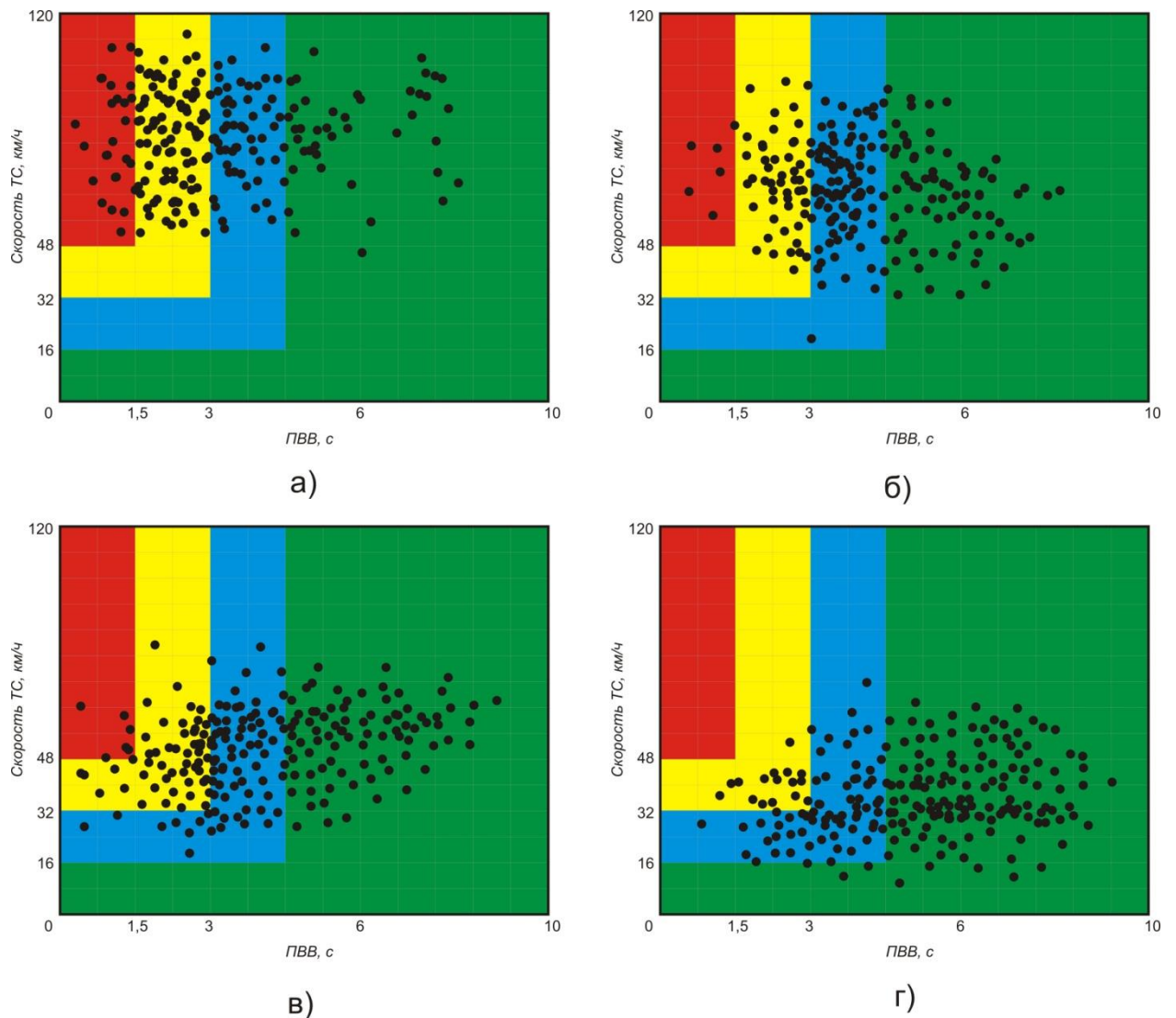


Рисунок 5.5 – Пример смещения области конфликтов при внедрении мероприятий по ОДД в районе пешеходного перехода, пос. Петровское, Ленинградская область: а) расположение конфликтных точек до внедрения мероприятий; б) установка пешеходных ограждений; в) установка искусственных неровностей перед переходом; г) установка камеры контроля скорости совместно с мероприятиями б) и в)

где:  $|C|$  – мощность области конфликтов;

$|S|$  – общее число возможных состояний системы;

$\langle AIS \rangle$  – средний балл тяжести травм для  $C$ ;

$\lambda$  – коэффициент чувствительности к условиям;

$N_{\text{оп}}$  – число опасных условий;;

$N$  – нормирующий фактор (например, 10 для городских улиц).

Тогда критерии уровней безопасности:

Высокий ( $S_{\text{INT}} \geq 0.8$ ): конфликты редки, травмы маловероятны.

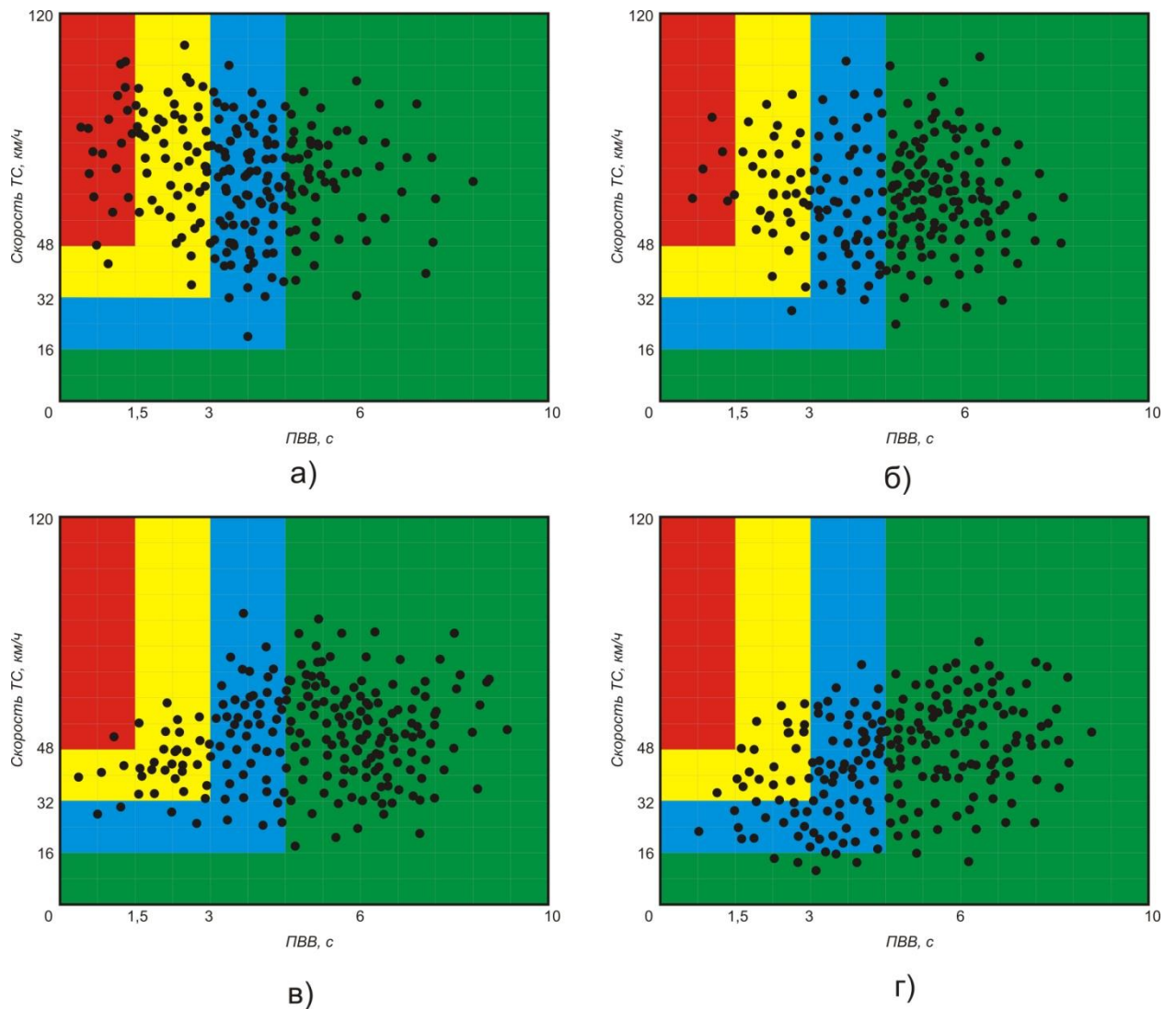


Рисунок 5.6 – Пример смещения области конфликтов при внедрении мероприятий по ОДД в районе пешеходного перехода, пос. Гостилицы, Ленинградская область: а) расположение конфликтных точек до внедрения мероприятий; б) установка пешеходных ограждений; в) установка искусственных неровностей перед переходом; г) установка камеры контроля скорости совместно с мероприятиями б) и в)

Умеренный ( $S_{INT} \leq \text{ИПБ} < 0.8$ ): локальные риски, требуются точечные меры.

Низкий ( $S_{INT} < 0.5$ ): необходима срочное введение мер/реконструкция.

С учетом перехода к системе ОПУС дадим следующие выводы и рекомендации по методу оценки смещения области конфликтов: внутри системы ВАДС – Пешеход метод ограничен, так как данная система сложна для учета динамических взаимодействий в сложных дорожных сценариях. Однако, для полисистемы Объект-Пространство-Условие-Событие (ОПУС) метод предлагает более гибкую модель, где: объекты (ТС, пешеходы,

инфраструктура) взаимодействуют в пространстве (физическом и цифровом), условия (погода, освещение, ПДД) влияют на события (конфликты, ДТП). Это позволяет: учитывать скрытые факторы (например, цифровые метки IoT-устройств), моделировать нелинейные сценарии (цепочки событий), автоматизировать прогнозирование через ИИ и машинное обучение.

Показанные примеры апробации, доказывают, что внедрение мер (неровности, ограждения, камеры) снижает долю высокорисковых конфликтов на 64–83%. В системе ОПУС эти меры можно оптимизировать точно, например: динамические неровности (активируемые при  $v > 40$  км/ч) и умные ограждения с датчиками движения.

Пример аспектов при переходе от ВАДС-Пешеход к ОПУС показан в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Сравнение аспектов ВАДСП и ОПУС

| № п/п | Аспект       | ВАДС - Пешеход              | ОПУС                                                       |
|-------|--------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------|
| 1     | Объекты      | ТС, пешеходы                | ТС, пешеходы, датчики, ИИ-агенты                           |
| 2     | Пространство | Физическая дорога           | Физическое (инфраструктурная услуга) + цифровое (GIS, IoT) |
| 3     | Условия      | Статические (ПДД, разметка) | Динамические (погода, трафик, свет)                        |
| 4     | События      | ДТП, конфликты              | Цепочки событий                                            |

Таким образом, можно прогнозировать, что в ОПУС метод ранжирования уровней безопасности по ПВВ станет частью единой системы мониторинга, а не изолированным инструментом. Определим итоговые рекомендации:

- для исследователей: адаптировать формулы ПВВ под многомерное пространство ОПУС, разрабатывать ИИ-модели для прогноза С в реальном времени.
- для органов управления: внедрять пилотные проекты с цифровыми двойниками, обновлять нормативы с учётом ОПУС-параметров.
- для инженеров БДД: комбинировать физические меры организации (неровности) с цифровыми (датчики) и использовать ОПУС для точечного вмешательства (например, временные ограждения в час пик).

#### **5.4. Результаты оценки эффективности применения разработанного комплекса методов в сравнении с действующими методами ЭП ДТП с участием пешеходов**

При оценке используем обозначения изложенных в данной главе методов: М1 – метод оптимизации геометрии продольных и поперечных сечений фронтальной части кузова легковых ТС, М2 – метод расчета оценки удобства обслуживания для пешеходов и М3 – метод определения уровней безопасности участка дороги по оценке ПВВ.

В таблице 5.7 представлены 5 сценариев определения эффективности мероприятий (ОЭМ), включая изложенные настоящей главе, при использовании разработанной автором программы (на языке Python) для анализа мероприятий по повышению безопасности дорожного движения, приведенной в Приложении Г.7.

Данная программа принимает данные с параметрами мероприятий:

- мероприятие – название,
- delta\_k – ожидаемое снижение числа ДТП (например 0,23 = 23%),
- снижение индексов травмирования – прогнозируемое уменьшение травматизма,
- стоимость (тыс. руб.) – затраты на реализацию,
- тип мероприятия – малозатратное / средnezатратное / высокозатратное,
- снижение опасных ДТС – уменьшение числа опасных ситуаций,
- степень опасности (0-1) – мера оценки ПБ участка дороги,
- стабильность местоположения (0-1) – постоянство наличия мест концентрации,
- недостатки транспортно-эксплуатационного состояния (ТЭС) (0-1) – качество дорожных условий (подсистема Дорога системы ВАДС).

В таблице 5.8 представлены дополнительные 5 сценариев ОЭМ, при применении кода по Приложению Г.7, включая изменение схем организации дорожного движения (ОДД).

Таблица 5.7 – 5 сценариев ОЭМ относительно методов главы 5

| № п/п | № примера | Сценарий ОЭМ / метод                                                                                | Входные данные                                                                                                      | Результаты                                                                         | Выводы                                                                                |
|-------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | П1        | Оптимизация геометрии передней части кузова ТС (М1)                                                 | delta_k=0,23,<br>Стоимость=500 тыс. руб.,<br>Тип=Среднезатратное,<br>Степень опасности=0,8                          | Эффективность: 23%,<br>Соотношение стоимость/эффективность=21,7,<br>Приоритет=0,71 | Мероприятие эффективно, но требует дополнительных мер для максимального снижения ДТП. |
| 2     | П2        | Внедрение оценки удобства обслуживания пешеходов (М2)                                               | delta_k=0,58,<br>Стоимость=1500 тыс. руб.,<br>Тип=Высокозатратное,<br>Степень опасности=0,9                         | Эффективность: 58%, Соотношение=25,9, Приоритет=0,85                               | Высокая эффективность, но из-за стоимости требует тщательного анализа окупаемости.    |
| 3     | П3        | Оценка ПБ по ПВВ, установка камер контроля скорости на участке дороги (М3)                          | delta_k=0,37,<br>Стоимость=300 тыс. руб.,<br>Тип=Малозатратное,<br>Степень опасности=0,7                            | Эффективность: 37%, Соотношение=8,1, Приоритет=0,65                                | Одно из самых выгодных решений: низкая стоимость и хорошая эффективность.             |
| 4     | П4        | Комплекс мер (М1 + М2 + М3)                                                                         | Совокупные данные из П1-П3                                                                                          | Совокупная эффективность: 80,02%, Общая стоимость=2300 тыс. руб.                   | Комбинация мер дает максимальный эффект, но требует значительных инвестиций.          |
| 5     | П5        | Ремонт дорожного покрытия на участке с высокой аварийностью (с более чем 1 местом концентрации ДТП) | delta_k=0,15,<br>Стоимость=1200 тыс. руб.,<br>Тип=Высокозатратное,<br>Недостатки: ТЭС=0,9,<br>Степень опасности=0,6 | Эффективность: 15%,<br>Соотношение=80,0,<br>Приоритет=0,72                         | Низкая эффективность при высокой стоимости. Лучше рассмотреть альтернативные решения. |

Таблица 5.8 – 5 сценариев ОЭМ относительно методов главы 5  
и методов изменения схем ОДД

| №<br>п/п | №<br>прим<br>ера | Сценарий<br>ОЭМ                                                                 | Входные данные                                                                                                | Результаты                                                        | Выводы                                                                                                     |
|----------|------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | П6               | Введение<br>односторонне<br>го движения в<br>центре города                      | delta_k=0,25,<br>Стоимость=200 тыс.<br>руб.,<br>Тип=Малозатратное,<br>Стабильность=0,8,<br>Недостатки ТЭС=0,5 | Эффективность:<br>25%,<br>Соотношение=8,<br>0,<br>Приоритет=0,68  | Низкая<br>стоимость и<br>хороший<br>эффект.<br>Подходит<br>для городов<br>с высокой<br>загрузкой<br>улиц.  |
| 2        | П7               | Установка<br>пешеходных<br>ограждений<br>на<br>оживленных<br>перекрестках       | delta_k=0,30,<br>Стоимость=400 тыс.<br>руб.,<br>Тип=Среднезатратное,<br>Степень опасности=0,9                 | Эффективность:<br>30%,<br>Соотношение=1<br>3,3,<br>Приоритет=0,82 | Высокий<br>приоритет<br>из-за<br>опасности<br>участка.<br>Быстро<br>окупается.                             |
| 3        | П8               | Организация<br>кругового<br>движения<br>вместо<br>светофорного<br>регулирования | delta_k=0,40,<br>Стоимость=2500 тыс.<br>руб.,<br>Тип=Высокозатратное,<br>Стабильность=0,7                     | Эффективность:<br>40%,<br>Соотношение=6<br>2,5,<br>Приоритет=0,75 | Дорого, но<br>долгосроч-<br>ный эффект.<br>Требуется<br>анализа<br>загружен-<br>ности<br>перекрестка.      |
| 4        | П9               | Сужение<br>проезжей<br>части и<br>расширение<br>тротуаров в<br>жилой зоне       | delta_k=0,18,<br>Стоимость=600 тыс.<br>руб.,<br>Тип=Среднезатратное,<br>Недостатки ТЭС=0,6                    | Эффективность:<br>18%,<br>Соотношение=3<br>3,3,<br>Приоритет=0,62 | Умеренная<br>эффектив-<br>ность.<br>Лучше<br>применять в<br>комплексе с<br>другими<br>мерами.              |
| 5        | П10              | Введение<br>платных<br>парковок для<br>снижения<br>трафика в<br>центре города   | delta_k=0,12,<br>Стоимость=800 тыс.<br>руб.,<br>Тип=Среднезатратное,<br>Стабильность=0,5                      | Эффективность:<br>12%,<br>Соотношение=6<br>6,7,<br>Приоритет=0,55 | Низкая<br>эффектив-<br>ность для<br>БДД, но<br>может<br>улучшить<br>экологию и<br>транспорт-<br>ный поток. |

Общий вывод по интерпретации результатов при оценке по соотношению Эффективности к Стоимости: лучшие решениями являются малозатратные меры (камеры, одностороннее движение и т.д.) они в подавляющем большинстве решений дают хороший эффект по показателям группы J таблицы 1.3 при минимальных затратах.

В свою очередь самые эффективные, но дорогие это применение M2+M3, совместно с круговым движением, они требуют серьезных вложений, но значительно снижают аварийность.

Приоритетность мероприятий следует выделить следующим образом: высокий приоритет на участки с высокой степенью опасности, т.е. с наличием мест концентрации наездов на пешеходов (например, установка пешеходных ограждений). При этом низкий приоритет приобретают дорогостоящие меры с низкой эффективностью (ремонт покрытия, платные парковки и т.п.).

Общие рекомендации по примерам П1-П10: для достижения быстрых изменений наиболее эффективна оценка по M3, т.е. решения по мероприятиям в рамках которых следует применять камеры, меры по погашению скорости и пешеходные ограждения, для достижения долгосрочных эффектов следует внедрять комплексные меры (M1+M2+M3) и избегать решений с низкой эффективностью и высокой стоимостью (например, платные парковки).

Учитывая теоретический аппарат Главы 1, оценим влияние перехода от систем ВАДС с полисистеме ОПУС также путем ОЭМ по разработанному программному решению, с учетом указанных методов, их комплексного применении и в ракурсе смены оценки меры хаоса к оценке меры порядка.

Для этого, в таблице 5.9 представлены 5 сценариев, учитывающих переход от хаотичности транспортных потоков (энтропия в ВАДС) к управляемой структурированности (анизотропия в ОПУС).

Показанные примеры П11-П15 позволяют сформировать следующие общие выводы по переходу от энтропии (система ВАДС – Отражает хаотичность транспортной системы, соответственно высокие значения требуют мер по упорядочиванию) к анизотропии (полисистема ОПУС –

фактически отображает степень управляемости системы, цель в управлении ОБДД смещается на повышение анизотропии через структурированные решения).

Таблица 5.9 – 5 сценариев ОЭМ при переходе к ОПУС

| № п/п | № примера | Сценарий ОЭМ                                                               | Ключевые входные параметры                                                                                      | Результаты                                                   | Интерпретация                                                                                         |
|-------|-----------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | П11       | Внедрение адаптивных светофоров на перекрестках с высокой энтропией потока | delta_k=0,35,<br>Стоимость=900 тыс. руб.,<br>Тип=Среднезатратное,<br>Снижение энтропии=0,6,<br>Анизотропия=0,7  | Эффективность: 35%,<br>Соотношение=25,7, П<br>приоритет=0,78 | Снижает хаотичность потока, повышая предсказуемость. Оптимально для городов с нерегулярным трафиком.  |
| 2     | П12       | Оптимизация пешеходных маршрутов через зоны с высокой анизотропией         | delta_k=0,28,<br>Стоимость=300 тыс. руб.,<br>Тип=Малозатратное,<br><br>Анизотропия=0,8,<br>Стабильность=0,9     | Эффективность: 28%,<br>Соотношение=10,7, П<br>приоритет=0,85 | Максимальный приоритет: структурированные потоки пешеходов снижают риск конфликтов с транспортом.     |
| 3     | П13       | Динамическое перераспределение полос движения на магистралях               | delta_k=0,45,<br>Стоимость=2000 тыс. руб.,<br>Тип=Высокозатратное,<br>Снижение энтропии=0,7,<br>Анизотропия=0,9 | Эффективность: 45%,<br>Соотношение=44,4,<br>Приоритет=0,82   | Дорого, но резко повышает упорядоченность потока. Подходит для мегаполисов с перегруженными дорогами. |
| 4     | П14       | Внедрение интеллектуальных парковок в зонах с низкой анизотропией          | delta_k=0,15,<br>Стоимость=700 тыс. руб.,<br>Тип=Среднезатратное,<br>Анизотропия=0,4,<br>Стабильность=0,5       | Эффективность: 15%,<br>Соотношение=46,7,<br>Приоритет=0,55   | Низкая эффективность из-за слабой структурированности зоны. Требуется дополнительных мер.             |
| 5     | П15       | Создание выделенных полос для общественного транспорта в хаотичных потоках | delta_k=0,50,<br>Стоимость=1200 тыс. руб.,<br>Тип=Среднезатратное,<br>Снижение энтропии=0,8,<br>Анизотропия=0,6 | Эффективность: 50%,<br>Соотношение=24,0,<br>Приоритет=0,88   | Лучший вариант: сочетает высокую эффективность и средние затраты. Упорядочивает смешанные потоки.     |

Эффективными решениями для снижения энтропии следует признать адаптивные светофоры (П11) и динамические полосы (П13). В свою очередь для повышения анизотропии: оптимизация пешеходных маршрутов (П12) и выделение выделенных полос (П15). Соответственно определим глобальные приоритеты: максимальный приоритет у мероприятий, одновременно снижающих энтропию и повышающих анизотропию (П12, П15) и низкий приоритет у решений, работающих только в одном направлении (П14).

Таким образом, в хаотичных системах (высокая энтропия) рекомендуется внедрять адаптивное управление, а в слабоструктурированных зонах (низкая анизотропия) рекомендуется использовать жесткое проектирование (выделенные полосы, пешеходные зоны), при этом избегать локальных решений без учета системного эффекта (например, парковки в зонах с низкой анизотропией).

С учетом оценки финансовой эффективности, для достижения лучшего соотношения цены и качества: выделенные полосы (Соотношение=24,0) и пешеходные маршруты (Соотношение=10,7). При этом можно отметить, что специфические высокочрезвычайные решения такие как динамические полосы требуют детального обоснования.

Таким образом, комплекс методов и его программная реализация (см. Приложение Г.7) позволяет количественно оценить влияние мер на упорядоченность транспортной системы и выбрать стратегически важные решения.

## 5.5. Выводы по Главе 5

1. При применении метода оптимизации геометрии продольных и поперечных сечений фронтальной части кузова легковых ТС для группы из 6 кластеров при параметризации факторной группы А достигнуто снижение индексов травмирования пешехода в среднем до 23%.

2. При применении метода оптимизации геометрии продольных и поперечных сечений фронтальной части кузова легковых ТС для группы из 9 кластеров при параметризации факторной группы А достигнуто снижение индексов травмирования пешехода в среднем до 15%.

3. При применении метода расчета оценки удобства обслуживания (безопасности доступа к обслуживанию в состояниях ОПУС) для пешеходов с вариацией факторов оценки получено прогнозируемое снижение индексов травмирования пешехода до 58% при соотношении стоимости решений (введения организационных мер) к сокращению числа наездов до 1:8.

4. При применении метода определения уровней безопасности участка дороги по оценке прогнозируемого времени выхода (ПВВ) получено, что рациональное смещение области конфликтов в границы высоких и средний уровней ПБ может достигать до 37% при комплексном применении всех предложенных методов.

## ГЛАВА 6. ОПИСАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО ПОЛИМОДЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА И ПРОГНОЗ ЭТАПОВ ПЕРЕХОДА К ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЕ ОБДД В РАМКАХ ЭВОЛЮЦИИ ОТ ВАДС К ОПУС

### 6.1. Функциональная структура универсального полимодельного комплекса на виртуальном полигоне и процедуры МОР для его применения в роли инструмента решения задач ДТЭ, ЭП ДТП и ОБДД

В ходе практической реализации комплексов методик и методов был разработан универсальный полимодельный комплекс (УПМК) в Matlab/Simulink показанный на рис.6.1 в отображении информационных связей между компонентами (моделями).

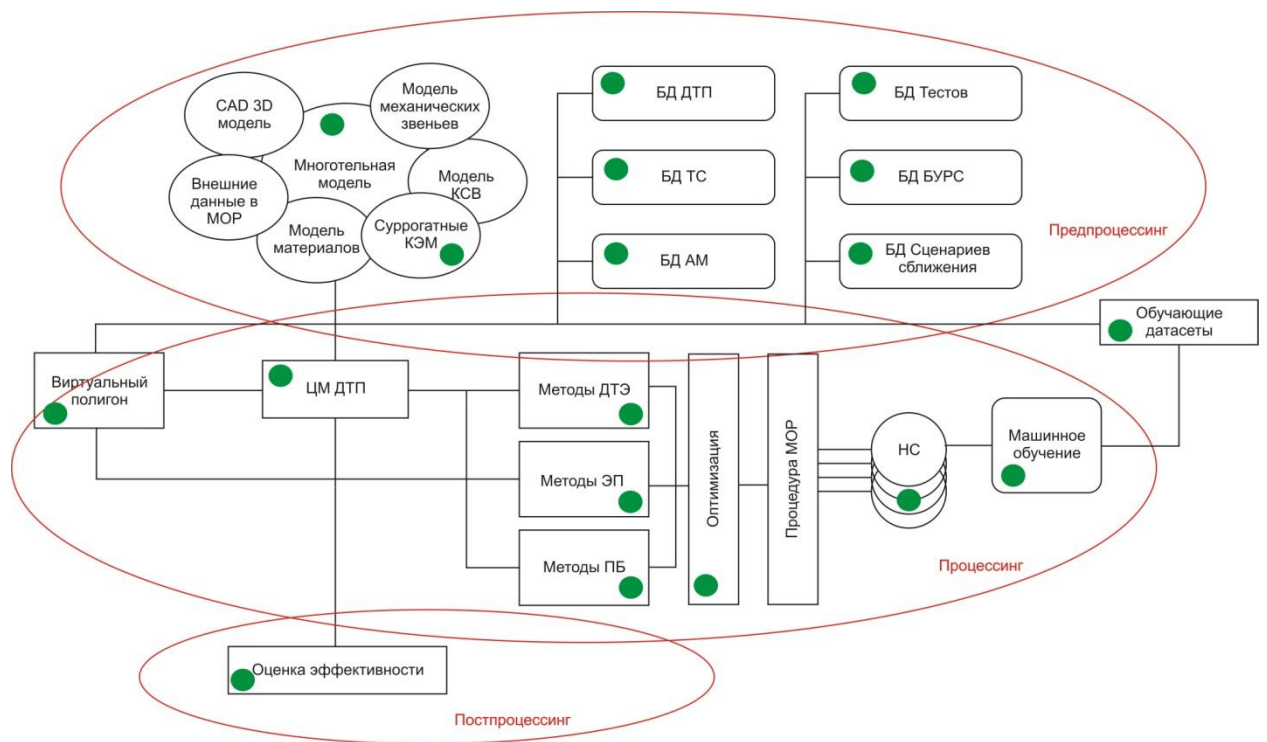


Рисунок 6.1 – Информационные связи внутри УПМК, зеленым отмечены компоненты, разработанные и использованные в диссертационной работе

Применение УПМК позволяет решать следующие ключевые задачи:

- Реконструкция ДТП: УПМК обеспечивает создание цифровых моделей ДТП (ЦМ ДТП) на основе реальных данных, включая параметры транспортных средств (ТС), дорожных условий, поведения участников и

элементов дорожного обустройства (ЭДО). Это позволяет точно воспроизводить механизм происшествия и выявлять его причины.

– Анализ пассивной безопасности: Комплекс позволяет оценивать эффективность средств пассивной безопасности ТС и ЭДО, таких как дорожные ограждения, пешеходные переходы и другие элементы, на основе виртуальных испытаний.

– Прогнозирование и профилактика: УПМК используется для моделирования потенциально опасных ситуаций, что способствует разработке превентивных мер по снижению аварийности, особенно в местах концентрации ДТП.

Процедуры применения УПМК на ВП и состав решаемых задач в понятиях процедур МОР (предпроцессинг/процессинг/постпроцессинг) показаны в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Процедуры МОР при применении УПМК на ВП

| № | Название стадии процесса                                                                                      | Схема стадии и решаемые задачи/результаты в цикле МОР ДТП                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Сбор и обработка исходных данных, формирование цифровой модели ДТП с участием пешехода (-ов) (предпроцессинг) | <pre> graph TD     A[Формирование банка исходных данных] --&gt; B[Определение условий контактно-следового взаимодействия]     B --&gt; C[Сопоставление локализаций деформаций/повреждений]     C --&gt; D[Установление углов взаиморасположения, отброса, разворота, сброса и т.д.]     D --&gt; E[Установление механизма нанесения повреждений (первичные/вторичные)]     E --&gt; F[Определение границ области местоположения точки контакта]     F --&gt; G[Коррекция, настройка решателя, задание границ варьирования]     G --&gt; H[Формирование масштабной 3D сцены места ДТП, внесение объектов и субъектов исследования в пространство сцены]     H --&gt; C     C --&gt; I[Верификация и валидация ЦМ ДТП]   </pre> <p>1) Извлечение, обработка и представление данных;<br/> 2) Создание ЦМ ДТП по реконструируемым условиям;<br/> 3) Выполнение верификации и валидации ЦМ ДТП;<br/> 4) Задание условий проведения симуляции механизма ДТП с заданной детализацией исходных данных реального ДТП.</p> |

| № | Название стадии процесса                                  | Схема стадии и решаемые задачи/результаты в цикле МОР ДТП                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2 | Исследование ДТП с участием пешехода (-ов) (процессинг)   | <p>1) Использование построенной модели в качестве объекта исследования;</p> <p>2) Работа с верифицированными и валидованными моделями;</p> <p>3) Проведение виртуальных испытаний;</p> <p>4) Визуализация ДТП;</p> <p>5) Исследование и анализ работы средств ПБ ТС и ОТИ в процессе ДТП.</p>                                                                                                                                                                  |
| 3 | Обработка результатов, принятие решений (пост-процессинг) | <p>1) Составление Заключения</p> <p>2) Использование результатов ЦМ ДТП для принятия решений, способствующих задачам ДТЭ и/или ЭП ДТП, а также увеличению уровня пассивной безопасности ТС, ОТИ и устранению участков концентрации ДТП, разработка мероприятий по ОБДД;</p> <p>3) Внесение изменений в нормативные документы;</p> <p>4) Совершенствование конструкций ТС и ЭДО;</p> <p>5) Подготовка документации (заключения) по результатам анализа ДТП.</p> |

При интеграции УПМК в систему обеспечения безопасности дорожного движения для эффективного использования УПМК рекомендуется: создание централизованной базы данных ДТП с возможностью интеграции с УПМК; разработка стандартизированных протоколов обмена данными между участниками процесса (экспертами, проектировщиками, органами управления); обучение специалистов работе с комплексом и интерпретации результатов.

Применение УПМК на виртуальном полигоне позволяет: повысить точность и объективность дорожно-транспортной экспертизы, снизить зависимость от субъективных оценок экспертов, оптимизировать конструкции ТС и ЭДО для повышения пассивной безопасности, разрабатывать превентивные меры для снижения аварийности, в том числе и в местах концентрации ДТП.

Применение вышеизложенных комплексов методик и методов в УПМК на ВП были использованы в расчете ширины пешеходных переходов при работе над ГОСТ Р 59610 [166], при обосновании к требованиям к пешеходным ограждениям при работе над ГОСТ Р 59401 [167], при ранжировании уровней безопасности по ПВВ в ГОСТ Р 59610 к пешеходным переходам, при этом метод был также расширен на оценку уровней ПБ опор в ГОСТ Р 71410 [168].

Композиционное решение по формированию ВП учитывалось при разработке требований к натурным полигонам ОДМ 218.4.033 [169] с заложением возможностей симуляционного анализа МКЭ при разработке ЦМ ДТП при проведении расчетов по ГОСТ Р 59401 и ГОСТ Р 71410.

Таким образом, с учетом теоретического обоснования по Главе 1, УПМК является начальным и ключевым инструментом для цифровизации процессов ДТЭ и ЭП ДТП, способствуя созданию безопасной дорожной среды. Его дальнейшее развитие и внедрение в практику позволит существенно повысить эффективность мер по обеспечению безопасности дорожного движения.

## 6.2. Этапы и мероприятия перехода от УПМК к цифровой платформе ОБДД в рамках эволюции от ВАДС к ОПУС

Концептуальная основа перехода с учетом положений Главы 1 от системы ВАДС (и ее вариаций) к полисистемам ОПУС предполагает поэтапное развитие цифровых инструментов в цепочке: Универсальный полимодельный комплекс (УПМК) → Виртуальный полигон (ВП) → Цифровой двойник (ЦД) ДТП → Цифровая платформа ОБДД. При этом в этой эволюции развитие математического аппарата должно быть направлено на рост точности и переход от анализа к управлению безопасностью от линейных детерминированных моделей (УПМК) к стохастическим и динамическим системам (ВП, ЦД) и далее к комплексной оптимизации (ОБДД) с элементами ИИ и блокчейна.

Этот процесс в указанной цепи будет соответствовать трансформации от локального моделирования к системному управлению безопасностью дорожного движения (БДД) с элементами искусственного интеллекта (ИИ) и предиктивной аналитики.

Опишем общие прогнозируемые черты этапов перехода:

**Этап 1.** УПМК – инструмент для ДТЭ и локальных виртуальных испытаний.

Цель этапа: Создание математических моделей для анализа ДТП и оценки пассивной безопасности ТС и ЭДО (ОТИ).

Мероприятия этапа: разработка библиотек моделей ТС, пешеходов, ЭДО (ОТИ); интеграция с базами данных ДТП (структурированные и неструктурированные данные); автоматизация предпроцессинга (загрузка данных с места ДТП, 3D-сканирование и т.п.); валидация моделей на реальных случаях.

Ожидаемый результат этапа: возможность реконструкции ДТП с точностью  $\geq 85\%$ , а также формирование новых инструментов и

рекомендаций для ЭП ДТП, а также для проектирования и эксплуатации ЭДО (ОТИ).

**Этап 2.** Виртуальный полигон (ВП) – среда для комплексного анализа в ДТЭ и ЭП ДТП, ПБ ТС и ЭДО.

Цель: создание цифровой среды для симуляции ДТП, условий и событий, тестирования ЭДО (ОТИ) и ТС.

Мероприятия этапа: развертывание облачной платформы с модулями моделирования ДТП (Matlab/Simulink, LS-DYNA), анализ рисков (статистика + предиктивные алгоритмы), визуализации (3D-рендеринг, VR-интерфейсы), начало роста КФИ и подключения к датчикам Интернета вещей дорожной инфраструктуры, разработка API для интеграции с ГИС и системами ГИБДД.

Ожидаемый результат этапа: прогнозирование аварийных сценариев, тестирование новых конструкций до внедрения.

**Этап 3.** Цифровые двойники (ЦД), включая появление ЦД событий (полную цифровую тень ДТП) – динамическая модель для управления безопасностью.

Цель: переход от статического анализа к непрерывному мониторингу и оптимизации.

Мероприятия этапа: создание цифровых двойников дорог, ВАТС и т.д.; реализация обратной связи с датчиками (камеры, лидары, телематика ТС); внедрение ИИ для анализа БОД (выявление скрытых закономерностей); автоматизированная корректировка моделей в реальном времени.

Ожидаемый результат этапа: прогнозирование событий на сети, автоматические рекомендации по изменению организации движения.

**Этап 4.** Цифровая платформа ОБДД – интегрированная система управления.

Цель этапа: Формирование единой экосистемы для профилактики ДТП и управления инфраструктурой.

Мероприятия этапа: интеграция с ОПУС; внедрение блокчейна для учета ДТП и экспертных решений; развитие мобильных сервисов для

водителей и пешеходов (оповещения об опасных участках); подключение к национальным программам («Безопасные дороги», «Умный город»).

Ожидаемый результат этапа: снижение смертности на дорогах на 30–50%; реализация полного цикла от анализа ДТП до автоматического внедрения профилактических мер.

Связь с переходом от ВАДС к ОПУС в виде обобщенного сравнения по ключевым аспектам эволюции показана в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Обобщение сравнения систем ВАДС и ОПУС

| № п/п | Критерий   | ВАДС (Текущее состояние)  | ОПУС (Целевое состояние)               |
|-------|------------|---------------------------|----------------------------------------|
| 1     | Функционал | Анализ прошлых ДТП        | Прогноз и предотвращение ДТП           |
| 2     | Данные     | Оффлайн-базы данных       | Интернет вещей в реальном времени + ИИ |
| 3     | Управление | Рекомендации экспертов    | Автоматизированные решения             |
| 4     | Масштаб    | Локальные исследования    | Национальная платформа ОБДД            |
| 5     | Технологии | Статическое моделирование | Динамические цифровые двойники + ИИ    |

Таким образом, ключевыми технологиями становятся преимущественно, те что определяют переход от КФИ к КФС, а именно: ИИ и машинное обучение – для прогнозирования аварий, цифровые двойники – динамическое обновление моделей, блокчейн – прозрачный учет ДТП и экспертных заключений, развертывание сетей 5G в выше и Интернет вещей – передача данных с датчиков в реальном времени. Ключевые аспекты эволюции с учетом изложенного выше, показаны в таблице 6.3.

Переход от УПМК к цифровой платформе ОБДД – это эволюция от инструмента ретроспективного анализа к системе предиктивного управления безопасностью. Внедрение ОПУС позволит перейти от реагирования на ДТП к их предотвращению, что соответствует глобальным трендам Smart City и Vision Zero.

Таблица 6.3 – Ключевые аспекты эволюции

| № | Этап                                 | Прогнозируемое время этапа |                | Ключевые мероприятия                                                                                                                                                                       | Технологии                                                                                      |
|---|--------------------------------------|----------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                                      | оптимистичный              | пессимистичный |                                                                                                                                                                                            |                                                                                                 |
| 1 | Развитие УПМК                        | 3–4 года                   | 6–7 лет        | Создание библиотек (БД) моделей ТС, пешеходов, ЭДО (ОТИ);<br>Интеграция с базами данных фактических ДТП;<br>Автоматизация предпроцессинга данных;<br>Валидация моделей на реальных случаях | Конечно-элементное моделирование (ANSYS, LS-DYNA); ГМAM; СКЭМ; Matlab/Simulink; 3D-сканирование |
| 2 | Создание Виртуального полигона (ВП)  | 2–3 года                   | 3–5 лет        | Развертывание облачной платформы; Разработка модулей моделирования, анализа рисков, визуализации;<br>Подключение датчиков Интернета вещей;<br>Интеграция с ГИС и ГИБДД                     | Облачные вычисления;<br>VR/AR-интерфейсы;<br>аналитика БОД;<br>API-интеграции                   |
| 3 | Внедрение Цифровых двойников (ЦД)    | 3–4 года                   | 4–5 лет        | Создание цифровых двойников; Реализация обратной связи с датчиками;<br>Внедрение ИИ для анализа БОД; Автоматическая корректировка моделей                                                  | ИИ и машинное обучение;<br>Интернет вещей (камеры, лидары, телематика);<br>Реал-тайм аналитика  |
| 4 | Формирование Цифровой платформы ОБДД | 4–5 лет                    | 5–6 лет        | Интеграция с ОПУС;<br>Внедрение блокчейна для учета ДТП;<br>Развитие мобильных сервисов; Подключение к программам "Умный город"                                                            | Блокчейн;<br>5G и выше;<br>Умные контракты;<br>Предиктивная аналитика                           |

Прогнозируемый переход при оптимистичном сценарии следует ожидать к 2032 году, соответственно при пессимистичном сценарии не ранее 2043 года. Таблица 6.3 отражает поэтапный переход от инструментов анализа к системе предиктивного управления безопасностью дорожного движения, соответствующую концепции ОПУС. Внедрение позволит перейти от реагирования на ДТП к их предотвращению.

Представим в таблице 6.4 эволюцию как переход пространства состояний БДД от локальных решений к глобальному охвату, для этого

формализуем пространства ОПУС к этапам, показав их главные свойства на этапе.

Таблица 6.4 – Пространства состояний в рассматриваемой эволюции

| №<br>п/п | Этап                                                  | Пространство состояний                                              | Доминирующее свойство                                                                                                                 |
|----------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | Развитие<br>УПМК                                      | $S_1 = \{\text{объекты}\}$                                          | Пространство образовано<br>изолированными<br>объектами.<br><b>Локальность:</b> анализ<br>отдельных ДТП без учета<br>сетевых эффектов. |
| 2        | Создание<br>Виртуально<br>го полигона<br>(ВП)         | $S_2 = S_1 \times \{\text{пространство, условия}\}$                 | Образует связанную<br>систему.<br>Мезомасштаб: учет<br>региональных<br>зависимостей, но без<br>обратной связи.                        |
| 3        | Внедрение<br>Цифрового<br>двойника<br>(ЦД)<br>событий | $S_3 = S_2 \times \{\text{события}\}$                               | Образуется адаптивная<br>система.<br>Глобальность: динамическ<br>ое обновление моделей на<br>основе Интернета вещей.                  |
| 4        | Формирова<br>ние<br>Цифровой<br>платформы<br>ОБДД     | $S_4 = S_3 \times$<br>$\{\text{социальные факторы, политика БДД}\}$ | Образует полное фазовое<br>пространство.<br>Глобальный<br>охват: самооптимизирую<br>щаяся система с обратной<br>связью.               |

Тогда, в общем виде, с учетом таблицы 6.4 связь этапов через оператор эволюции:

$$S_{k+1} = \varepsilon(S_k, \text{технологии}_{k+1}), k=1,2,3 \quad (6.1)$$

Воспользовавшись введенным оператором эволюции  $\varepsilon$  отразим переходы пространств состояний и их размерность в виде схеме, показанной на рисунке 6.2.

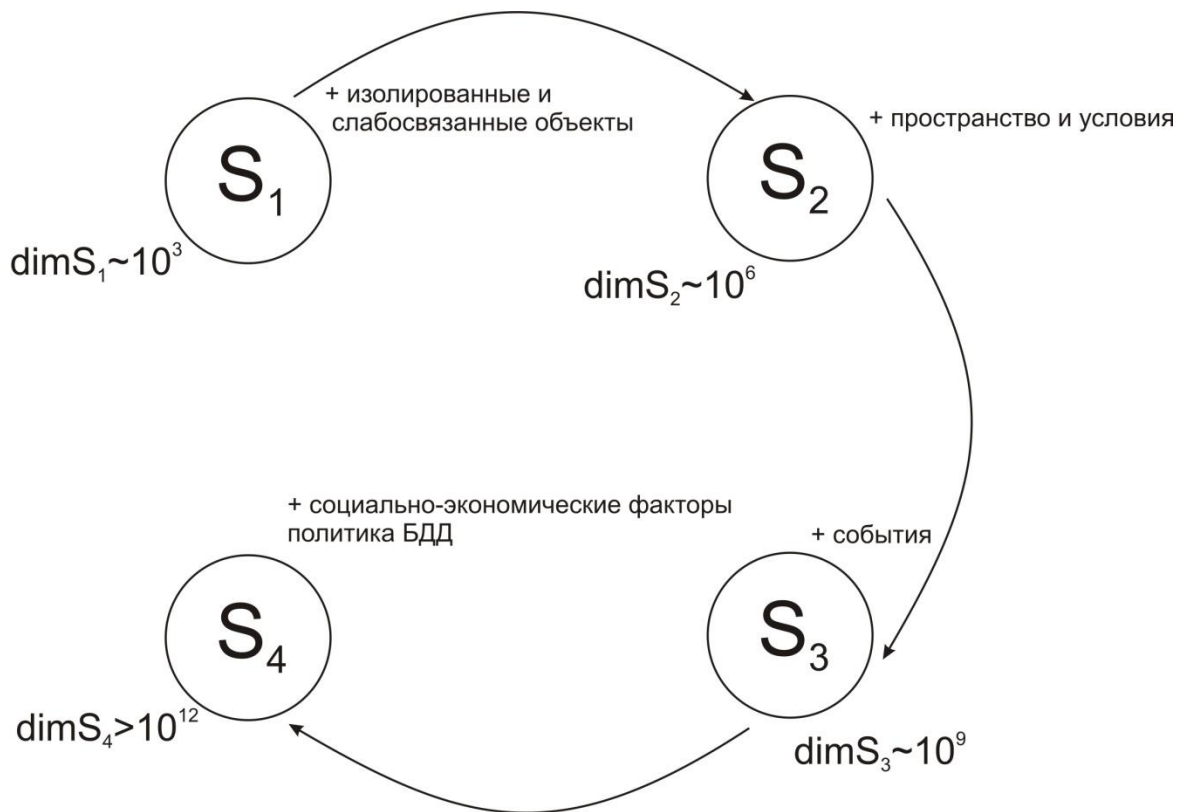


Рисунок 6.2 – Схема переходов пространств состояний

Таким образом, прогнозируемая эволюция описывается расширением фазового пространства (множества всех состояний системы) от локальных параметров ДТП до многомерного пространства данных, управляемого предиктивными моделями на принципах оптимального управления. Фактически, следует заключить, что переход к ОПУС соответствует термодинамическому пределу в теории сложных систем, где дорожное движение (при ОПУС – получение инфраструктурной услуги) становится саморегулируемым процессом.

Предлагаемое и прогнозируемое поэтапное развитие от УПМК к цифровой платформе ОБДД демонстрирует фундаментальный сдвиг в подходе к управлению безопасностью дорожного движения – от реактивного анализа к превентивному системному управлению. На начальном этапе (УПМК) математический аппарат ограничивался дискретными моделями отдельных ДТП с использованием методов конечных элементов и локальной статистики, что в настоящий момент позволяет решать широкий спектр

узкоспециализированных задач ДТЭ и формировать методический потенциал для ЭП ДТП. Однако уже на стадии Виртуального полигона должен произойти качественный скачок, который существенно расширит пространство состояний системы, включив в анализ региональные закономерности и вероятностные сценарии. Это создаст основу для перехода от изолированного рассмотрения событий ДТП к комплексной оценке и прогнозированию рисков в масштабах транспортной инфраструктуры.

Ключевой трансформацией станет внедрение цифровых двойников, где математический аппарат обогатится динамическими моделями. Это позволит не только описывать текущее состояние системы, но и прогнозировать ее эволюцию в реальном времени, учитывая непрерывный поток данных с устройств находящихся в Интернете вещей. Завершающая стадия эволюции – цифровая платформа ОБДД – реализует принципы оптимального управления, что математически соответствует переходу в пространство состояний сверхвысокой размерности (более  $10^9 \div 10^{12}$ ). Здесь безопасность дорожного движения становится порождаемым свойством сложной адаптивной системы, где локальные взаимодействия объектов генерируют глобальные паттерны поведения, поддающиеся анализу и оптимизации.

Философский аспект этой эволюции заключается в переходе от детерминированного «инженерного» мировоззрения к стохастической парадигме сложных систем. Если на этапе УПМК система описывалась преимущественно ньютоновской механикой, то ОПУС требует применения методов статистической физики, теории хаоса и сложных сетей. Практическим следствием становится принципиальная возможность активно формировать «ландшафт безопасности» через управление аттракторами системы. Таким образом, представленный в работе комплексный теоретико-методический аппарат не просто отражает технологический прогресс, но и знаменует смену эпистемологической парадигмы в области безопасности дорожного движения – от анализа частных случаев к управлению

системными рисками в масштабах национальной транспортной инфраструктуры.

Последний тезис затрагивает глубокий аспект теории динамических систем в контексте безопасности дорожного движения. Здесь следует отметить, что аттракторы в системе БДД – это не просто режимы движения (предельные траектории), а устойчивые состояния, к которым эволюционирует транспортная система под действием внешних и внутренних факторов. Их фрактальная природа действительно открывает возможности для управления через самоподобие, но с важными особенностями:

### 1. Аттракторы как фрактальные множества в БДД

Определение: В фазовом пространстве системы БДД (где координаты – параметры потока ТС, инфраструктуры, поведения участников) аттракторы – это множества состояний, к которым система стремится при заданных условиях. Примерами могут служить, например: стабильный режим движения при оптимальной организации дороги, т.е. точечный аттрактор или странный аттрактор – хаотичные колебания потока перед коллапсом в пробку.

Фрактальные свойства: Структура аттракторов часто самоподобна на разных масштабах (например, локальные "мини-пробки" повторяют глобальную динамику). Это подтверждается: масштабной инвариантностью статистики ДТП, повторяемостью паттернов движения на разных участках дорожной сети.

### 2. Управление через самоподобие: возможности и ограничения

Принцип управления: если аттрактор фрактален, его глобальную динамику можно корректировать через воздействие на ключевые «узлы» самоподобия (аналогично ренормализационной группе в физике): введение единых правил на масштабах всей сети (например, адаптивных светофорных циклов) или локальные изменения в "типовых" точках (развязки, пешеходные переходы), которые масштабируются на систему.

Возникающие при этом проблемы:

1. Неполное самоподобие: антропогенные факторы (например, поведение водителей) нарушают строгую фрактальность до полного перехода к ВАТС.

– Мультифрактальность: разные участки дорог требуют различных управляющих воздействий, несмотря на формальное подобие. Пример: оптимизация потока на кольцевой развязке (фрактальный аттрактор «спиралевидного» движения) через: единый алгоритм приоритета ТС (самоподобие правил) и датчики, корректирующие динамику в реальном времени.

3. Связь с введенными ранее моделями в контексте эволюции от ВАДС к ОПУС:

– применение УПМК на ВП отражает локальные аттракторы (например, типовые сценарии ДТП на перекрестках).

– внедрение Цифровых двойников, позволит отразить фрактальную карту аттракторов всей дорожной сети.

– формирование ЦП БДД (ОПУС), позволит управлять системой в том числе через: редукцию аттракторов, за счет искусственного сужения фазового пространства (сжатие сложных аттракторов до управляемых многообразий).

4. Практическим следствием является то, что управление через фрактальные свойства не заменяет, а дополняет традиционные методы, где необходимо оптимизировать дорожные сети с повторяющейся топологией (например, городские кварталы) и прогнозировать каскадные отказы, но при этом сильно ограничено для применения к уникальным объектам и сооружениям (мосты, тоннели), а также к социальным факторам.

Таким образом, фрактальность аттракторов БДД – мощный инструмент, но его применение требует сочетания с динамическими моделями для учета нелинейностей, с ИИ для работы с «размытыми» фракталами и с обратной связью от устройств в Интернете вещей для коррекции в реальном времени. Это позволяет отметить, что управление

через самоподобие является новым ракурсом или иным способом работы со сложностью, требующее переосмысления классических подходов к безопасности дорожного движения.

### **6.3. Роль и место анализа самоподобных состояний в эволюции от УПМК до цифровой платформы ОБДД**

С учетом определений Главы 1, опишем математическую модель динамики пространств эксплуатационных состояний (на векторах: эксплуатация ВАТС, эксплуатация дорог, инфраструктурная услуга, транспортная услуга) системы управления ВАТС на условии обеспечения устойчивости состояния безопасности (по видам) процесса дорожного движения.

Для описания динамики системы управления ВАТС с учётом необходимости обеспечения устойчивости БДД предлагается следующая модель:

Определение пространств состояний системы управления ВАТС:

Эксплуатация ВАТС: состояние описывается вектором  $x_1(t)$ , включающим параметры работы транспортного средства (скорость, исправность, уровень автоматизации).

Эксплуатация дорог: вектор  $x_2(t)$  характеризует состояние дорожной инфраструктуры (качество покрытия, загруженность, наличие препятствий).

Инфраструктурная услуга: вектор  $x_3(t)$  отражает доступность сервисов (зарядка, навигация, связь).

Транспортная услуга: вектор  $x_4(t)$  описывает качество услуги (время доставки, безопасность, комфорт).

Тогда динамика системы управления ВАТС описывается как:

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(X(t), U(t), D(t)), \quad (6.2)$$

где  $X(t)=[x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)]$  – объединённый вектор состояний.

$U(t)$  – управляющие воздействия (например, коррекция маршрута, адаптация скорости).

$D(t)$  – внешние возмущения (погода, аварии, кибератаки).

Соответственно введем условия устойчивости:

Для каждого вида безопасности в терминах настоящей работы вводится функция Ляпунова  $V_i(X)$ : функциональная безопасность –  $V_1(X)$  оценивает отклонения от нормы работы компонентов, пользовательская безопасность –  $V_2(X)$  связана с риском травмирования, киберфизическая безопасность –  $V_3(X)$  отражает устойчивость информационных процессов.

Откуда условие устойчивости системы управления ВАТС:

$$\frac{dV_i(X)}{dt} \leq 0 \quad \forall i, \quad (6.3)$$

При этом по Главе 1 классификацию состояний предполагает:

Самоподобное состояние:  $X(t)$  обладает статистической инвариантностью, т.е.  $X(t) \sim X(kt)$  для любого масштаба  $k$ .

Обособленное состояние:  $X(t)$  не инвариантно, что требует коррекции управления  $U(t)$ .

Для системы ОПУС управление рисками на ВАТС предлагается классифицировать на три уровня: высокий, допустимый и недопустимый. Каждый уровень характеризуется своими пороговыми значениями, реакциями системы и стратегиями управления, как показано в таблице 6.5.

Предложенная трехуровневая система управления рисками позволяет гибко реагировать на них, минимизируя последствия для безопасности. Интеграция пороговых значений  $\tau_{\text{доп}}$  и  $\tau_{\text{недоп}}$  обеспечивает баланс между профилактикой и экстренными мерами.

Таблица 6.5 – Уровни рисков

| № п/п | Вводимый уровень риска | Порог                                                                                    | Реакция системы                                                                                                                                                                                                                         | Пример                                                                           |
|-------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | Допустимый             | Риск ниже предустановленного предела $\tau_{\text{доп}}$ .                               | Мониторинг и сбор данных. Локальная коррекция параметров (например, снижение скорости ВАТС на 10–15%). Уведомление оператора без перехода в аварийный режим                                                                             | Незначительное ухудшение сцепления с дорогой, корректируемое автоматикой.        |
| 2     | Высокий                | Риск превышает $\tau_{\text{доп}}$ , но остается ниже критического $\tau_{\text{недоп}}$ | Активное вмешательство: принудительное снижение скорости, изменение маршрута. Переход на резервные системы (например, дублирующие датчики). Требование подтверждения действий от оператора (если антропоцентрический контроль включен). | Частичная потеря связи с инфраструктурой, компенсируемая автономными алгоритмами |
| 3     | Недопустимый           | Риск превышает $\tau_{\text{недоп}}$                                                     | Немедленная остановка ВАТС или переход в безопасный режим (например, аварийная парковка). Полное отключение автоматизации, передача управления человеку (если возможно). Активация протоколов киберзащиты при цифровых угрозах.         | Обнаружение кибератаки, ведущей к ложным командам управления                     |

Вводимая классификация позволит точно идентифицировать источник проблемы, что критично для киберфизических систем, где ошибки могут каскадно распространяться.

Рекомендации по развитию можно определить следующими положениями:

Необходимо развитие адаптивных алгоритмов: для высокого уровня риска целесообразно внедрение машинного обучения, предсказывающего эскалацию рисков на основе исторических данных.

Необходимо тестирование на симуляторах: моделирование обособленных состояний (например, массовых сбоев инфраструктуры) для проверки устойчивости управления.

Необходимо ввести регуляторные требования: закрепление уровней  $\tau_{\text{доп}}$  и  $\tau_{\text{недоп}}$  в отраслевых стандартах, особенно для кибербезопасности ВАТС.

Система обеспечивает не только реакцию на риски, но и проактивное поддержание самоподобных состояний, что соответствует эволюционным принципам ОПУС, в частности, она позволяет анализировать динамику эксплуатационных состояний ВАТС, обеспечивая устойчивость БДД за счёт: разделения на подпространства (ВАТС, дороги, услуги); использования функций Ляпунова для контроля безопасности; автоматического управления при отказах. Что соответствует принципам системы ОПУС, расширяя её данным математическим аппаратом для практического применения.

Анализ самоподобных состояний, где система демонстрирует статистическую инвариантность на всех масштабах времени, играет ключевую роль в эволюции от УПМК к цифровой платформе ОБДД. В контексте перехода от системы ВАДС к ОПУС, самоподобные состояния позволяют решить задачи обеспечения устойчивости и занимают место в цепочке переходов, реализуя роли, как представлено в таблице 6.6.

Таблица 6.6 – Роль и место самоподобных состояний

| № этапа | В задаче обеспечения устойчивости моделей                                                                                                                                                       | Роль и место в эволюционной цепочке                                                                                                                                                                                                |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | В УПМК анализ самоподобных состояний помогает валидировать детерминированные модели ДТП, гарантируя их воспроизводимость при различных сценариях (например, реконструкция аварий с пешеходами). | УПМК: Самоподобие закладывается на уровне стандартизированных моделей (например, ГОСТ Р 59401 для ограждений), где результаты испытаний должны быть воспроизводимы при любых условиях.                                             |
| 2       | На ВП самоподобие используется для масштабирования результатов локальных симуляций на всю дорожную сеть, что критично для прогнозирования аварийных сценариев.                                  | ВП: Здесь анализ самоподобных состояний позволяет:<br>Тестировать универсальные решения для разных типов дорог (город/трасса).<br>Выявлять инвариантные риски (например, типовые ошибки водителей), которые не зависят от локации. |

| № этапа | В задаче обеспечения устойчивости моделей                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Роль и место в эволюционной цепочке                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3       | Поддержка предиктивности в цифровых двойниках: динамические модели ЦД требуют инвариантности параметров безопасности (функциональной, пользовательской, киберфизической) для корректной работы ИИ-алгоритмов. Например, устойчивые паттерны поведения участников движения в самоподобных состояниях позволяют обучать предиктивные модели на ограниченных данных. | ЦД: Самоподобие обеспечивает: Масштабируемость прогнозов (например, перенос данных с одного участка дороги на аналогичные). Устойчивость к возмущениям (кибератаки, погодные аномалии) за счет сохранения статистических свойств.                                                                                                        |
| 4       | Реализовать саморегуляцию в цифровой платформе ОБДД: в ОПУС самоподобные состояния становятся основой для автономного управления инфраструктурой (светофоры, знаки) без вмешательства человека, так как система сохраняет баланс безопасности даже при изменении масштабов (например, рост трафика или кибератаки).                                               | Цифровая платформа ОБДД: На этом этапе самоподобные состояния становятся термодинамическим пределом системы, где безопасность поддерживается автоматически через: Предиктивную аналитику на основе инвариантных паттернов. Блокчейн-ведение данных, гарантирующее неизменность ключевых параметров (например, пороговых значений риска). |

Учитывая вышеизложенное, целесообразно дать следующие выводы и рекомендации: показанный в работе аппарат может быть интегрирован в стандарты, в частности допустимо включить требования к проверке самоподобия моделей в ГОСТы (например, для цифровых двойников); необходимо существенное развитие ИИ-алгоритмов, а именно необходимо обучать нейросети на инвариантных сценариях для повышения надежности прогнозов; при тестировании на виртуальных полигонах целесообразно проверять устойчивость систем к переходу между самоподобными и обособленными состояниями (например, при массовых ДТП).

Таким образом, анализ самоподобных состояний – это связующее звено между ретроспективным моделированием в УПМК и предиктивным управлением в ОПУС, обеспечивая непрерывность эволюции к безопасной дорожной среде.

#### 6.4. Выводы по Главе 6

Представленные в главе результаты и прогнозы формируют основу для трансформации подходов к безопасности дорожного движения, сочетая инновационные технологии с глубоким методологическим обоснованием. Следует отметить:

1. Применение вышеизложенных комплексов методик и методов в УПМК на ВП были использованы в расчете ширины пешеходных переходов при работе над ГОСТ Р 59610, при обосновании к требованиям к пешеходным ограждениям при работе над ГОСТ Р 59401, при ранжировании уровней безопасности по ПВВ в ГОСТ Р 59610 к пешеходным переходам, при этом метод был также расширен на оценку уровней ПБ опор в ГОСТ Р 71410.

2. Композиционное решение по формированию ВП учитывалось при разработке требований к натурным полигонам ОДМ 218.4.033 с заложением возможностей симуляционного анализа МКЭ при разработке ЦМ ДТП при проведении расчетов по ГОСТ Р 59401 и ГОСТ Р 71410.

3. Разработанный УПМК доказал свою эффективность не только как инструмент ретроспективного анализа ДТП, но и как основа для прогностического моделирования. Его интеграция с виртуальным полигоном (ВП) и в дальнейшем с цифровыми двойниками (ЦД) позволит создать многоуровневую систему, способную охватывать как локальные, так и глобальные аспекты безопасности дорожного движения (БДД).

4. Переход от УПМК к цифровой платформе ОБДД отражает фундаментальный сдвиг от реактивного подхода к превентивному управлению. Внедрение технологий искусственного интеллекта, Интернета вещей и блокчейна обеспечивает не только анализ прошлых событий, но и прогнозирование рисков в реальном времени. Эта эволюция соответствует концепции ОПУС, где безопасность становится свойством саморегулирующейся системы. Ключевым достижением является

возможность масштабирования решений – от локальных моделей ДТП до национальной платформы, что открывает новые перспективы для снижения аварийности и повышения устойчивости транспортной системы.

5. Анализ самоподобных состояний станет связующим звеном между этапами эволюции, обеспечивая инвариантность моделей на разных масштабах. Это особенно важно для цифровых двойников, где динамическое обновление данных требует сохранения ключевых параметров безопасности. Предложенная трехуровневая система управления отказами (допустимый, высокий, недопустимый) демонстрирует гибкость и надежность в условиях неопределенности, что критично для киберфизических систем. Рекомендации по интеграции этих принципов в отраслевые стандарты и обучение специалистов подчеркивают практическую направленность исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научно-практические результаты диссертационного исследования:

1. Сформированные теоретические основы, их понятийный аппарат в представленной концепции позволили определить условия и основные механизмы эволюционного перехода от ВАДС к ОПУС на оси цифровизации (цифровой трансформации) от МОР к ЦД на цифровой платформе ОБДД. Сформирован фундаментальный аппарат для смены парадигмы организации управления БДД с древовидной иерархии на сетевую, при этом математически доказана возможность нахождения областей оптимальных решений в каждом слое связей ДТЭ – ЭП ДТП – ПБ ТС и ЭДО – ОБДД при переходе к кавизилинейному представлению редукции пространств состояний через самоподобие и комплексные числа.

При реализации механизма обеспечения эффективности ДТЭ и ЭП ДТП с участием пешеходов в поставленной формулировке, разрабатываемый аппарат ориентирован на обеспечение снижения индексов травмирования, что формирует базис для ПБ ТС и разработки комплекса организационно-технических мер по формированию требований к объектам дорожного обустройства, включая технические средства ОБДД. В этом случае снижение смертности в дорожном движении в целом (включая смертность пешеходов) является следствием применения таких мер, а также целевым эффектом от их внедрения.

2. На основе анализа выборки ДТЭ по ДТП с участием пешеходов, выполнен широкий спектр аналитических исследований, охватывающий полностью механизм ДТП с участием пешеходов, а также включающий анализ примененных методов ДТЭ, их эффективности, категоричности выводов в них, использования МОР, применения данных БУРС, отдельных видов методов исследования, причин отказа экспертов от решения различных групп вопросов (таких как определение места ДТП, скорости движения и

т.д.). При этом впервые сформировано факторное пространство связи ДТЭ – ЭП ДТП – ПБ ТС – ОБДД, включающее: 12 целевых групп, всего 110 факторов, из них: 95 независимых и 10 смежных в группах. Данное факторное пространство использовано внутри предметной области исследования при разработке, как теоретического аппарата, так и методических комплексов вышеуказанной связи слоев.

3. Разработанная параметризованная гибридная модель антропоморфного манекена, с возможностью отражения локализаций телесных повреждений на модели (что отсутствует в моделях типа MADYMO), при применении в процедурах МОР в ДТЭ и ЭП ДТП (а также и при ПБ ТС и ЭДО) по сравнению с полными антропоморфными моделями типа THUMS, сокращает время расчета МКЭ на в среднем 23%. При этом, выполненное сравнение ГММ к модели THUMS на тестовых данных NHTSA показало значения величин ошибки перемещений центров масс и ошибки расчета индексов травмирования не превышающими 5%.

4. При разработке механизма повышения эффективности ДТЭ на слое производства ДТЭ по ДТП с участием пешеходов, был разработан комплекс методик, включающий: методику расчета затрат скорости на КСВ на базе суррогатных КЭМ; методику расчета риска травмирования; методику оптимизации цифровой модели механизма ДТП выполненной при МОР генетическим алгоритмом.

Применение методики расчета затрат скорости на КСВ на базе суррогатных КЭМ при определении фактической скорости ТС в момент наезда на пешехода позволило получить сходимость конечной ЦМ ДТП в МОР с результатами расчета скорости по видеозаписям с ошибкой не более 5%, при этом имело место снижение затрат времени на производство ДТЭ в среднем до 18%.

В результате применения методики расчета риска травмирования в практике производства ДТЭ, установлено что при решении типовых

(индексированных) задач A1, A2, Б, В, Г объем вероятностных и условных выводов в ДТЭ снижется до нуля при применении метода в МОР.

При применении в МОР методики оптимизации цифровой модели механизма ДТП на основе генетического алгоритма установлено, что площади областей вариативных значений ЦМ могут быть уменьшены на 87%, при сравнении с методами итерационной оптимизации и методом Монте-Карло.

Все разработанные методики в рамках данного комплекса показали высокую пригодность для переноса информационной сущности на вышележащий слой ЭП ДТП – ПБ ТС.

5. При разработке инструментов повешения эффективности в слое ЭП ДТП – ПБ ТС, был разработан и внедрен на практике комплекс методов обеспечения эффективности ЭП ДТП и ПБ ТС в ОПУС, включающий: метод оптимизации геометрии продольных и поперечных сечений фронтальной части кузова легковых ТС на базе генетического алгоритма; метод расчета оценки удобства обслуживания (безопасности доступа к обслуживанию в состояниях ОПУС) для пешеходов с вариацией факторов оценки; метод определения уровней безопасности участка дороги по оценке прогнозируемого времени выхода (ПВВ).

При применении метода оптимизации геометрии продольных и поперечных сечений фронтальной части кузова легковых ТС на базе генетического алгоритма достигнуто снижение индексов травмирования пешехода в среднем до 23% (для группы из 6 кластеров геометрии фронтальной зоны ТС). При применении метода расчета оценки удобства обслуживания (безопасности доступа к обслуживанию в состояниях ОПУС) для пешеходов с вариацией факторов оценки получено прогнозируемое снижение индексов травмирования пешехода до 58% при соотношении стоимости решений (введения организационных мер) к сокращению числа наездов до 1:8. При применении метода определения уровней безопасности участка дороги по оценке прогнозируемого времени выхода (ПВВ) получено,

что рациональное смещение области конфликтов в границы высоких и средний уровней ПБ может достигать до 37% при комплексном применении всех предложенных методов.

6. Комплексы методик слоев ДТЭ и ЭП ДТП включены в разработанный универсальный полимодельный комплекс виртуального полигона для оценки ПБ ТС, при этом сформированы и апробированы на практике процедуры оптимизации, машинного обучения для численного моделирования при оценке эффективности мероприятий ЭП ДТП и повышения пассивной безопасности ТС и элементов дорожного обустройства. В частности, применение связанных комплексов методик в УПМК на ВП использованы в расчете ширины пешеходных переходов при работе над ГОСТ Р 59610, при обосновании к требованиям к пешеходным ограждениям при работе над ГОСТ Р 59401, при ранжировании уровней безопасности по ПВВ в ГОСТ Р 59610 к пешеходным переходам, при этом метод был также расширен на оценку уровней ПБ опор в ГОСТ Р 71410.

Композиционное решение по формированию ВП учитывалось при разработке требований к натурным полигонам ОДМ 218.4.033 с заложением возможностей симуляционного анализа МКЭ при разработке ЦМ ДТП при проведении расчетов по ГОСТ Р 59401 и ГОСТ Р 71410.

7. Предложенная концепция эволюции к полисистеме ОПУС на оси перехода от МОР в УПМК и далее в ЦД на цифровой платформе ОБДД, закладывает новые научные основы для научных исследований по оценке состояний на принципах редукции самоподобия и анизотропности/изотропности пространств в комплексных отображениях, формируя потенциально новые направления для дальнейших работ и прикладных решений.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

а/м – автомобиль

БД – база данных

БОД – большие объемы данных

БУРС – бортовое устройство регистрации событий

ВАТС – высокоавтоматизированное транспортное средство

ВАДС – система Водитель – Автомобиль – Дорога – Среда

ВП – виртуальный полигон (цифровой испытательный полигон)

ДТП – дорожно-транспортное происшествие

ДТС – дорожно-транспортная ситуация

ДТЭ – дорожно-транспортная экспертиза

ГА – генетический алгоритм

ИИ – искусственный интеллект

КСВ – контактно-следовое взаимодействие

КПОИ – конечное положение объекта исследования после ДТП

КПТ – комплексный показатель травмирования

ЛД – локализации деформаций

ЛТП – локализации телесных повреждений

МКЭ – метод конечных элементов

МОР – модельно-ориентированная реконструкция

ОБДД – обеспечение безопасности дорожного движения

ОПУС – система Объект – Пространство – Условие – Событие

ОИ – объект (-ы) исследования

ОТИ – объект транспортной инфраструктуры

ОЭМ – оценка эффективности мероприятия

ПБ – пассивная безопасность

ПВВ – прогнозируемое время выхода

ПВХ – пространственно-временные характеристики

ПДД – Правила дорожного движения

ПО – программное обеспечение

ПСИ – пространственно-следовая информация

РОП – риск-ориентированный подход

СЗФО – Северо-Западный Федеральный Округ

СМЭ – судебно-медицинская экспертиза

ТВ – техническая возможность

ТП – телесные повреждения

ТС – транспортное средство

ТЭС – транспортно-эксплуатационное состояние

УПМК – универсальный полимодельный комплекс

ЦМ – цифровая модель

ЦТ – центр тяжести

ФКВ – факт контактно-следового взаимодействия

ЭП – экспертная профилактика

AIS – Abbreviated Injury Scale

ASI – Acceleration Severity Index

CDS – Crashworthiness Data System

EDR – Event Data Recorder

HIC – Head injury criterion

ISS – Injury Severity Score

FARS – Fatality Analysis Reporting System

NCAP – New Car Assessment Program

NIC – Neck Injury Criteria

Nij – Normalized Neck Injury Criterion

NHTSA – National Highway Traffic Safety Administration

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Боровский Б.Е. Безопасность движения автомобильного транспорта. – Л.: Лениздат, 1984. -304с., ил.
2. Добромиров, В. Н. Организация безопасного дорожного движения на пешеходных переходах / В. Н. Добромиров, С. С. Евтюков, Е. В. Голов // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 6(65). – С. 265-270. – DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-6-265-270. – EDN YPNFXV.
3. Домке Э.Р. Расследование и экспертиза дорожно-транспортных происшествий. М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 288 с.
4. Артемов, А. Ю. Влияние факторов на вероятность возникновения наезда на пешехода / А. Ю. Артемов, С. В. Дорохин // Информационные технологии и инновации на транспорте : Материалы VI Международной научно-практической конференции, Орёл, 20 мая 2020 года / Под общей редакцией А.Н. Новиков. – Орёл: Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, 2020. – С. 161-165. – EDN UIIDGC.
5. Анализ конфликтов при взаимодействии транспортно-пешеходного потока / Э. Н. Бусарин, С. В. Дорохин, В. П. Белокуров, А. Э. Бусарина // Актуальные вопросы и перспективы развития современной науки : Материалы Национальной научно-практической конференции, Воронеж, 15 марта 2022 года / Отв. редактор В.А. Зеликов. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2022. – С. 40-46. – DOI 10.34220/CIPDMS2022\_40-46. – EDN IJАНСК.
6. Определение коэффициента трения тела пешехода при расследовании ДТП / С. А. Евтюков, Е. В. Тюлькин, П. А. Степина, В. А. Безгина // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – № 3(68). – С. 166-170. – DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-3-166-170. – EDN YLBPVZ.
7. Тюлькин, Е. В. Физическая модель фронтального наезда автомобиля на пешехода / Е. В. Тюлькин, С. А. Евтюков, П. А. Степина // Вестник

гражданских инженеров. – 2017. – № 3(62). – С. 259-264. – DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-3-259-264. – EDN YYZHNV.

8. Евтюков, С. А. Определение скорости транспортного средства по отбросу тела пешехода при наезде / С. А. Евтюков, А. В. Чудаков // Информационные технологии и инновации на транспорте : Материалы международной научно-практической конференции, Орел, 19–20 мая 2015 года / Под общей редакцией А.Н. Новикова. – Орел: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс", 2015. – С. 280-285. – EDN ULLTUD.

9. Евтюков С.С. Методология оценки и повышения эффективности дорожно-транспортных экспертиз [Текст]: дис. ... докт. техн. наук: 05.22.10 / С.С. Евтюков. – СПб, 2020. – 355 с.

10. Евтюков, С. С. Аудит безопасности дорожного движения как элемент системного управления деятельностью по предотвращению ДТП / С. С. Евтюков, Е. В. Куракина // Информационные технологии и инновации на транспорте : Материалы 4-ой Международной научно-практической конференции, Орел, 15–16 мая 2018 года / Под редакцией А.Н. Новикова. – Орел: Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, 2019. – С. 126-132. – EDN PYRMMV.

11. Жанказиев, С. В. Анализ состояния дорожного движения методом экспертных оценок / С. В. Жанказиев, С. Х. Нгуен // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2019. – № 1(87). – С. 7-10.

12. Беспилотники на дорогах России : (уголовно-правовые проблемы) / А. И. Воробьев, С. В. Жанказиев, С. А. Иванов [и др.]. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "Перспектив", 2021. – 520 с. – ISBN 978-5-392-32846-8. – EDN TCUOLW.

13. Применение интеллектуальных транспортных систем для снижения тяжести последствий ДТП / С. В. Жанказиев, Х. М. Нгуен, В. Н.

Вздыхалкин, П. В. Карпов // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2019. – № 2(88). – С. 2-4. – EDN XZLQOD.

14. Кравченко, П. А. Концепция обеспечения нулевой смертности на дорогах России как механизм борьбы с причинами дорожно-транспортных происшествий / П. А. Кравченко, С. В. Жанказиев, Е. М. Олещенко // Транспорт Российской Федерации. – 2019. – № 4(83). – С. 3-7.

15. Кристи Н.М. Методические рекомендации по производству автотехнической экспертизы. М.: ЦНИИСЭ, 1971 – 112с.

16. Кристи Н.М. Решение отдельных типовых задач судебной автотехнической экспертизы: справочное пособие для экспертов-автотехников. М.:ВНИИСЭ, 1988. – 72.

17. Повышение безопасности движения автомобилей на основе анализа аварийности и моделирования ДТП / В. А. Корчагин, С. А. Ляпин, В. Э. Клявин, В. В. Ситников // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 6-2. – С. 251-256. – EDN UBKBYX.

18. Метод объективной оценки уровня обеспечения безопасности движения / В. А. Корчагин, А. К. Погодаев, В. Э. Клявин, В. А. Суворов // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2017. – № 1(79). – С. 10-12. – EDN YHXBVN.

19. Application of the System Engineering Method when Researching the Carat Pedestrian / V. A. Zelikov, G. A. Denisov, N. I. Zlobina [et al.] // Proceedings of the International Conference on Aviaemechanical Engineering and Transport (AviaENT 2019), Irkutsk, 27 мая – 01 2019 года. – Irkutsk: Atlantis Press, 2019. – P. 390-394. – DOI 10.2991/aviaent-19.2019.72. – EDN NXMDXY.

20. Кущенко, С. В. Повышение эффективности организации движения на основе моделирования транспортных потоков : специальность 05.22.10 "Эксплуатация автомобильного транспорта" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кущенко Сергей Викторович. – Белгород, 2012. – 134 с. – EDN QFYIWJ.

21. Ложкин, В. Н. Прогнозирование и сервисная диагностика безопасности автотранспорта при неблагоприятных дорожных и метеорологических условиях / В. Н. Ложкин, О. В. Ложкина, И. А. Онищенко // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2018. – № 1(43). – С. 6-11. – EDN YXPGLU.

22. Лукошявичене О. В. Моделирование дорожно-транспортных происшествий. – М.: Транспорт, 1988. – 96 с.

23. Петров, А. И. Формализация результатов оценки отношения участников дорожного движения к необходимости соблюдения правил дорожного движения / А. И. Петров, С. А. Евтюков // Прогрессивные технологии в транспортных системах : Сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции, Оренбург, 20–22 ноября 2019 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет». – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2019. – С. 448-456. – EDN OFSSCX.

24. Петров, А. И. Философские основания возможности использования энтропийного подхода в сфере управления безопасностью дорожного движения / А. И. Петров, С. А. Евтюков // Проблемы функционирования систем транспорта : Материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2-х томах, Тюмень, 05–07 декабря 2018 года / Ответственный редактор А.В. Медведев. Том 2. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. – С. 284-290. – EDN QHRSQS.

25. Петров, А. И. Концептуальные смыслы энтропийного анализа состояния безопасности дорожного движения в разномасштабных автотранспортных системах / А. И. Петров, С. А. Евтюков // Мир транспорта и технологических машин. – 2022. – № 3-4(78). – С. 55-62. – DOI 10.33979/2073-7432-2022-4(78)-3-55-62. – EDN YUUFWT.

26. Малыгин, И. Г. Внедрение когнитивных транспортных систем для обеспечения безопасности дорожного движения / И. Г. Малыгин, О. А. Королев // Перспективы развития транспортного комплекса : материалы V Международной заочной научно-практической конференции, Минск, 01–03 октября 2019 года. – Минск: Республиканское унитарное предприятие "Белорусский научно-исследовательский институт транспорта "Транстехника", 2019. – С. 47-60. – EDN PSBTIO.

27. Новиков, А. Н. Пути достижения показателей «нулевой смертности» как фактор повышения безопасности дорог городских агломераций / А. Н. Новиков, А. Г. Шевцова // Актуальные вопросы административно-правовой деятельности органов внутренних дел : сборник статей профессорско-преподавательского состава, курсантов и слушателей, Орел, 23 ноября 2023 года. – Орел: Орловский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации имени В.В. Лукьянова, 2023. – С. 94-98. – EDN EMFLRR.

28. Новиков, А. Н. Современная оценка проблемы безопасности дорожного движения / А. Н. Новиков, И. А. Новиков, А. Г. Шевцова. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. – 108 с. – ISBN 978-5-361-00908-4. – EDN VACGFY.

29. Новиков, А. Н. Научно-методологический подход к прогнозированию и предупреждению дорожно-транспортных происшествий / А. Н. Новиков, И. А. Новиков // Управление деятельностью по обеспечению безопасности дорожного движения: состояние, проблемы, пути совершенствования. – 2019. – № 1(2). – С. 336-342. – EDN JYFWGH.

30. Частотная оценка характеристик водителя при наездах на пешехода / Е. В. Печатнова, И. А. Новиков, С. Н. Павлов, А. В. Еськов // Мир транспорта и технологических машин. – 2024. – № 2-2(85). – С. 98-106. – DOI 10.33979/2073-7432-2024-2-2(85)-98-106. – EDN LFJZAH.

31. Новиков, И. А. Выявление и визуальный анализ опасных участков федеральных дорог, связанных с наездами на пешеходов / И. А.

Новиков, Е. В. Печатнова // Техника и технология транспорта. – 2023. – № 2(29). – EDN YLJXVS.

32. Плотников, А. М. Методология обеспечения безопасности движения на регулируемых пересечениях улично-дорожных сетей мегаполисов : специальность 05.22.10 "Эксплуатация автомобильного транспорта" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Плотников Анатолий Михайлович, 2017. – 475 с. – EDN ELVCEW.

33. Сильянов, В. В. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Автомобили и автомобильное хозяйство" направления подготовки "Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования" / В. В. Сильянов ; В. В. Сильянов, Э. Р. Домке. – 2-е изд., стер.. – Москва : Академия, 2008. – (Высшее профессиональное образование. Дорожное строительство). – ISBN 978-5-7695-4864-2. – EDN QNUTNX.

34. Суворов, Ю. Б. Некоторые научные, методические и практические аспекты экспертного исследования механизма наезда на пешехода / Ю. Б. Суворов // Автотранспортное предприятие. – 2016. – № 10. – С. 12-16. – EDN XQNGQF.

35. Суворов Ю.Б. Судебная дорожно-транспортная экспертиза: Учеб. пособие. – М.: Изд. «Экзамен», «Право и закон», 2003.

36. Аналитические методы снятия неопределённости – основа цифровизации автотранспортного производства: монография / А. В. Терентьев, С. С. Евтюков, Е. А. Карелина, Е. В. Куракина. – Санкт-Петербург : Петрополис, 2018. – 208 с. : ил.

37. Batista M. A simple throw model for frontal vehicle-pedestrian collisions. *Promet – Traffic&Transportation*. 2008;20(6): 357-68

38. Searie J. A., Searle A. The Trajectories of Pedestrians, Motorcycles, Motorcyclists etc following a Road Accidents. // *Proceedings 27th Stapp Car Crash Conference, SAE, 1983. – Page 2177.*

39. Randles, B. C., Fugger, T. F., Eubanks, J. J., Pasanen E.: Investigation and Analysis of Real-Life Pedestrian Collisions. SAE Technical Paper Series, 2001-01-0171.
40. Moser, A., Hoschopf, H., Steffan, H., Kasanicky G.: Validation of the PC-Crash Pedestrian Model. SAE Technical Paper Series, 2000-01-0847.
41. Wood D.P. Application of a pedestrian impact model to the determination of impact speed. SAE Technical Paper 910814; 1991
42. Wood D.P., Simms C.K., Walsh D.G. Vehicle – pedestrian collisions : validated models for pedestrian impact and projection. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering. 2005;219(2): 183-195
43. Simms C.K., Wood D.P. Confidence limits for impact speed estimation from pedestrian projection distance. International Journal of Crashworthiness. 2004;9(2): 219-28
44. Wypadki drogowe Vademecum biegłego sądowego. Wydanie 2 uaktualnione. Reza Adam, Wierciński Jacek. Instytut Ekspertyz Sądowych. 2010 – 1094 p.
45. Crocetta G., Piantini, S. Pierini M. Simms C. (2015). The influence of vehicle front-end design on pedestrian ground impact. Accident Analysis & Prevention. 79. 10.1016/j.aap.2015.03.009.
46. Васильев Я.В., Подопригора Н.В., Абакаров А.А. Диагностические модели и алгоритмы диагностирования конструктивных систем высокоавтоматизированных транспортных средств // Реализация транспортной стратегии РФ до 2030 года в части развития автотранспортного комплекса : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Махачкала, 26–27 апреля 2023 года. – Москва: Издательство "Перо", 2023. – С. 52-55. – EDN CFZGXJ.
47. Беспилотные транспортные средства: Итоги международной научно-технической Конференции ассоциации автомобильных инженеров // Журнал автомобильных инженеров №2 (97)2016, стр. 4-11.

48. Прогноз научно-технологического развития России: 2030. Транспортные и космические системы / под. ред. М.Я. Блинкина, Л.М. Гохберга. – Москва : Министерство образования и науки Российской Федерации, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2014. – 40 с.
49. Каталог: беспилотные транспортные средства. Департамент науки, промышленной политики и предпринимательства города Москвы. 2017. 19 с.
50. Виталий Савельев доложил Президенту России Владимиру Путину о ходе цифровизации транспортной отрасли [Электронный ресурс]. Министерство транспорта РФ. URL: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/10756> Дата доступа: 30.05.2025.
51. Kolla E., Ondruš J. Vertal P. (2019). Reconstruction of traffic situations from digital video-recording using method of volumetric kinetic mapping. The Archives of Automotive Engineering - Archiwum Motoryzacji. 84. 147-170. 10.14669/AM.VOL84.ART11.
52. Ball J., Kittel M., Buss T., Weiss G.: Analysis of Video Event Recorder Data Used for Accident Reconstruction. SAE Technical Paper 2014-01-2388, 2014, DOI: 10.4271/2014-01-2388
53. Coleman C., Tandy D., Colborn J., Ault N.: Applying Camera Matching Methods to Laser Scanned Three Dimensional Scene Data with Comparisons to Other Methods. SAE Technical Paper 2015-01-1416, 2015, DOI: 10.4271/2015-01-1416
54. Crouch M., Cash S.: Video Analysis in Collision Reconstruction. Independent Publishing Network, ISBN 978-1-78808-930-2, 201
55. Jiao P., Miao Q., Zhang M., Zhao W.: A virtual reality method for digitally reconstructing traffic accidents from videos or still images. Forensic Science International. 2018, 292, 176-180, DOI: 10.1016/j.forsciint.2018.09.019

56. Kim J.H., Oh W.T., Choi J.H, Park J.C.: Reliability verification of vehicle speed estimate method in forensic videos. Forensic Science International. 2018, 287, 195-206, DOI: 10.1016/j.forsciint.2018.04.002

57. Пронин В.Н., Звездин М.В., Шавыкина С.Б. Расчет скоростей движения объектов по видеозаписям, полученным средствами видеофиксации // Теория и практика судебной экспертизы: научно-практический журнал. – М.: ФБУ РФЦСЭ при Минюсте России. – 2013. – № 3 (31).

58. Определение по видеозаписям, фиксирующим событие дорожно-транспортного происшествия, положения и параметров движения его участников: методические рекомендации для экспертов / С.М. Петров [и др.] - М.: ФБУ РФЦСЭ при Минюсте России, 2016. - 88 с.

59. Особенности проведения комплексных экспертиз по материалам видеозаписей : учебно-информационное пособие для экспертов КЭВ / С.С. Абрамов, А.С. Абрамов, А.М. Зинин [и др.] ; под общ. ред. А.Ш. Каганова; Некоммерч. партнерство «Палата судеб. Экспертов» [и др.]. – Москва : СУДЭКС, 2011. – 222 с.

60. Федеральный закон 73-ФЗ О государственной судебно-экспертной деятельности в Российской Федерации (с изменениями на 26 июля 2019 года)

61. Тартаковский Д.Ф. Проблемы неопределенности данных при экспертизе дорожно-транспортных происшествий. – СПб: Издательство Р.Асанова «Юридический центр Пресс», 2006. – 268 с.

62. 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. Михалева // Мир транспорта и технологических машин. – 2024. – № 1-2(84). – С. 81-90. – DOI 10.33979/2073-7432-2024-1-2(84)-81-90. – EDN SYVXPY.

63. Евтюков С.А., Васильев Я.В. Расследование и экспертиза дорожно-транспортных происшествий / СПб.: ООО «Издательство ДНК», 2004.-288с.
64. Евтюков С.А., Васильев Я.В. Экспертиза дорожно-транспортных происшествий. Справочник / СПб.: ООО «Издательство ДНК», 2006. – 536 с.
65. Евтюков С.А., Васильев Я.В. Дорожно-транспортные происшествия: расследование, реконструкция, экспертиза / СПб.: ООО «Издательство ДНК», 2008. – 392 с
66. Евтюков С.А., Васильев Я.В. Реконструкция и экспертиза ДТП в примерах / СПб.: Издательство «Петрополис», 2012. – 324 с.
67. Евтюков С.А., Васильев Я.В. Экспертиза ДТП: Методы и технологии / СПб.: СПбГАСУ, 2013.- 310 с.
68. Евтюков С.А., Васильев Я.В. Справочник по экспертизе ДТП / СПб: ИД «Петрополис», 2015 - 512 с.
69. Евтюков С.А., Васильев Я.В., Rajczyk Pavel Концепция количественной оценки неопределенности знаний в задачах реконструкции ДТП / Сборник докладов 12-ой международной научно-практической конференция «Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах». СПб 28-30 сентября 2016 г.
70. Yaroslav Vasiliev, Sergey Evtiukov, Valery Lukinskiy, Concept of Quantitative Assessment of Knowledge Uncertainty in Accident Reconstruction Tasks, Transportation Research Procedia, Volume 20, 2017, Pages 659-664, ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.01.107>.
71. Hiemer M., Model based detection and reconstruction of road traffic accidents. Dissertation, Universitat Karlsruhe, 2004.
72. Pawlus W., Reza Karimi H., Robbersmyr K.G., A fuzzy approach to modeling a vehicle crash test. Central European Journal of Engineering. 2012.
73. Várkonyi-Kóczy AR. Fuzzy logic supported corner detection. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems. 2008;19(1):41-50.

74. Hao Wang, Lai Zheng, Xianghai Meng, Traffic Accidents Prediction Model Based on Fuzzy Logic. Advances in Information Technology and Education. International Conference, CSE 2011, Qingdao, China, July 9-10, 2011, Proceedings, Part I, pp 101-108.

75. Partouche D., Pasquier M., Palanzani A., Intelligent Speed Adaptation Using a Self -Organizing Neuro -Fuzzy Controller Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Istanbul, Turkey, June 13-15, 2007.

76. D. Vangi, A fuzzy approach for vehicle-pedestrian collisions reconstruction. International Journal of Automotive Technology. June 2013, Volume 14, Issue 3, pp 385-393

77. D. Vangi, Virga A., Evaluation of emergency braking deceleration for accident reconstruction. Vehicle System Dynamics 45(10):895-910

78. 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. (DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-4-113-121).

79. Воронин В.В. Методика модельно-ориентированной реконструкции опрокидывания ТС при производстве дорожно-транспортной экспертизы [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / В.В. Воронин. – СПб, 2022. – 173 с.

80. Васильев, Я. В. Анализ практики дорожно-транспортных экспертиз по ДТП с наездами на дорожные ограждения и элементы дорожного обустройства / Я. В. Васильев, С. С. Евтюков, П. В. Шуляр // Грузовик. – 2025. – № 3. – С. 44-49. – DOI 10.36652/1684-1298-2025-3-44-49. – EDN CAVXPR.

81. Васильев Я.В., Брылев И.С. Оценка риска травмирования пешеходов и велосипедистов на основе логистической регрессии в задачах дорожно-транспортной экспертизы // Грузовик. 2022. №12. С. 34-40. DOI: 10.36652/1684-1298-2022-12-34-40

82. Васильев Я.В. Анализ вторичного травмирования пешеходов в задачах дорожно-транспортной экспертизы // Грузовик. 2023. №1. С. 36-42. DOI: 10.36652/1684-1298-2023-1-36-42

83. Васильев Я.В. Методика расчета риска получения травм при реконструкции дорожно-транспортных происшествий с участием пешеходов // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 2 (97). С. 103–109. DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-2-103-109

84. Abbas Sheykhfard, Farshidreza Haghighi, Eleonora Papadimitriou, Pieter Van Gelder, Review and assessment of different perspectives of vehicle-pedestrian conflicts and crashes: Passive and active analysis approaches, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), Volume 8, Issue 5, 2021, Pages 681-702, ISSN 2095-7564, <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.08.001>.

85. Levulytė, Loreta; Baranyai, David; Sokolovskij, Edgar; Török, Ádám. Pedestrians' role in road accidents. International Journal for Traffic & Transport Engineering . 2017, Vol. 7 Issue 3, p328-341. 14p. [https://doi.org/10.7708/ijtte.2017.7\(3\).04](https://doi.org/10.7708/ijtte.2017.7(3).04)

86. Васильев Я.В., Брылев И.С. Оценка риска травмирования пешеходов и велосипедистов на основе логистической регрессии в задачах дорожно-транспортной экспертизы // Грузовик. 2022. №12. С. 34-40. DOI: 10.36652/1684-1298-2022-12-34-40

87. Spitzhüttl, Florian & Liers, Henrik. (2019). Calculation of the Point Of No Return (PONR) from real-world accidents. June 2019. Conference: 26th ESV 19 At: Eindhoven, Netherlands.

88. Jie Sun, Zhengdong Li, Shaoyou Pan, Hao Feng, Yu Shao, Ningguo Liu, Ping Huang, Donghua Zou, Yijiu Chen, Identification of pre-impact conditions of a cyclist involved in a vehicle–bicycle accident using an optimized MADYMO reconstruction combined with motion capture, Journal of Forensic and Legal Medicine, Volume 56, 2018, Pages 99-107, ISSN 1752-928X, <https://doi.org/10.1016/j.jflm.2018.03.014>.

89. Poulard, David & Chen, Huipeng & Crandall, Jeff & Dziewoński, Tomasz & Pędzisz, Michal & Panzer, Matthew. Component-level Biofidelity Assessment of Morphed Pedestrian Finite Element Models. Proceedings of the 2015 International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Injury
90. Hyncik, Ludek & Bońkowski, Tomasz & Vychytil, Jan. (2017). Virtual hybrid human body model for PTW safety assessment. Applied and Computational Mechanics. 11. 137-144. December 2017. Applied and Computational Mechanics 11(2):137-144 DOI:10.24132/acm.2017.389
91. Yu C, Wang F, Wang B, Li G, Li F. A Computational Biomechanics Human Body Model Coupling Finite Element and Multibody Segments for Assessment of Head/Brain Injuries in Car-To-Pedestrian Collisions. Int J Environ Res Public Health. 2020;17(2):492. Published 2020 Jan 13. doi:10.3390/ijerph17020492
92. Abbreviated Injury Scale (AIS) - Overview. Association for the Advancement of Automotive Medicine. 2019.
93. Jean-Louis Martin, Dan Wu, Pedestrian fatality and impact speed squared: Cloglog modeling from French national data, Traffic Injury Prevention, Volume 19, Issue 1, 2018, Pages 94-101, ISSN 1538-9588, <https://doi.org/10.1080/15389588.2017.1332408>.
94. Hu, Jingwen & Klinich, Kathleen. Toward designing pedestrian-friendly vehicles. January 2012 International Journal of Vehicle Safety 8(1) DOI:10.1504/IJVS.2015.066272
95. Байэтт Р., Уоттс Р. Расследование дорожно-транспортных происшествий. / Пер. с англ. – М.: Транспорт, 1983. – 288 с.
96. Запрягаев М. М. Геометрический метод определения параметров видимости на перекрестке Экспертная техника. – М., 1976., – 53 с.
97. Иларионов В. А. Экспертиза дорожно-транспортных происшествий: Учебник для вузов. – М.: Транспорт, 1989. – 255 с.
98. Лукошявичене О. В. Моделирование дорожно-транспортных происшествий. – М.: Транспорт, 1988. – 96 с.

99. Лукьянов В. В. Состав и квалификация дорожно-транспортных преступлений и административных правонарушений: Специальные вопросы уголовного и административного права. – М.: Дашков и К0, 2003. – 44 с.
100. Маркоишвили Ю. И. Уточненные дифференцированные значения параметров торможения некоторых транспортных средств // Проблемы судебной автотехнической экспертизы. Сб. науч. тр. ВНИИСЭ. – М., 1983.
101. Методические рекомендации по исследованию причин ДТП с особо тяжкими последствиями. – М.: ФГУП НИИАТ, 2003. – 56 с.
102. Пучкин В. А. Актуальные проблемы судебной автотехнической экспертизы/ Юж.Региональный центр суд. экспертизы. – Ростов-на-Дону, 2001. – 80 с.
103. Пучкин В. А., Лозовой В. И. Справочно-нормативные материалы для эксперта-автотехника – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2002. – 172 с.
104. Пучкин В.А. Основы экспертного анализа дорожно-транспортных происшествий: База данных. Экспертная техника. Методы решений. Ростов н/Д: ИПО ПИ ЮФУ, 2010. – 400 с.
105. Расследование дорожно-транспортных происшествий. Справочно-методическое пособие. / Селиванов Н. А., Дворкин А. И., Завилов Б. Д. и др. – М.: Лига Разум, 1998. – 448 с.
106. Решение отдельных типовых задач судебной автотехнической экспертизы. ВНИИСЭ МЮ СССР. – М.: 1988. – 37 с., ил.
107. Романов Н. С. Основные положения судебно-экспертного анализа автотранспортного происшествия. – Киев, 1969.
108. Романов Н. С. Вопросы исследования причинной связи судебной автотехнической экспертизы. – Киев, 1973.
109. Романов Н. С. Теоретические и доказательственные вопросы судебной автотехнической экспертизы. – Киев, 1975.
110. Сегеркранц В. М. и др. Информация водителя о пешеходах // Сб. тр. Таллиннского политехн. ин-та. – Таллинн, 1980. – №486.

111. Смирнова С. А. Судебная экспертиза на рубеже XXI века. Состояние, развитие, проблемы. 2-е изд-е, пер. и доп. – СПб.: Питер, 2004. – 875 с.
112. Столяров В. В. Экспертиза дорожно-транспортных происшествий на основе теории риска: Учебное пособие. – Саратов: СГТУ, 1996. – 176 с.
113. Судебная автотехническая экспертиза: Пособие для экспертов-автотехников, следователей и судей. Ч.2./ Под ред. В. А. Иларионова. – М.: ВНИИСЭ, 1980. – 491 с.
114. Транспортно-трасологическая экспертиза по делам о дорожно-транспортных происшествиях. Диагностические исследования. Методическое пособие для экспертов, следователей и судей. Вып. 2. – М.: ВНИИСЭ, 1988.
115. Филькова О.Н. Справочник эксперта-криминалиста. – М.: Юриспруденция, 2001. – 464 с.
116. Григорян В.Г. Применение в экспертной практике параметров торможения автотранспортных средств: методические рекомендации для экспертов / В.Г. Григорян, А.В. Григорян.- М: ФБУ РФЦСЭ при Минюсте России, 2021. – 40 с.: ил.
117. Скорости движения пешеходов и иных участников дорожного движения (методические рекомендации для экспертов, судей, следователей и дознавателей), ФБУ СЗРЦСЭ, 2013г.
118. Design, Simulation and Virtual Testing, Madymo Theory Manual. VERSION 7.7 TASS International Software BV
119. THUMS Overview and Application. Hiroshi Miyazaki. IWG DPPS 7<sup>th</sup> Meeting September, 2020
120. Брылев И.С., Евтюков С.А. Моделирование траекторий сброса водителя и пассажира двухколесного механического транспортного средства для задач реконструкции механизма ДТП // Мир транспорта и технологических машин. – 2023. – № 3-5(82). – С. 74-79. – DOI 10.33979/2073-7432-2023-3-5(82)-74-79

121. ГОСТ 32949-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Опоры стационарного электрического освещения. Методы контроля
122. ГОСТ 33464-2015 Глобальная навигационная спутниковая система. Система экстренного реагирования при авариях. Устройство/система вызова экстренных оперативных служб. Общие технические требования (с Поправкой)
123. Stigson, Helena & Krafft, Maria & Tingvall, Claes. (2008). Use of Fatal Real-Life Crashes to Analyze a Safe Road Transport System Model, Including the Road User, the Vehicle, and the Road. *Traffic injury prevention*. 9. 463-71. 10.1080/15389580802335240.
124. Hans-Wolfgang Henn, *Crash Tests and the Head Injury Criterion, Teaching Mathematics And Its Applications* Volume 17, No. 4, 1998.
125. K.H. Digges, *Injury Measurements and Criteria*, N.A.T.O. Research & Technology Organisation, RTO MP-20, K2-1 –K2-5, 1998.
126. Brach R.M. *Vehicle accident analysis and reconstruction methods* [M]. Warrendale, Pennsylvania: SAE international Publisher, 2005
127. Liangliang, Shi & Han, Yong & Huang, Hongwu & Davidsson, Johan & Thomson, Robert. (2020). Evaluation of injury thresholds for predicting severe head injuries in vulnerable road users resulting from ground impact via detailed accident reconstructions. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*. 19. 10.1007/s10237-020-01312-9.
128. Васильев Я. В., Михалева Д. С., Алексеев М. Д., Агапов И. А., Коломеец А. А. Методические основы применения индексов травмирования в дорожно-транспортной экспертизе // *Грузовик*. 2024. № 10. С. 39-43. DOI: 10.36652/1684- 1298-2024-10-39-43.
129. Levulytė, Loreta; Baranyai, David; Sokolovskij, Edgar; Török, Ádám. Pedestrians' role in road accidents. *International Journal for Traffic & Transport Engineering* . 2017, Vol. 7 Issue 3, p328-341. 14p. [https://doi.org/10.7708/ijtte.2017.7\(3\).04](https://doi.org/10.7708/ijtte.2017.7(3).04)

130. Casado-Sanz N, Guirao B, Lara Galera A, Attard M. Investigating the Risk Factors Associated with the Severity of the Pedestrians Injured on Spanish Crosstown Roads. *Sustainability*. 2019; 11(19):5194. <https://doi.org/10.3390/su11195194>
131. Sérgio David Parreirinha Carvalho. Injuries Analysis and Computational Simulation of Two Wheelers Accidents Using Human Body Biomechanical Models. Thesis to Obtain the Master of Science Degree in Biomedical Engineering. 2013. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica De Lisboa, Portugal
132. Shi Shang, Catherine Masson, David Teeling, Max Py, Quentin Ferrand, Pierre-Jean Arnoux, Ciaran Simms. Kinematics and dynamics of pedestrian head ground contact: A cadaver study, *Safety Science*, Volume 127, 2020, 104684, ISSN 0925-7535.
133. Shi Shang, Catherine Masson, Maxime Llari, Max Py, Quentin Ferrand, Pierre-Jean Arnoux, Ciaran Simms. The predictive capacity of the MADYMO ellipsoid pedestrian model for pedestrian ground contact kinematics and injury evaluation, *Accident Analysis & Prevention*, Volume 149, 2021, 105803, ISSN 0001-4575.
134. Shi Liangliang, Liu Ming, Liu Yu, Zhao Qingjiang, Cheng Kuo, Zhang Honghao, Amir Fathollahi-Fard. Evaluation of Urban Traffic Accidents Based on Pedestrian Landing Injury Risks. *Applied Sciences*. 12. 2022.
135. Shi Shang, Dietmar Otte, Guibing Li, Ciaran Simms. Detailed assessment of pedestrian ground contact injuries observed from in-depth accident data, *Accident Analysis & Prevention*, Volume 110, 2018, Pages 9-17, ISSN 0001-4575.
136. Koji Mizuno, Masahiro Horiki, Yuqing Zhao, Airi Yoshida, Asei Wakabayashi, Toshio Hosokawa, Yoshinori Tanaka, Naruyuki Hosokawa. Analysis of fall kinematics and injury risks in ground impact in car-pedestrian collisions using impulse, *Accident Analysis & Prevention*, Volume 176, 2022, 106793, ISSN 0001-4575.

137. Tamura Atsutaka, Duma Stefan. A study on the potential risk of traumatic brain injury due to ground impact in a vehicle—pedestrian collision using full—scale finite element models. *International Journal of Vehicle Safety*. 5. (2011).
138. Евтюков С. А., Брылев И. С., Блиндер М. М. Реконструкция аварии и оценка травм велосипедиста, полученных при столкновении автомобиля с велосипедом // *Вестник гражданских инженеров*. – 2021. – № 2 (85). – С. 208 – 214. – DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-208-214.
139. Vangi, Dario & Begani, Filippo & Spitzhüttl, Florian & Gulino, Michelangelo. (2019). Vehicle accident reconstruction by a reduced order impact model. *Forensic Science International*. 298. 10.1016/j.forsciint.2019.02.042.
140. Zhang, X. & Xianlong, Jin & Qi, W. & Hou, X.. (2007). Vehicle crash accident reconstruction based on FEM and neural networks. 43. 143-147.
141. Zhang, Xiao & Xianlong, Jin & Qi, Wenguo & Sun, Yi. (2004). Virtual Reconstruction of Vehicle Crash Accident Based on Elastic-Plastic Deformation of Auto-Body. *Key Engineering Materials*. 274-276. 1017-1022. 10.4028/www.scientific.net/KEM.274-276.1017.
142. Cao, Y., & Luo, Y. fei. (2021). The synthesized method based on classical mechanics and finite element for vehicle collision accident reconstruction analysis. *International Journal of Crashworthiness*, 27(6), 1790–1797. <https://doi.org/10.1080/13588265.2021.2008741>
143. Aye CM, Pholdee N, Yildiz AR, et al. Multi-surrogate-assisted metaheuristics for crashworthiness optimisation. *IJVD*. 2019;80(2/3/4):223–240.
144. S.Evtiukov, E.Golov, G.Ginzburg, Finite element method for reconstruction of road traffic accidents, *Transportation Research Procedia*, Volume 36, 2018, Pages 157-165, ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.058>.
145. Cao, Yi & Ye, Xingwang & Han, Geng. (2021). A Method for Calculating the Velocity of Corner-to-Corner Rear-End Collisions of Vehicles

Based on Collision Deformation Analysis. Applied Sciences. 11. 10964. 10.3390/app112210964.

146. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021622677 Российская Федерация. База данных жесткостных характеристик автомобилей категории М1 для проведения дорожно-транспортных экспертиз: № 2021622611: заявл. 18.11.2021: опубл. 29.11.2021 / Е. В. Голов, Я. В. Васильев, С. С. Евтюков; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет». – EDN DDPCLO.

147. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2023623265 Российская Федерация. Банк значений коэффициентов локальной жесткости кузова легковых автомобилей для моделирования и реконструкции механизма ДТП: №2023623265: заявл. 14.09.2023: опубл. 28.09.2023 / Е.В. Голов, Я.В. Васильев, Шпет В.Р.: заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет». – EDN INTOIC.

148. Application of the Monte Carlo Methods for Stability Analysis within the Accident Reconstruction Software PC-CRASH. SAE Technical Paper 2003-01-0488

149. Steffan, H., Moser, A., Spek, A., & Makkinga, W. (2007). Collision optimizer and Monte Carlo methods in impact calculation. EVU-Annual meeting 2007.

150. Журавлёв, Ю.И. Избранные научные труды / Ю.И. Журавлёв. М.: Издательство Магистр, 1998. - 420 с.

151. Растригин, Л.А. Адаптация сложных систем / Л.А. Расстригин. Рига: Зинатне, 1981.- 375 с.

152. Bollapragada, Varun. (2019). The Influence of Disabling Injuries on the Design of the Vehicle Front End for Pedestrian Safety. 10.18130/v3-sr6h-sp61.

153. Monfort, Samuel & Hu, Wen & Mueller, Becky. (2024). Vehicle front-end geometry and in-depth pedestrian injury outcomes. *Traffic injury prevention*. 25. 1-9. 10.1080/15389588.2024.2332513.
154. Venkatason, Kausalyah & Shasthri, S. & Abdullah, Kassim & Idres, Moumen & Shah, Qasim & Wong, Shaw Voon. (2014). Optimisation of vehicle front-end geometry for adult and pediatric pedestrian protection. *International Journal of Crashworthiness*. 19. 10.1080/13588265.2013.879506.
155. Venkatason, Kausalyah & Shasthri, S. & Abdullah, Kassim & Idres, Moumen & Shah, Qasim & Wong, Shaw Voon. (2015). Vehicle Profile Optimization using Central Composite Design for Pedestrian Injury Mitigation. *Applied Mathematics & Information Sciences*. 9. 197-204. 10.12785/amis/010125.
156. Li, Guibing & Yang, Jikuang & Simms, Ciaran. (2016). A Virtual Test System Representing the Distribution of Pedestrian Impact Configurations for Future Vehicle Front-End Optimization. *Traffic injury prevention*. 17. 10.1080/15389588.2015.1120294.
157. Gupta, Vishal & Kalra, Anil & Shen, Ming & Chou, Clifford & Yang, King. (2015). Effect of Vehicle Front End Profile on Pedestrian Kinematics and Biomechanical Responses Using a Validated Numerical Model. *V012T15A015*. 10.1115/IMECE2015-52423.
158. Zou, Donghua & Fan, Ying & Liu, Ningguo & Zhang, Jianhua & Liu, Dikun & Liu, Qingfeng & Li, Zhengdong & Wang, Jinming & Zhou, Shuguang. (2022). Multiobjective optimization algorithm for accurate MADYMO reconstruction of vehicle-pedestrian accidents. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 10. 10.3389/fbioe.2022.1032621.
159. Carter, Emma & Ebdon, Steve & Neal-Sturgess, Clive. (2005). Optimization of passenger car design for the mitigation of pedestrian head injury using a genetic algorithm. 2113-2120. 10.1145/1068009.1068358.
160. Kianifar, Mohammed Reza & Campean, Felician. (2019). Global Optimisation of Car Front-End Geometry to Minimise Pedestrian Head Injury

Levels. Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design. 1. 2873-2882. 10.1017/dsi.2019.294.

161. Tsoukalas, Vasilios & Fragiadakis, N.G.. (2016). Prediction of occupational risk in the shipbuilding industry using multivariable linear regression and genetic algorithm analysis. Safety Science. 83. 12-22. 10.1016/j.ssci.2015.11.010.

162. Parque, Victor & Miyasita, Tomoyuki. (2018). On vehicle surrogate learning with genetic programming ensembles. 1704-1710. 10.1145/3205651.3208310.

163. Li, Jiaqiang & Chen, Yao & Feng, Xiaodong & Feng, Jian & Sareh, Pooya. (2021). Computational Modeling and Energy Absorption Behavior of Thin-Walled Tubes with the Kresling Origami Pattern. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures. 62. 71-81. 10.20898/j.iass.2021.008.

164. Suto, Kai & Adachi, Akito & Tachi, Tomohiro & Yamaguchi, Yasushi. (2018). An Edge Extrusion-Approach to Generate Extruded Miura-Ori and Its Double Tiling Origami Patterns. 10.48550/arXiv.1810.04625.

165. Cowan, Brett & Lockette, Paris. (2017). Fabrication, characterization, and heuristic trade space exploration of magnetically actuated Miura-Ori origami structures. Smart Materials and Structures. 26. 10.1088/1361-665X/aa5a9e.

166. ГОСТ Р 59610-2021 Дороги автомобильные общего пользования. Пешеходные переходы в разных уровнях. Общие требования. Правила размещения

167. ГОСТ Р 59401-2021 Дороги автомобильные общего пользования. Ограничивающие пешеходные и защитные ограждения. Общие технические условия

168. ГОСТ Р 71410-2024 Дороги автомобильные общего пользования. Опоры дорожных информационных знаков и стационарного электрического освещения. Общие технические условия

169. ОДМ 218.4.033-2017 Методические рекомендации по созданию системы опытно-экспериментальных полигонов на действующей сети

автомобильных дорог федерального значения для внедрения новых технологий и материалов в дорожном хозяйстве в различных природно-климатических зонах Российской Федерации.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

## **ПРИЛОЖЕНИЕ А**

(Терминологический аппарат исследования по Главе 1)

**Адекватность модели (в ДТЭ, ЭП ДТП и в ОБДД):** степень соответствия свойств используемой модели воспроизводимым ею свойствам реальных объектов или процессов, свойствам их взаимодействия.

**Антропоморфный манекен:** манекен используемый в экспериментальных исследованиях автомобильного транспорта, воспроизводящий массово-габаритные характеристики человека, отражающие его форму, пропорции, массу, кинематику связей конечностей и т.д. с различной степенью детализации, позволяющий получить значения сил и ускорений в своих частях в процессе наблюдения за ударным воздействием (-ями).

**Вывод в ДТЭ:** аргументированное исследованием суждение эксперта в рамках **предмета исследования**, ограничиваемое только объемом исходных данных и представленных на исследование материалов, представленное в виде сформулированного ответа на поставленный вопрос в **Заключении эксперта**.

**Вывод вероятностный (в ДТЭ):** аргументированное исследованием суждение эксперта в рамках **предмета исследования**, содержащее оценку в некатегоричной форме, допускающее вероятность существования иного решения или иных сочетаний обстоятельств, исходных данных и технических величин. В.в. в ДТЭ дается при соответствующем предмету исследвоания обосновании отсутствия возможности дать категоричный вывод.

**Вывод категоричный (в ДТЭ):** аргументированное исследованием суждение эксперта в рамках **предмета исследования**, содержащее оценку в категоричной форме, не допускающее его истинность только при каких-либо условиях, а также не допускающее вероятность существования иного решения или иных сочетаний обстоятельств, исходных данных и технических величин.

**Вывод условный (в ДТЭ):** аргументированное исследованием суждение эксперта в рамках **предмета исследования**, содержащее оценку в

категоричной форме, только при соблюдении одного или целого ряда условий.

**Высокоавтоматизированное транспортное средство:** транспортное средство, оснащенное автоматизированной системой вождения, которая действует в пределах конкретной среды штатной эксплуатации применительно к некоторым или всем поездкам без необходимости вмешательства человека в качестве запасного варианта обеспечения безопасности дорожного движения.

**Дорожно-транспортная ситуация:** последовательность развивающихся на дороге событий, обусловленных взаимодействием ТС и других участников движения, а также условий внешней среды в определенных пространственно-временных границах.

**Достоверность результатов ДТЭ:** мера оценки возможности проверки результатов ДТЭ при том же объеме ПСИ использованной при ее производстве в МОР.

**Достаточность исходных данных (в ДТЭ и ЭП ДТП):** минимально допустимый и необходимый объем исходных данных для производства исследования в рамках его предмета. Д.и.д. зависит от предмета исследования и определяется также требованиями специализированного программного обеспечения при моделировании или избранной экспертом методикой проведения исследования.

**Индекс тяжести травмирования:** один из видов ранжирования тяжести травмы или политравмы человека, используемый для оценки вероятности травмирования или оценки полученных травм водителем, пассажиром или пешеходом при экспертном причинном анализе и экспертной профилактике ДТП. Наиболее распространенными на практике И.т.т. являются ASI, AIS, NIC.

**Индекс тяжести травм при ускорении (acceleration severity index; ASI):** Значение, рассматриваемое в качестве оценки тяжести травм для водителя или пассажиров автомобиля в ДТП и рассчитанное для трех

компонентов (по осям координат) ускорений/замедлений, возникающих в центрах масс ТС и/или частей тела человека или его антропоморфного манекена.

**Итерационный анализ при моделировании:** процесс определения одной или нескольких величин пространственно-временных характеристик объекта исследования (в ДТЭ и в ЭП ДТП) на какой-либо стадии механизма ДТП или процесс сужения областей исходных множеств (например фактического местоположения точки начала КСВ, фактической траектории и т.п.) основанный на итерационном подборе варьируемых исходных данных и технических величин, осуществляемый **в специализированном программном обеспечении.**

**Категоричность (в ДТЭ):** мера оценки применения процессов МОР и оценки полученных результатов ДТЭ, определяемая размером погрешности выполненных вычислений (моделирования), не допускающая при этом вероятностях и условных выводов при обеспечении достоверности. Категоричность также - свойство ДТЭ, определяемое примененными методами и объемом исходной ПСИ, определяющее нахождение решения с наименьшим количеством показателей имеющих вариативные значения, в более узком виде: минимальная компактность множества образуемого полученными выводами при его отображении в пространстве порождаемом множествами использованных в ДТЭ исходных данных.

**Киберфизическая безопасность дорожного движения:** состояние, характеризующее отсутствием недопустимых уровней риска, связанного с отказами, вызванными нарушениями информационного пространства системы ОПУС.

**Конечное положение (объекта исследования):** зафиксированное в **первичной пространственно-следовой информации** с места ДТП положение объекта после ДТП на момент осмотра места происшествия

**Критерий возможности предотвращения дорожно-транспортного происшествия:** обстоятельство (совокупность обстоятельств),

установленное (установленных) в результате экспертного исследования механизма дорожно-транспортного происшествия, которое может быть положено в основу вывода о возможности предотвращения дорожно-транспортного происшествия. Это может быть: удаленность транспортного средства от места наезда на расстояние большее, меньшее либо равное остановочному пути; время реакции водителя, превышающее время движения пешехода, и т. п.

**Критерий травмы головы (head injury criteria; НИС):** Интегральный показатель, отражающий значение максимального результирующего замедления на центре масс головы манекена водителя или пассажира, используемый для оценки вероятности получения травм головы различной степени тяжести.

**Метод ДТЭ:** совокупность приемов и операций практического и теоретического исследования объектов ДТЭ, связанных с достижением общих целей реконструкции механизма ДТП.

**Методика ДТЭ:** система конкретных приемов, способов и рекомендаций по выбору и применению методов исследования объектов ДТЭ, а также по формированию необходимой информационной, цифровой, материальной и технической базы исследования. Конкретная методика ДТЭ может формироваться в ходе исследования на основе общего метода исследований данного рода (вида) и опыта эксперта с учетом конкретной задачи (предмета) ДТЭ.

**Методология ДТЭ:** система принципов и способов организации построения теоретической и практической деятельности в ДТЭ, а также самое учение об этой системе.

**Механизм ДТП:** взаимосвязь причин, условий возникновения ДТП и факторов, определяющих их появление, представленная в виде хронологии изменения пространственно-временных характеристик и состояний объектов исследования в ДТЭ имевших место в ДТС.

**Модельно-ориентированная реконструкция:** подход к предмету исследования в методологии реконструкции механизма ДТП основанный на применении моделирования механизма ДТП путем применения компьютерных моделей (полимодельных комплексов) в специализированном программном обеспечении.

**Моделирование механизма ДТП:** процесс численной симуляции поведения объектов исследования в специализированном программном обеспечении, реализующий модельно-ориентированный подход к предмету исследования ДТП, получаемый на основе численного решения, математических моделей, использующих исходные данные, первичную ПСИ, технические величины в моделях объектов исследования и модели места ДТП. М.м.ДТП представляет собой фактически проведение виртуального эксперимента, воспроизводящего систему взаимодействующих объектов на основе использования цифровых моделей и Специализированного программного обеспечения в хронологии развития механизма ДТП.

**Модель механизма ДТП:** Результат проведения моделирования механизма ДТП в специализированном программном обеспечении. М.м.ДТП может быть представлена в виде имитационной или цифровой модели. При отсутствии результатов моделирования механизма ДТП, М.м.ДТП является вербальное описание механизма ДТП, описывающее развитие событий до, в момент и после ДТП, включая их количественные и качественные характеристики (например: угол взаиморасположения, угол столкновения, положение на проезжей части относительно линий разметки, характер увода и т.п.).

**Модель масштабная совмещения (локализаций деформаций и/или телесных повреждений):** выполненное в специализированном программном обеспечении наложение изображений локализаций деформаций (телесных повреждений), в определенном масштабе, фиксирующее признаки локализаций, следов в них, способные показать связи отображений слеодообразующих и следвоспринимающих в процессе

исследования и открывающие возможности для сопоставления локализаций деформаций о форме, месту, следам.

**Масштабная цифровая схема места ДТП:** схема места исследуемого ДТП, выполненная на основе ПСИ в специализированном программном обеспечении, с различной степенью детализации (с учетом предмета исследования) и имеющая возможность двухмерного или трехмерного отображения участка места исследуемого ДТП и визуального отображения на ней ОИ и ПСИ в масштабе (отображаемом на экране персонального компьютера или при выводе на печать).

**Область фактического местоположения начала КСВ:** расчетная область определенной площади на цифровой масштабной схеме места ДТП полученная в результате моделирования механизма ДТП и применении одного или нескольких видов оптимизации.

**Объект ДТЭ (объект исследования):** транспортное средство, его техническое состояние, пространственно-временные характеристики перемещений транспортных средств и участников ДТП на различных стадиях механизма ДТП, пространственно-временные характеристики перемещения пострадавших при ДТП, причинно-следственные связи в системе ВАДС или ОПУС при ДТП, а также действия участников ДТП в условиях и обстоятельствах до, в момент и после ДТП. К О.а.э. относятся: транспортные средства (их детали, узлы, механизмы, системы), дорога и дорожные условия, место дорожно-транспортного происшествия, следы на месте ДТП, водитель, пассажиры, пешеход, а также все материалы дела, представленные эксперту на исследование, не требующие правовой оценки.

**Оптимизация в ДТЭ (в моделировании механизма ДТП):** комплекс методов численной оптимизации варьируемых исходных данных и технических величин, заложенных в математический аппарат в каком-либо специализированном программном обеспечении для моделирования механизма ДТП, решения частных задач в ДТЭ, таких как поиска точки

начала КСВ, расчет скорости движения в конкретный момент времени в хронологии механизма ДТП и др.

**Отказ (нарушение) в подсистеме Объект системы ОПУС:** нарушение работоспособности объекта (активного или пассивного), находящегося в дорожном движении, при котором его гарантии функциональной безопасности снижены, а его перемещение на сети невозможно или может происходить со скоростью ниже средней скорости транспортного потока на участке сети. Эволюционно возникает из подмножества взаимодействий между участниками дорожного движения в системе ВАДС.

**Отказ (нарушение) в подсистеме Пространство системы ОПУС:** нарушение одной или нескольких сетей, влекущее за собой полную или частичную потерю за контролем над управлением объектами и процессами БДД. Эволюционно возникает из подмножества сочетаний условий и состояний относящихся к свободным ДТС в ВАДС.

**Отказ (нарушение) в подсистеме Условия системы ОПУС:** нарушение требований к процессам перемещения и их защищенности (гарантия функциональной безопасности) при котором эксплуатация объекта и/или сети невозможно или может происходить со скоростью ниже средней скорости транспортного потока на участке сети. Эволюционно возникает из подмножества сочетаний условий совершения текущих событий в ВАДС.

**Отказ (нарушение) в подсистеме Событие системы ОПУС:** возникновение в подсистеме Событие системы ОПУС независимых от других подсистем факторов, формирующих условия для смены состояния полисистемы ОПУС от самоподобного к обособленному, оказывающих влияние на состояние других подсистем. Эволюционно возникает из подмножества сочетаний событий и состояний, относящихся к сложным ДТС в ВАДС.

**Предмет ДТЭ (предмет исследования):** фактические данные об обстоятельствах и механизме ДТП, а также действиях участников ДТП,

которые устанавливает эксперт на основе своих специальных познаний. Предмет ДТЭ экспертизы предопределяется объектом экспертного исследования и вопросами, поставленными на разрешение экспертного исследования.

**Пространство моделирования:** двухмерная или трехмерная область на масштабной цифровой схеме места ДТП, охватывающая ПСИ и прилегающие к ней области в которых производится моделирование механизма ДТП.

**Первичная пространственно-следовая информация:** совокупность данных приведенных в первичных документах составленных при осмотре места ДТП (Протокол осмотра места ДТП, схема ДТП и фототбалица к нему, Протоколы осмотра ТС), позволяющих воспроизвести место ДТП, расположение ТС, следов, осыпей и т.п. в масштабе с пространственной привязкой к границам проезжей части и внешним опорным объектам (километровым столбам, углам домов, опорам ЛЭП и т.п.).

**Полисистема:** конечное множество систем (ВАДС или ОПУС) обладающих самоподобием, расположенных в едином информационном пространстве и формирующих поливалентные связи внутри этого пространства.

**Полнота (в ДТЭ):** свойство ДТЭ отражающее достаточность применения методов для поиска решения, если оно существует в составе ПСИ.

**Пользовательская безопасность дорожного движения:** состояние, характеризующее отсутствием недопустимых уровней риска, связанного с отказами, непосредственно влияющими на возникновение индекса травмирования из-за отказа в подсистемах системы ОПУС.

**Расчетная область фактического местоположения начала стадии КСВ:** область, ограниченная какими-либо обоснованными техническими величинами или расчетными методами границами на масштабной цифровой схеме места ДТП, в пределах которой располагалось место начала КСВ.

**Редукция полисистемы:** метод снижения размерности полисистемы путем ее топологического анализа с исключением самоподобных состояний.

**Реконструкция механизма ДТП:** процесс экспертного познания совокупности событий и обстоятельств имевших место в механизме исследуемого ДТП.

**Самоподобие (в системе ОПУС):** воспроизводимое фрактально в топологии состояние компонента полисистемы

**Система ВАДС:** неразрывно связанная система образуемая подсистемами: Водитель, Автомобиль, Дорога и Среда, взаимодействие между которыми определяет состояние **безопасности дорожного движения**. В которой, при эксплуатации автомобильного транспорта, контроль за процессами управления имеет антропоцентрическую индивидуальную сущность с пирамидальной иерархией, осуществляется человеком и направлен на снижение числа ДТП и тяжести их последствий.

**Система ОПУС:** неразрывно связанная система образуемая подсистемами: Объект, Пространство, Условие и Событие, взаимодействие между которыми определяет состояние **функциональной, пользовательской и киберфизической безопасности дорожного движения**. В которой, при эксплуатации автомобильного транспорта, контроль за процессами управления имеет антропоцентрическую и информационную сущности, с сетевой масштабируемой иерархией, осуществляется без участия человека и направлен на исключение травмирования пассажира или пешехода.

**Состояние (в системах ВАДС и ОПУС):** конечное множество значений показателей компонентов системы формирующих область в  $n$ -мерном пространстве и отображающих ее в любой момент времени.

**Специализированное программное обеспечение:** лицензируемый или свободно распространяемый программный комплекс или средство, специализированное на численном анализе пространственно-временных характеристик механизма ДТП и смежных с ним процессах моделирования,

подготовке исходных данных, визуализации и оптимизации полученных результатов, а также доступа к специальным базам данных, рекомендованное к использованию в ДТЭ или имеющий публичные (опубликованные в научных международных изданиях) данные о валидации и верификации данного С.п.о.

**Стадия сближения (в механизме ДТП):** начальная стадия механизма ДТП, предшествующая началу контакта, по времени начинающаяся с момента возникновения опасности для движения до момента начала контакта объектов исследования.

**Стадия контактно-следового взаимодействия (в механизме ДТП):** центральная стадия механизма ДТП, по времени начинающаяся с момента начала контакта объектов исследования до момента их выхода из контакта.

**Стадия отброса (в механизме ДТП):** финальная (в случае отсутствия вторичных КСВ) стадия механизма ДТП, по времени начинающаяся с момента выхода из контакта объектов исследования до момента занятия ими конечного (зафиксированного в ПСИ при осмотре места ДТП) после ДТП положения.

**Суррогатная конечно-элементная модель:** конечно-элементная модель использующая упрощенное представление объектов исследования, полученных путем применения в сетке спектральных элементов и применяемая для моделирования стадии КСВ в МОР механизма ДТП.

**Сходимость (в ДТЭ):** мера оценки адекватности модели, определяемая величиной смещения результатов моделирования относительно фактических данных первичной ПСИ при модельно-ориентированной реконструкции в ДТЭ

**Теоретическая скорость головы в момент удара (theoretical head impact velocity; THIV):** Скорость головы пассажира в момент удара о поверхность внутри транспортного средства в результате столкновения с опорой.

**Трекинг:** захват в специализированном программном обеспечении последовательности перемещений по кадрам выбранной группы целевых объектов (пикселей, определяющих объект или область на объекте) с целью определения траектории, времени и/или скорости движения целевого объекта (объекта исследования).

**Универсальный полимодельный комплекс:** система связанных между собой моделей различного вида (цифровые, математические, информационные и т.д.) реализованных в различном СПО и имеющих единую среду контроля и управления, а также развитые интерфейсы подключения к внешним источникам данных.

**Уровень пассивной безопасности:** Комплексный показатель, отражающий уровень защиты объекта транспортной инфраструктуры или ТС, в виде совокупности конструктивных и эксплуатационных свойств опоры, направленных на снижение тяжести травмирования участников движения при дорожно-транспортных происшествиях и определяющий превышение уровня защиты от высоких значений индексов травмирования над уровнем риска их получения при дорожно-транспортных происшествиях.

**Фотограмметрия:** процесс специальной обработки фотографических данных, в специализированном программном обеспечении, в результате которой получают масштабную развертку сфотографированного объекта (например, места ДТП), а также определяют необходимые расчетные данные (например: расстояния).

**Цифровой антропоморфный манекен:** антропоморфный манекен тела человека, реализованный в СПО, прошедший валидацию и верификацию, представляющий собой полимодель из цифровой геометрии тела (оболочки), моделей-заместителей объемов внутренних органов, виртуальных датчиков или маркерных точек измерения сил и ускорений, применение которого в виртуальном полигоне позволяет решать задачи: ДТЭ, ЭП ДТП и повышения пассивной безопасности ТС.

### **Цифровой (виртуальный) испытательный полигон (ЦИП):**

Система, в общем случае состоящая из технических средств, программного, методического и организационного обеспечения и квалифицированного персонала, предназначенная для проведения полигонных испытаний как результата исследования свойств цифровой модели (или цифрового двойника) объекта испытаний. Примечание – Цифровая модель для проведения полигонных испытаний должна обеспечивать испытания объекта в условиях, близких к условиям эксплуатации объекта. [ГОСТ Р 57700.37-2021, статья 3.25]

**Цифровая модель механизма ДТП:** модель, выполненная в **специализированном программном обеспечении** и представляющая собой совокупность данных и программного кода, необходимого для работы с данными, реализующая все стадии механизма ДТП и позволяющая получить сведения об изменении пространственно-временных характеристик перемещения объектов, воспроизводимых в ней, относительно масштабной цифровой схемы места ДТП.

**Цифровая модель механизма травмирования пострадавшего в ДТП:** модель, выполненная в **специализированном программном обеспечении** и представляющая собой совокупность данных и программного кода, необходимого для работы с данными, реализующая все стадии перемещений тела пострадавшего внутри **пространства моделирования**.

**Цифровая платформа ОБДД:** полисистема средств, поддерживающих использование цифровых процессов, ресурсов и сервисов условно неограниченным количеством объектов полисистемы ОПУС и обеспечивающая возможность управления состоянием процессов дорожного движения в любой своей части, в которой имеются наблюдаемые поливалентные связи взаимодействия, обладающая сниженными издержками транзакций при передаче информации.

**Экспертный причинный анализ:** исследование причинной связи между выявленными отклонениями (нарушениями) в системе ВАДС или

ОПУС и фактом наступления ДТП, полученными в нем повреждениями (как ТС, так и пострадавшими).

**Экспертная профилактика ДТП:** деятельность по выявлению обстоятельств, способствовавших совершению ДТП и разработке мер по их устранению. Задача ЭП ДТП состоит в выявлении обстоятельств (и условий), свидетельствующих о нарушении правил безопасности движения и эксплуатации транспортных средств, эксплуатации технически неисправных транспортных средств, об отступлении от требований правил, действующих на транспорте, и правил содержания дорог, железнодорожных переездов и других дорожных сооружений в безопасном для движения состоянии, а также в выявлении случаев непринятия необходимых мер к своевременному ограничению либо запрещению движения на отдельных участках дороги (дорог), когда пользование ею (ими) создает опасность для движения.

**Электронная модель ТС:** Отображение в компьютерной среде модели ТС, в котором содержатся сведения о свойствах, необходимых для реализации МОР или для применения ЭМТС на цифровом (виртуальном) испытательном полигоне.

**Эффективность ДТЭ (в МОР):** мера оценки результата применения методов ДТЭ, при котором совокупность свойств ДТЭ, измеряемых комплексом показателей, приводит к достижению целей ДТЭ, содержит в себе объем данных достаточный для применения в ЭП ДТП и дальнейший поиск значений этих показателей приводит к снижению полноты и категоричности выводов в ДТЭ.

**Эффективность ЭП (в МОП):** мера оценки результата применения методов ЭП ДТП, при котором совокупность свойств ЭП, измеряемых комплексом показателей, приводит к достижению целей ЭП, содержит в себе объем данных достаточный для применения в ОБДД и дальнейший поиск значений этих показателей с учетом цели ЭП не приводит к улучшению одного или нескольких показателей комплекса, без ухудшения других.

**Функциональная безопасность дорожного движения:** состояние, характеризующееся отсутствием недопустимых уровней риска, связанного с отказами, вызванными некорректным функциональным поведением компонентов системы ОПУС.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ Б**

(Результаты дешифрации каналов записи натурных тестов по Главе 3)

Таблица Б.1

## Сводные данные по тестам с АМ Polar-2

| №<br>п/<br>п | Номер теста в<br>базе NHTSA | Марка и год<br>выпуска а/м | Скорость в<br>момент наезда,<br>км/ч | Угол наезда,<br>град | Количество<br>каналов записи<br>теста, шт | Положение ног<br>АМ | Положение рук<br>АМ |
|--------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------|---------------------|---------------------|
| 1            | 5873                        | Хонда Цивик, 1999          | 48                                   | 17                   | 37                                        | 1                   | 4                   |
| 2            | 5874                        | Хонда Цивик, 1999          | 48                                   | 20                   | 36                                        | 1                   | 4                   |
| 3            | 5875                        | Хонда Цивик, 1999          | 48                                   | 20                   | 36                                        | 3                   | 4                   |
| 4            | 5876                        | Хонда Цивик, 1999          | 48                                   | 20                   | 36                                        | 3                   | 4                   |
| 5            | 5877                        | Хонда Цивик, 1999          | 48                                   | 20                   | 36                                        | 3                   | 4                   |
| 6            | 5878                        | Шевролле Сильверадо, 1999  | 20                                   | 0                    | 37                                        | 1                   | 4                   |
| 7            | 5879                        | Шевролле Сильверадо, 1999  | 20                                   | 0                    | 37                                        | 2                   | 4                   |
| 8            | 5880                        | Шевролле Сильверадо, 1999  | 20                                   | 0                    | 37                                        | 2                   | 5                   |
| 9            | 5881                        | Шевролле Сильверадо, 1999  | 25                                   | 0                    | 37                                        | 2                   | 4                   |
| 10           | 5882                        | Шевролле Сильверадо, 1999  | 25                                   | 0                    | 37                                        | 2                   | 5                   |

Примечание: 1 - ноги на одной линии; 2 - правая нога впереди левой; 3 - левая нога впереди правой; 4- руки по бокам вниз; 5 - руки перекрещены

Таблица Б.2

## Основные полученные значения по тестам с АМ Polar-2

| Показатель                                      | Номер теста |        |        |        |        |        |        |       |        |        |
|-------------------------------------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
|                                                 | 5873        | 5874   | 5875   | 5876   | 5877   | 5878   | 5879   | 5880  | 5881   | 5882   |
| Суммарное ускорение головы, G, м/с <sup>2</sup> | 373,61      | 168,7  | 109,92 | 352,51 | 495,47 | 84,9   | 101,03 | 49,51 | 147,38 | 141,63 |
| Суммарное ускорение груди, G, м/с <sup>2</sup>  | 60,68       | 66,23  | 67,22  | 42,3   | 43,48  | 28,98  | 30,14  | 26,45 | 76,89  | 40,76  |
| Суммарное ускорение таза, G, м/с <sup>2</sup>   | 54,98       | 56,5   | 115,48 | 45,21  | 74,91  | 54     | 53,05  | 36,56 | 138,86 | 93,41  |
| НІС (15 мс)                                     | 3088        | 1229   | 573    | 1346   | 3779   | 231    | 193    | 113   | 1149   | 1105   |
| НІС (36 мс)                                     | 3088        | 1464   | 688    | 1486   | 3779   | 284    | 334    | 207   | 1149   | 1105   |
| Момент на шее, Н-м                              | 51,9        | -76,39 | -36,59 | -41,69 | 79,38  | 100,94 | 122,77 | 84,1  | 56,7   | 51,85  |
| Угловое ускорение не бедре, рад/с <sup>2</sup>  | 16474       | -32338 | 15643  | 11466  | 12847  | 12173  | -15942 | 9635  | -18552 | -18524 |

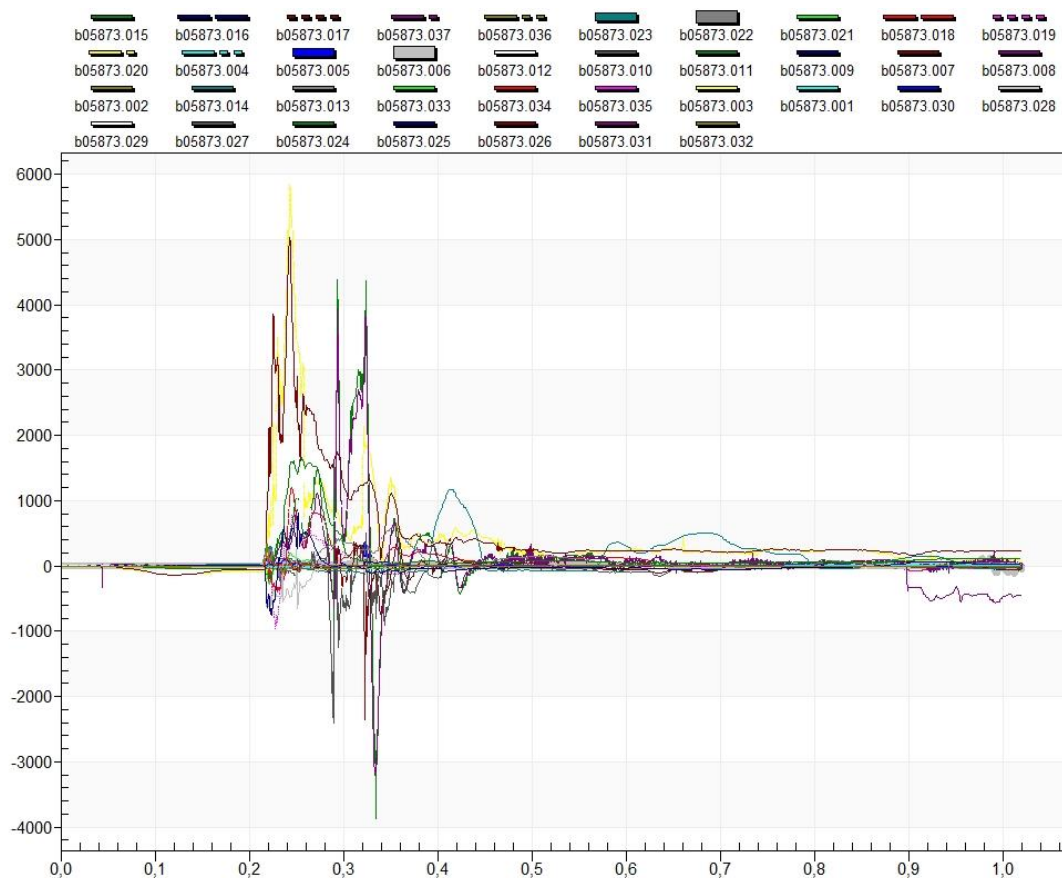


Рисунок Б.1 – Тест №5873, отображение всех каналов записи

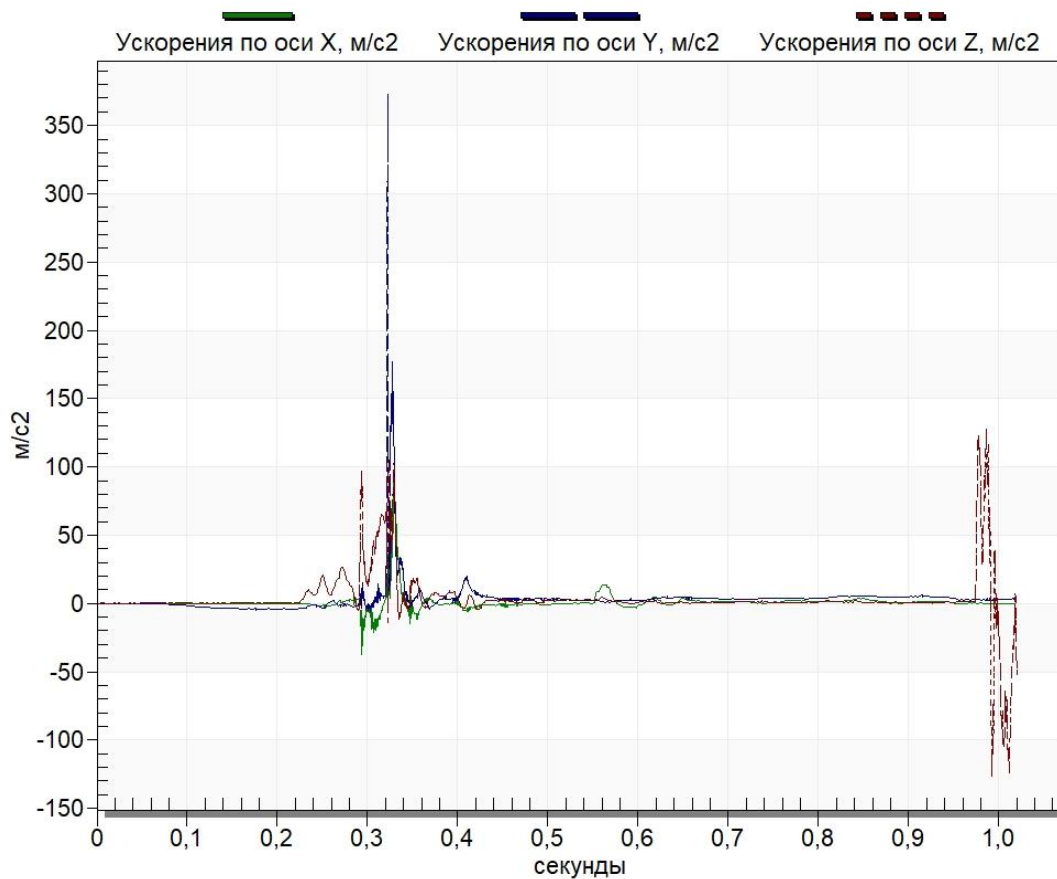


Рисунок Б.2 – Тест №5873, графики изменения ускорений на ЦТ головы АМ

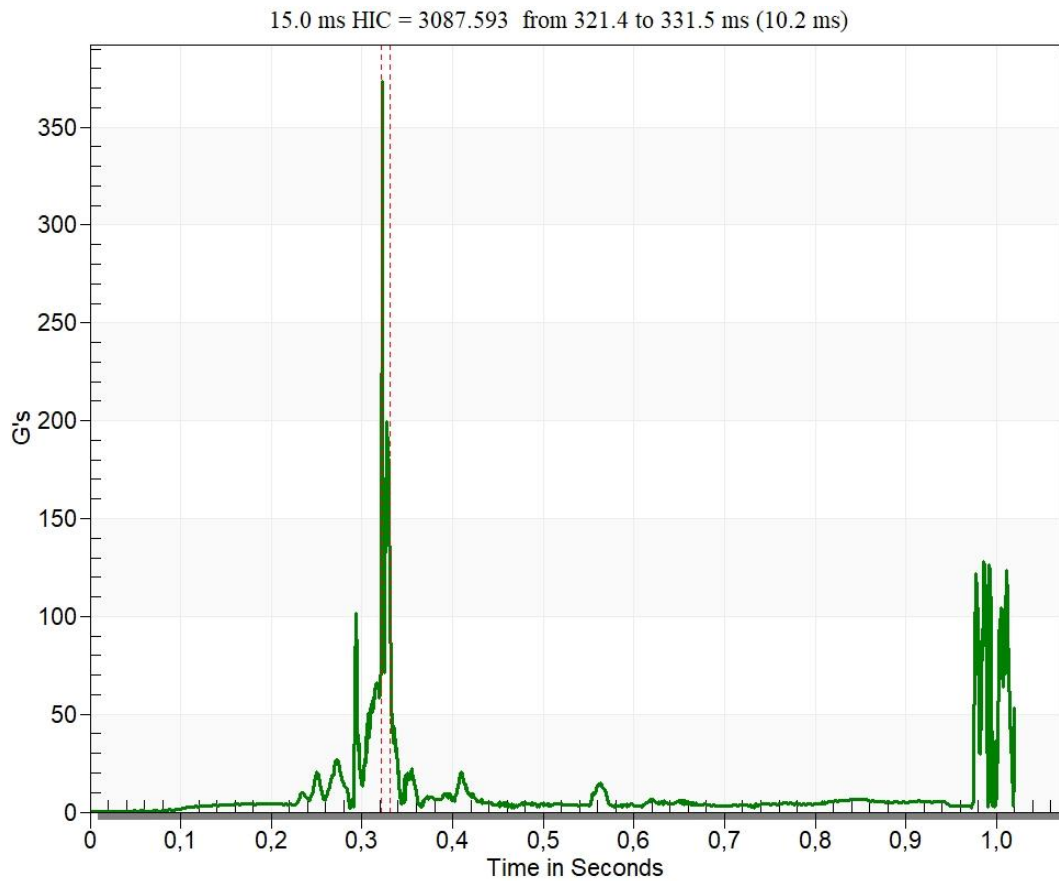


Рисунок Б.3 – Тест №5873, график пиковых величин расчета НИС

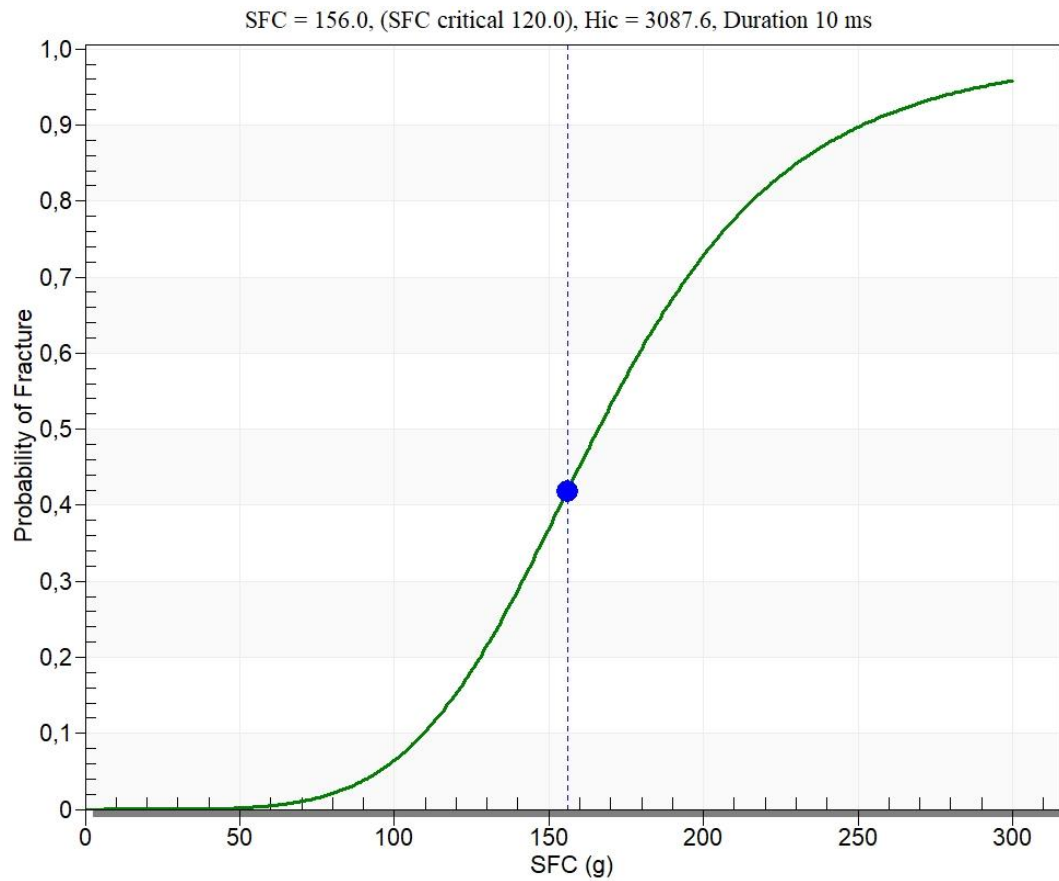


Рисунок Б.4 – Тест №5873, график вероятности травмы черепа

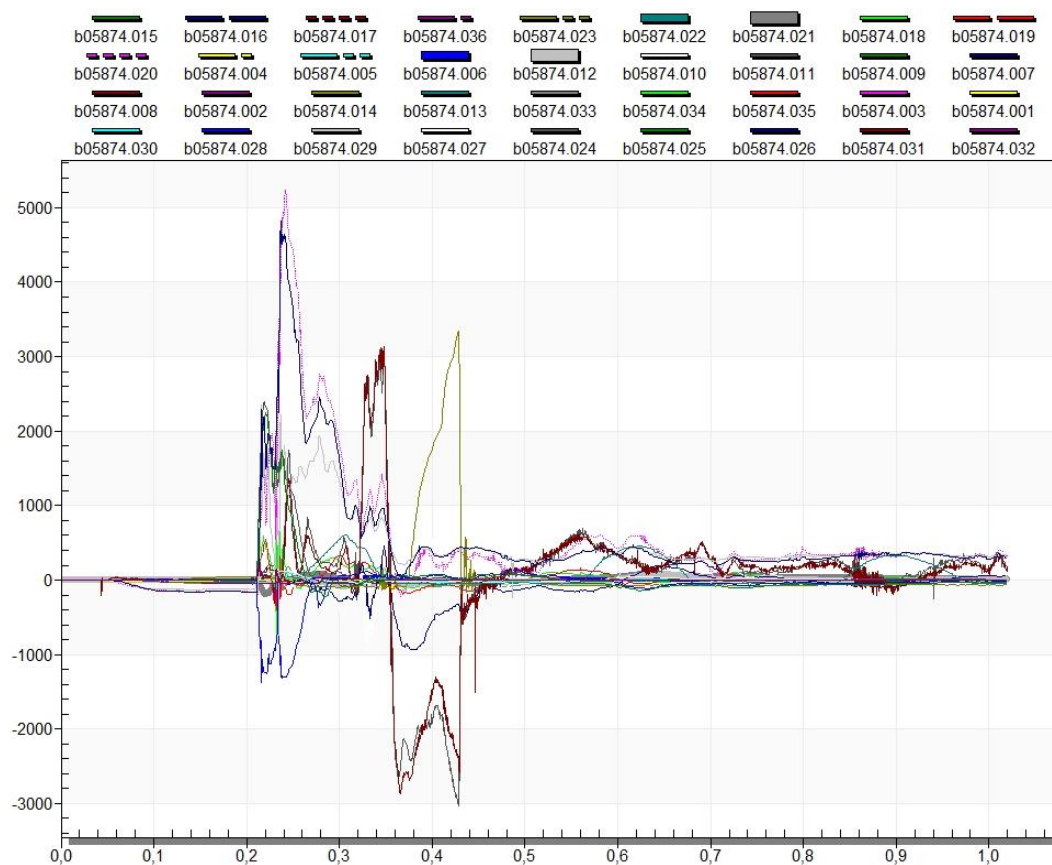


Рисунок Б.5 – Тест №5874, отображение всех каналов записи

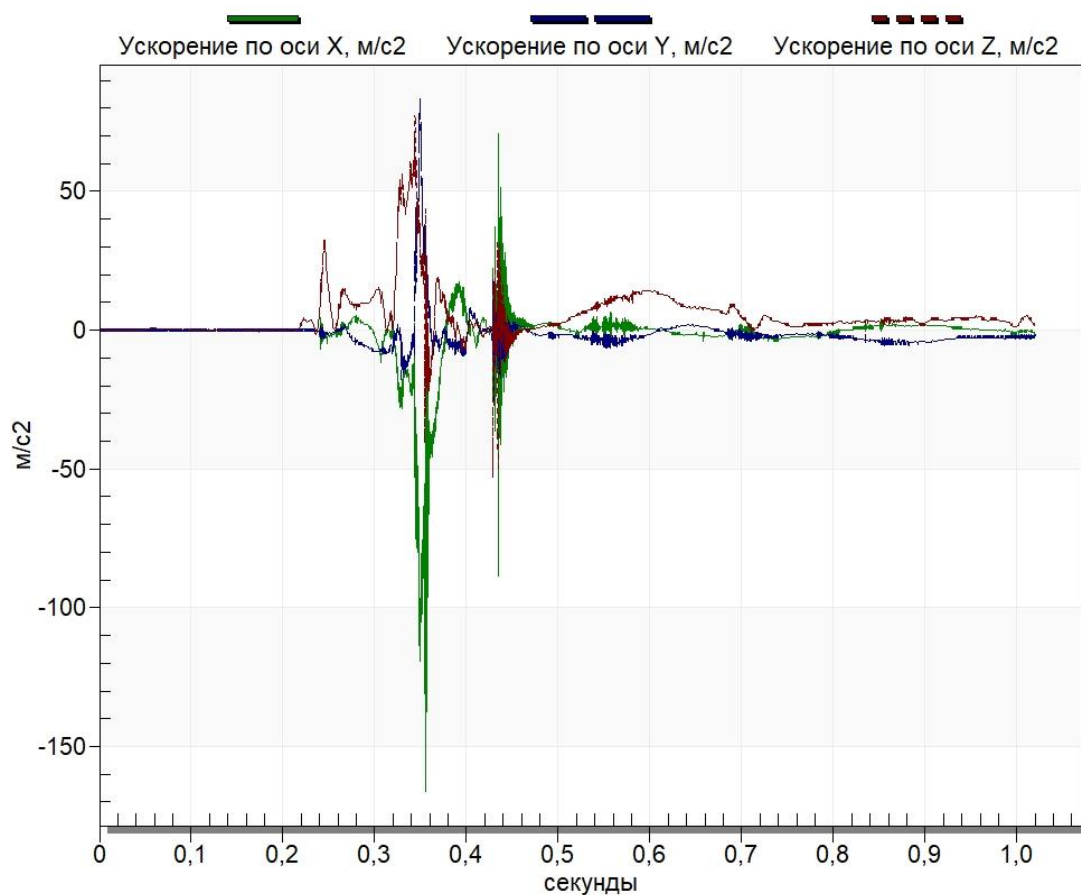


Рисунок Б.6 – Тест №5874, графики изменения ускорений на ЦТ головы АМ

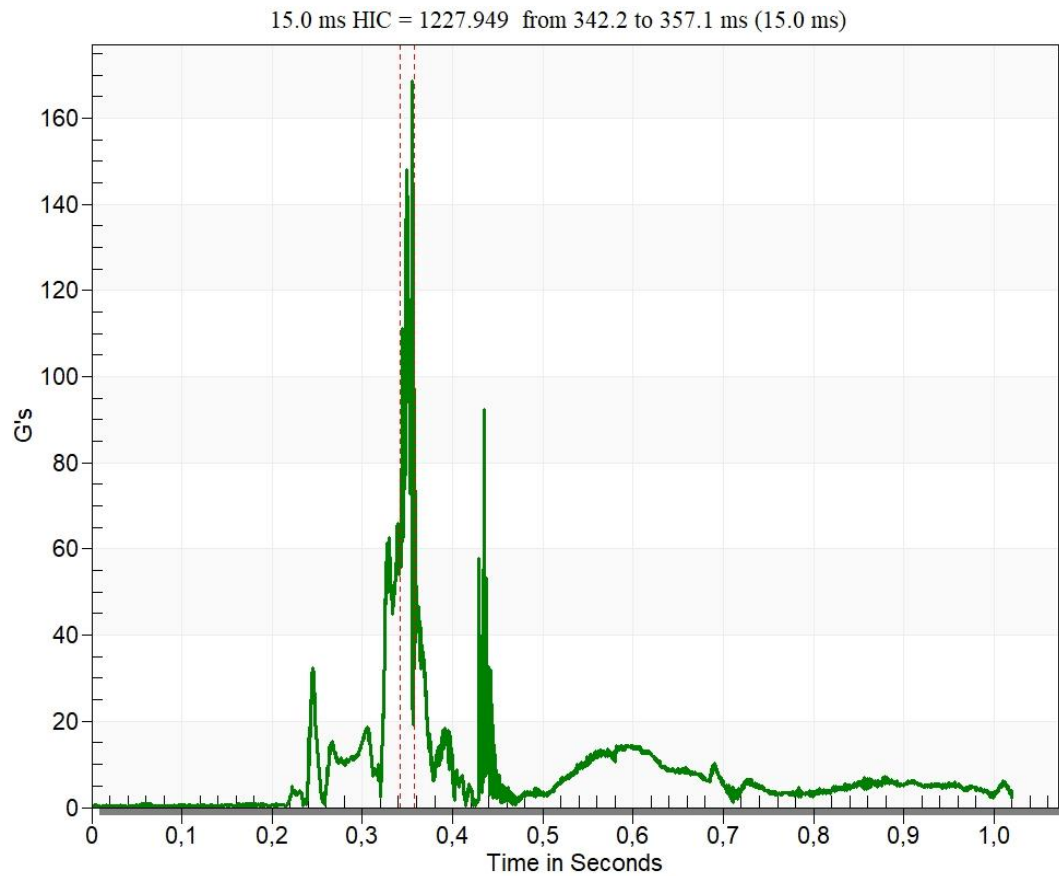


Рисунок Б.7 – Тест №5874, график пиковых величин расчета НИС

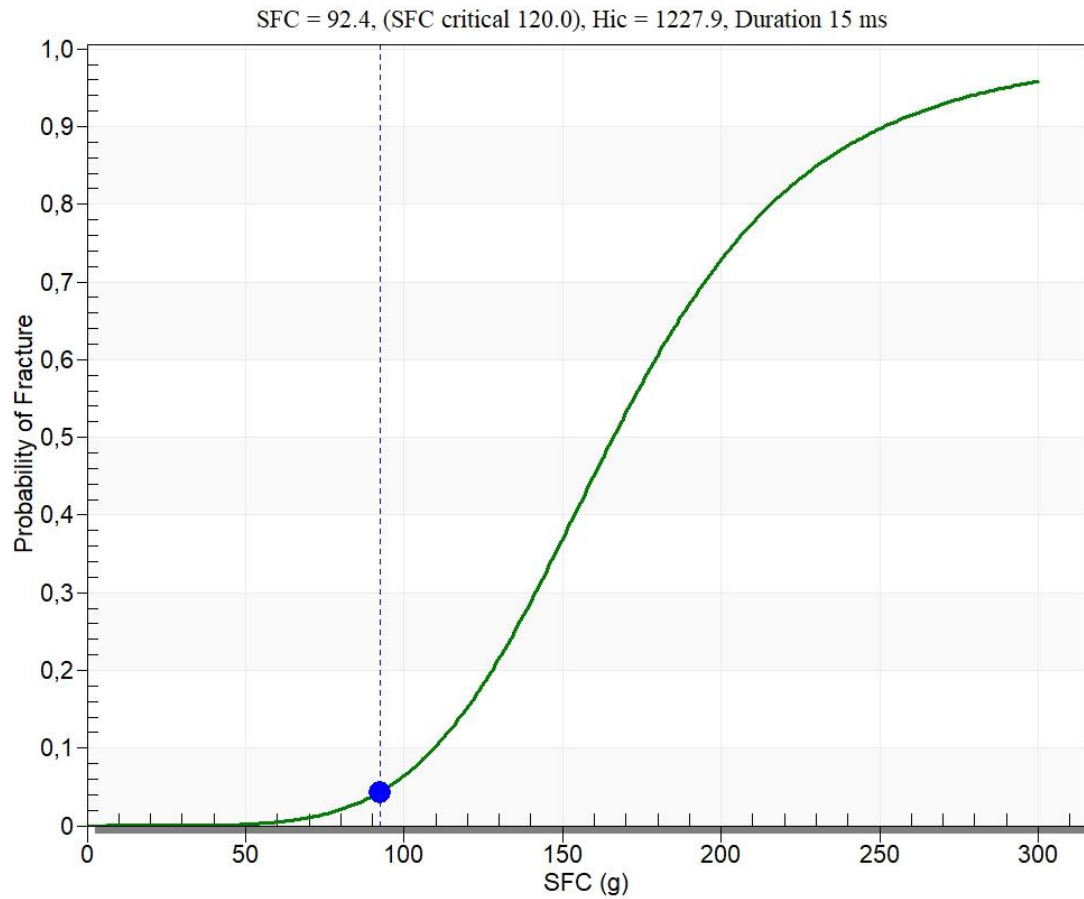


Рисунок Б.8 – Тест №5874, график вероятности травмы черепа

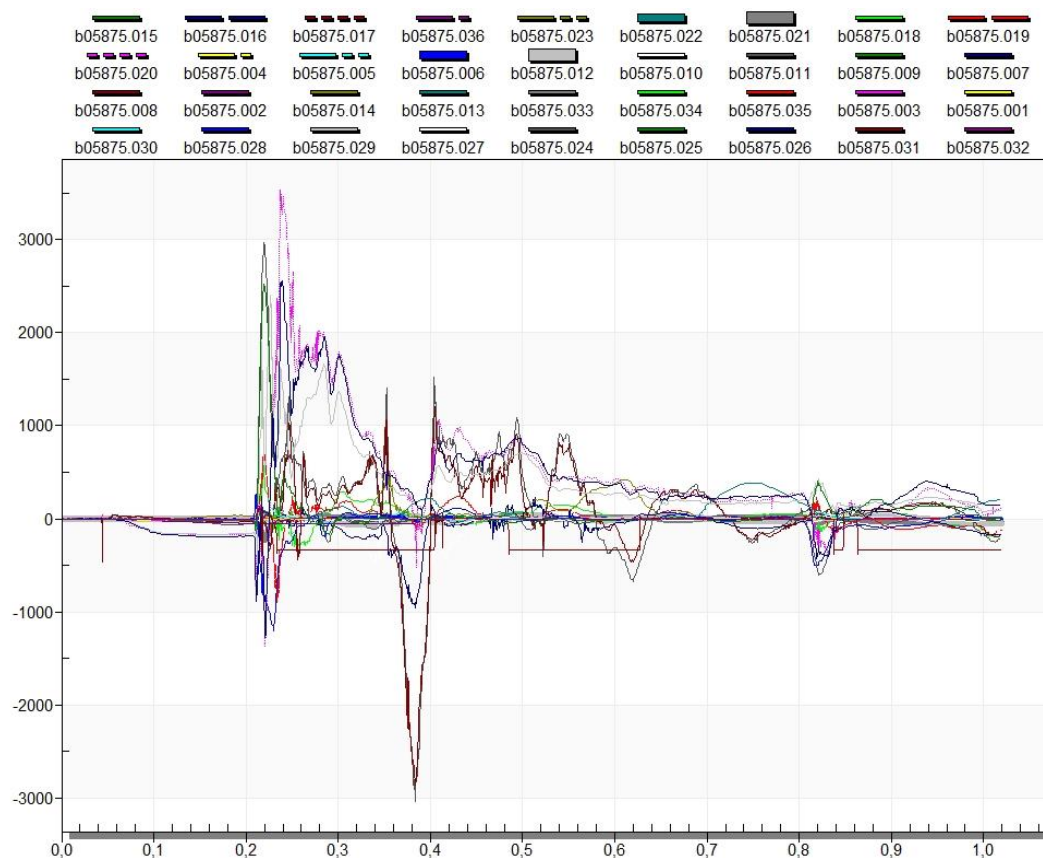


Рисунок Б.9 – Тест №5875, отображение всех каналов записи

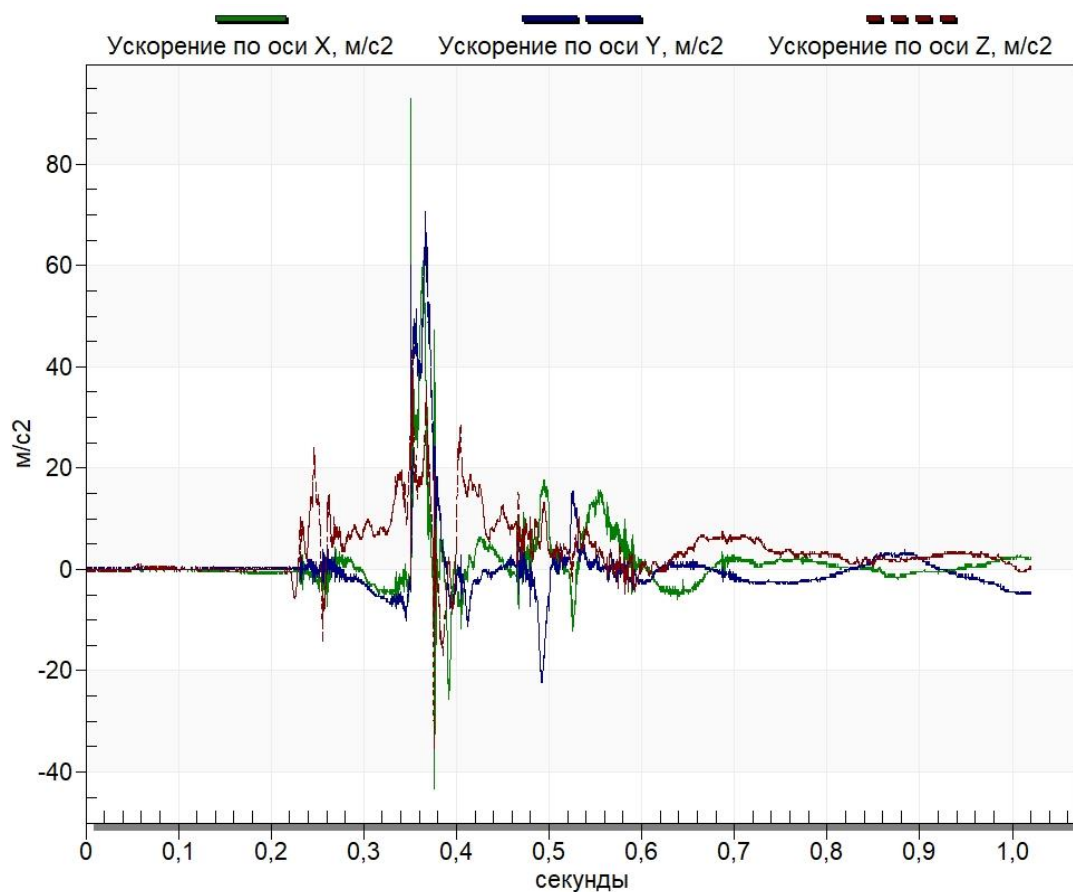


Рисунок Б.10 – Тест №5875, графики изменения ускорений на ЦТ головы АМ

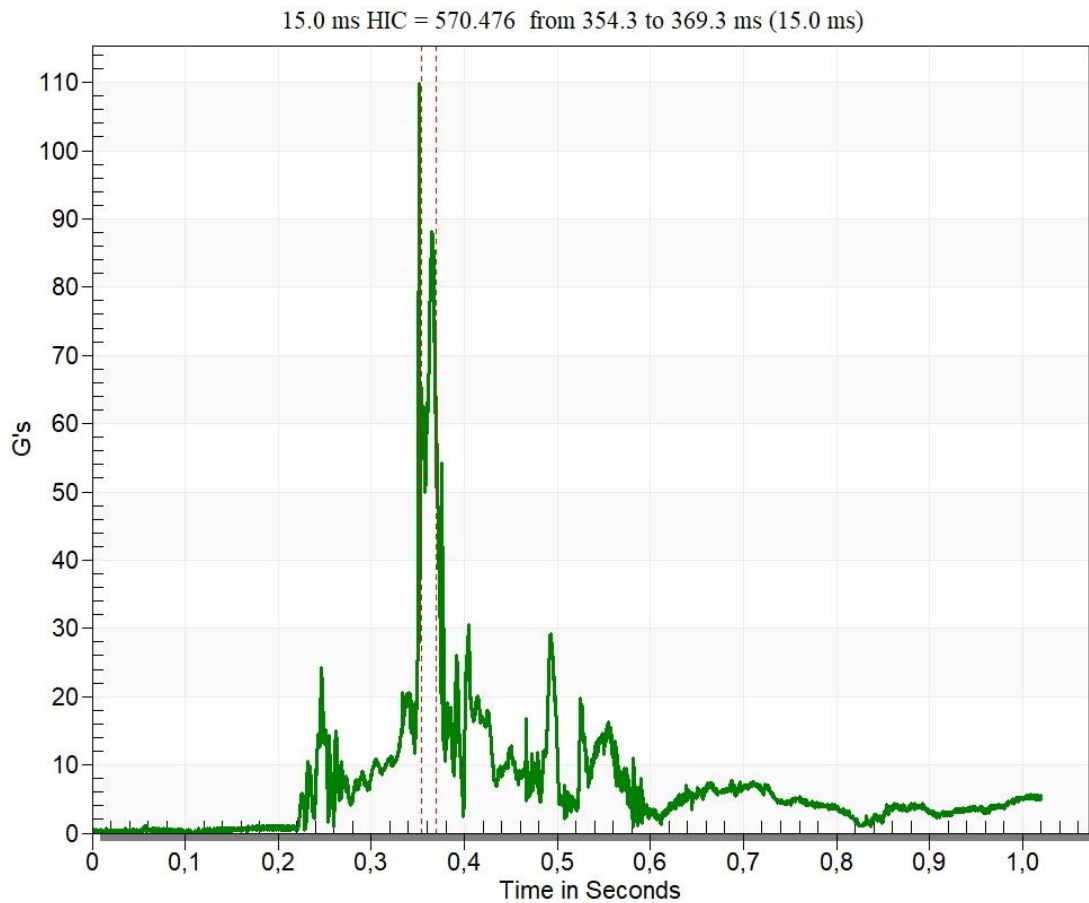


Рисунок Б.11 – Тест №5875, график пиковых величин расчета НИС

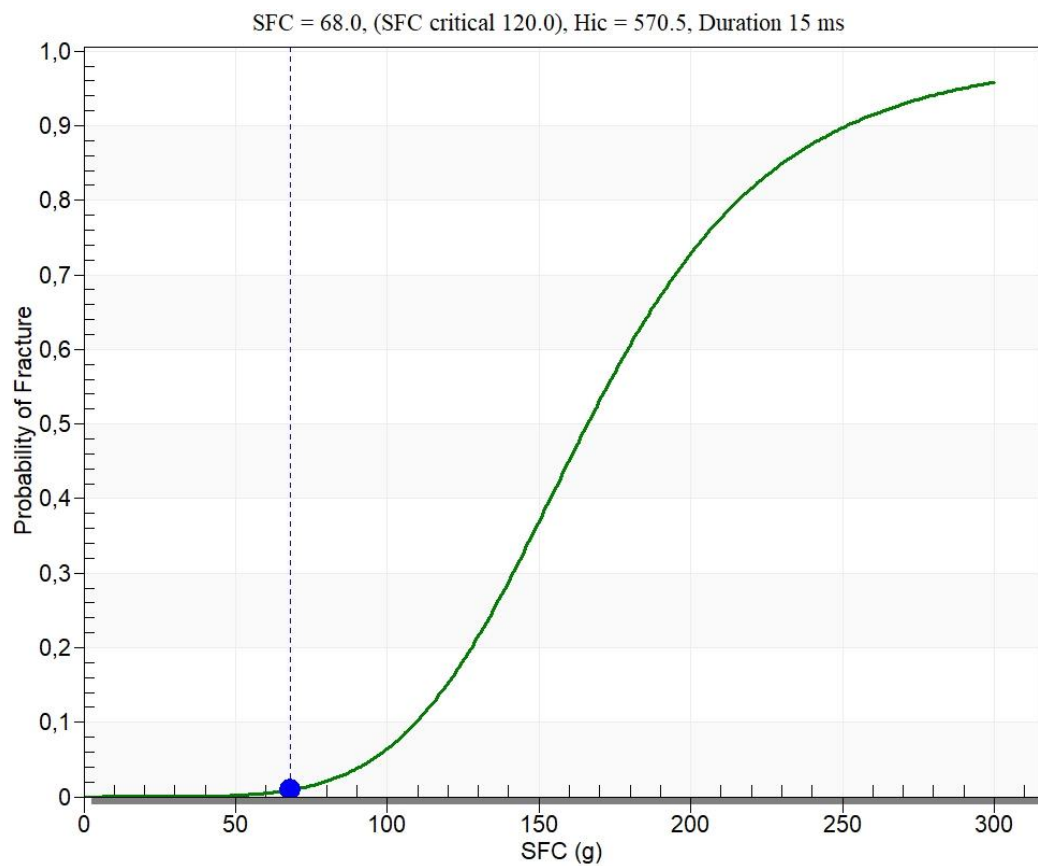


Рисунок Б.12 – Тест №5875, график вероятности травмы черепа

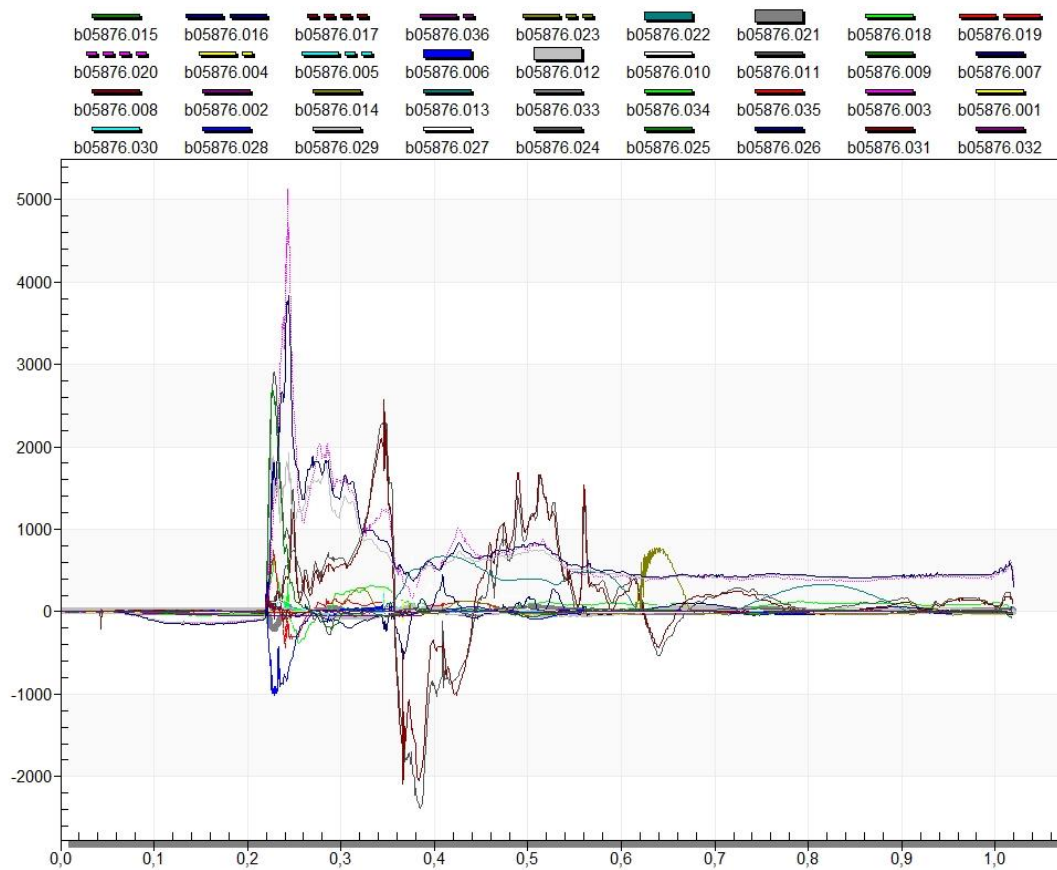


Рисунок Б.13 – Тест №5876, отображение всех каналов записи

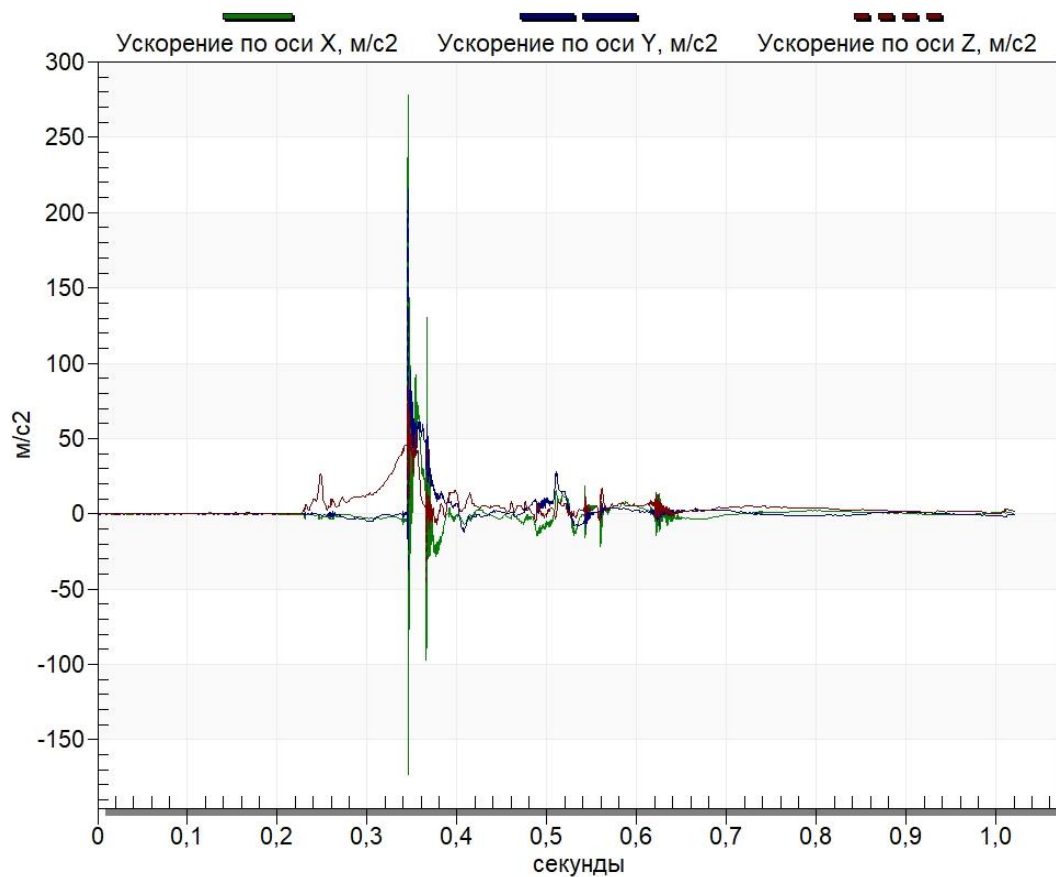


Рисунок Б.14 – Тест №5876, графики изменения ускорений на ЦТ головы АМ

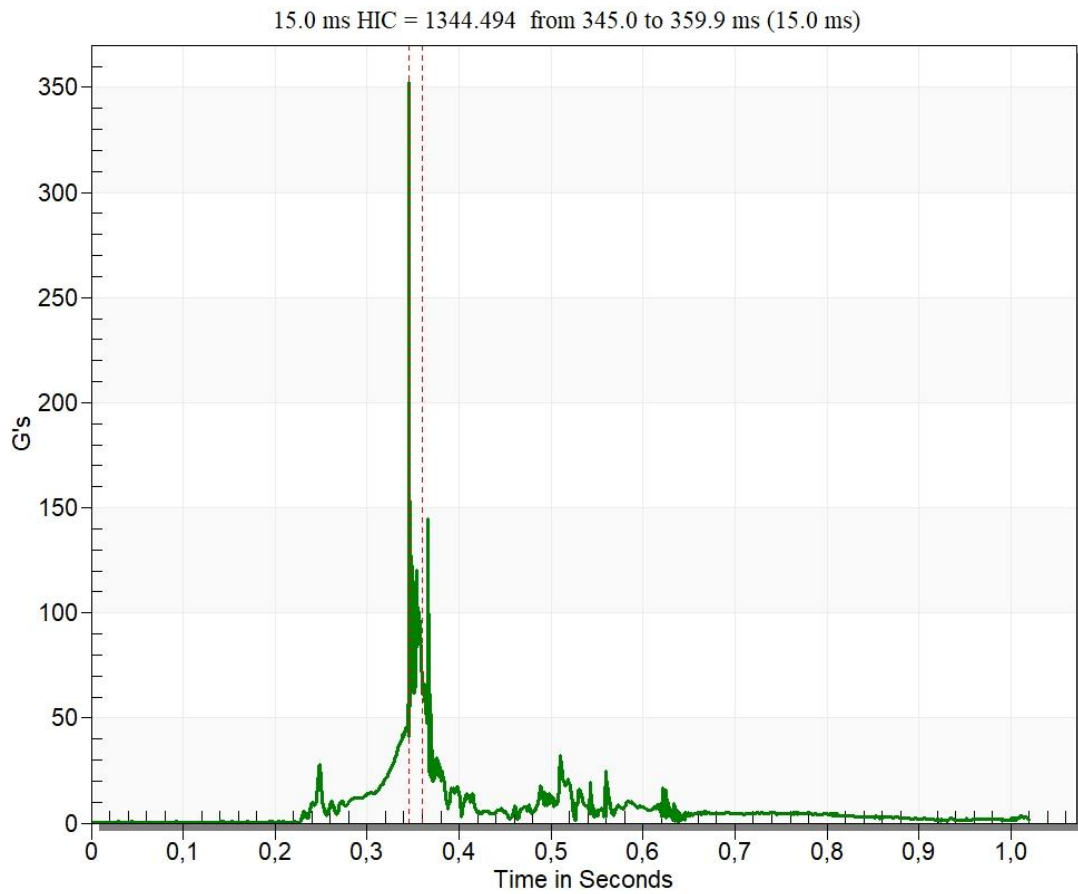


Рисунок Б.15 – Тест №5876, график пиковых величин расчета НИС

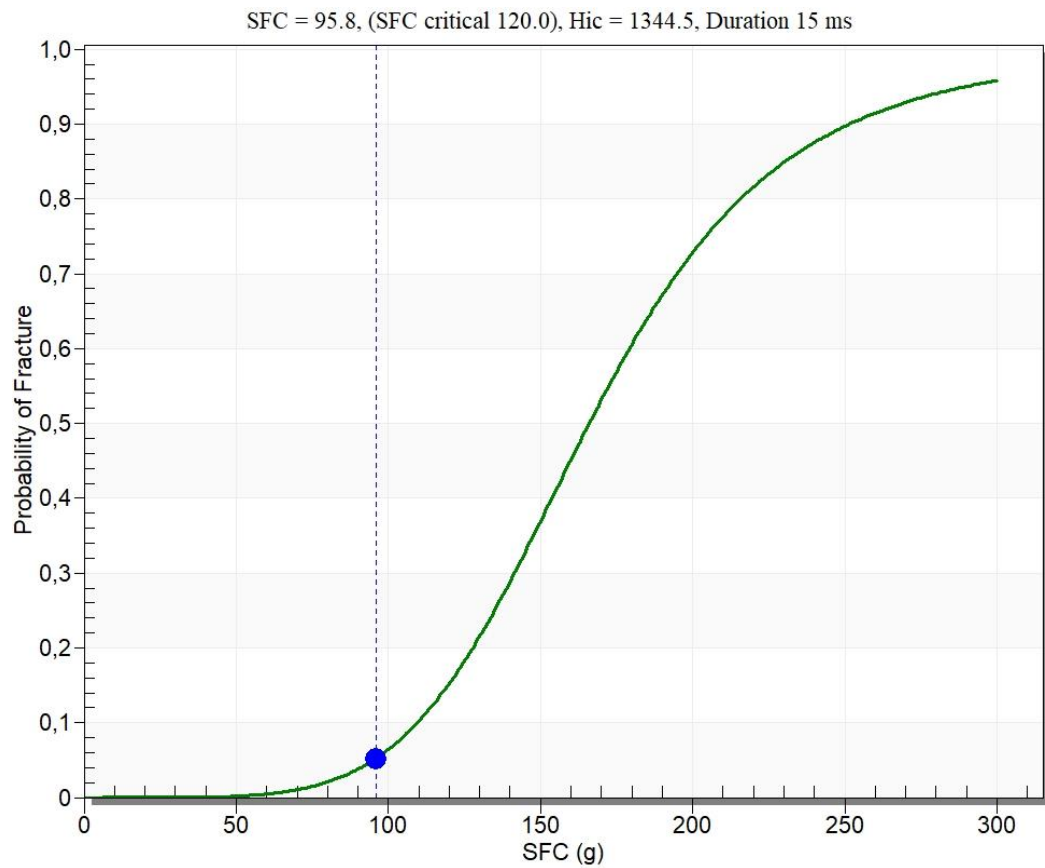


Рисунок Б.16 – Тест №5876, график вероятности травмы черепа

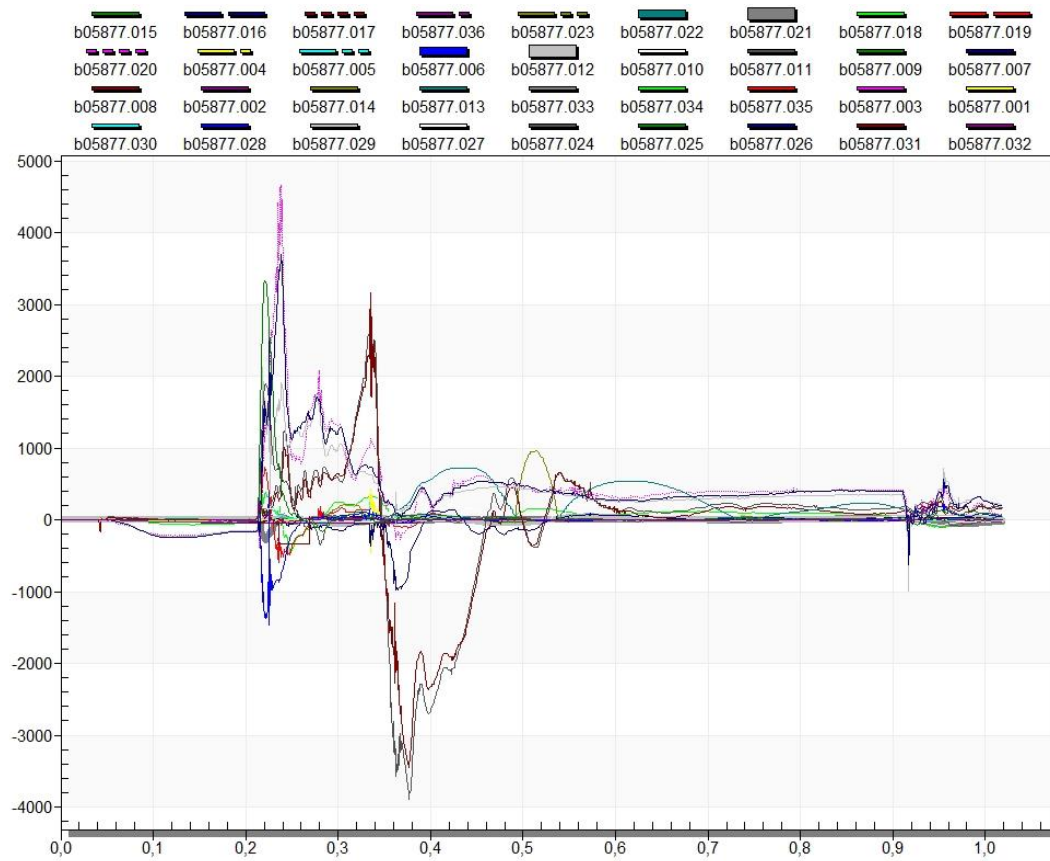


Рисунок Б.17 – Тест №5877, отображение всех каналов записи

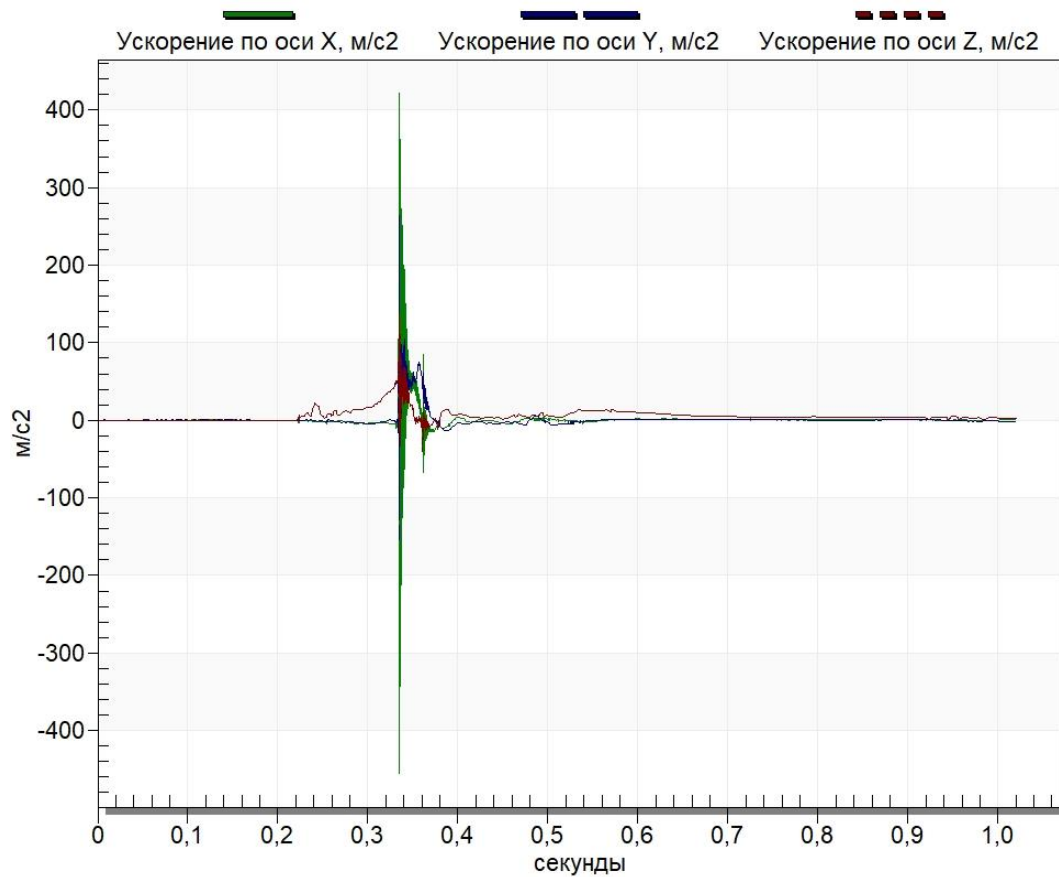


Рисунок Б.18 – Тест №5877, графики изменения ускорений на ЦТ головы АМ

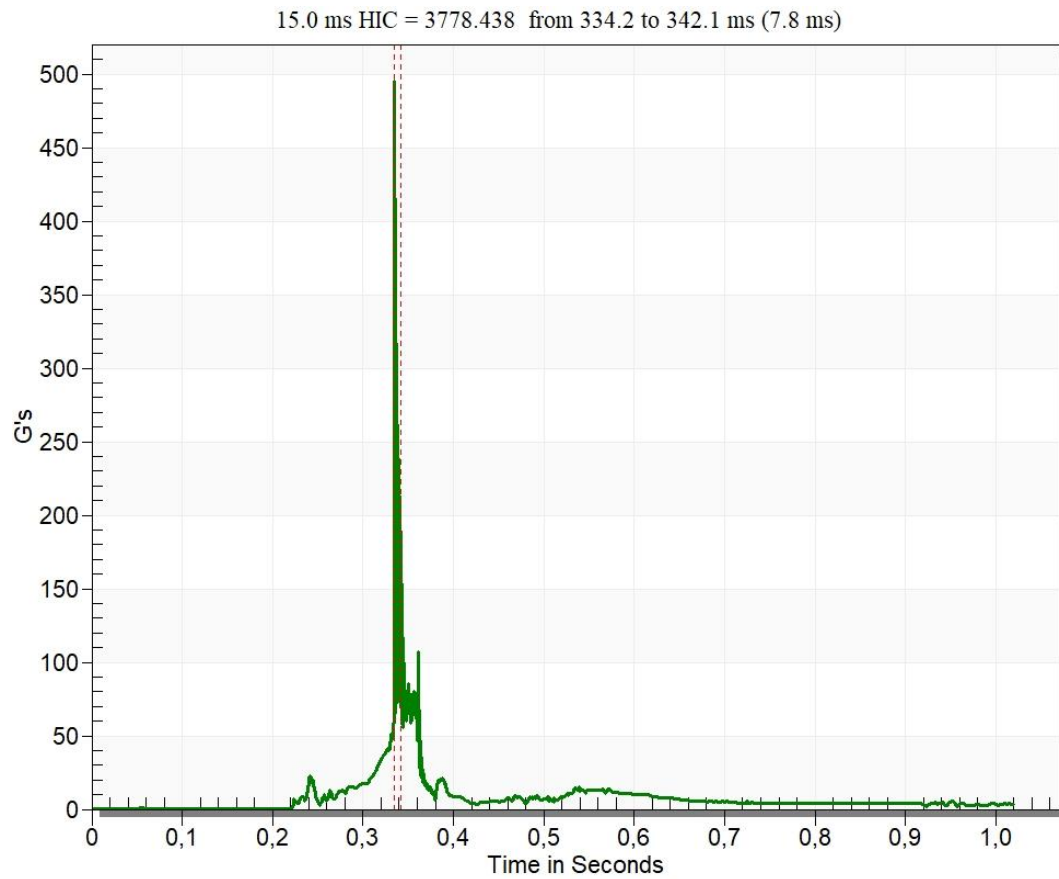


Рисунок Б.19 – Тест №5877, график пиковых величин расчета НИС

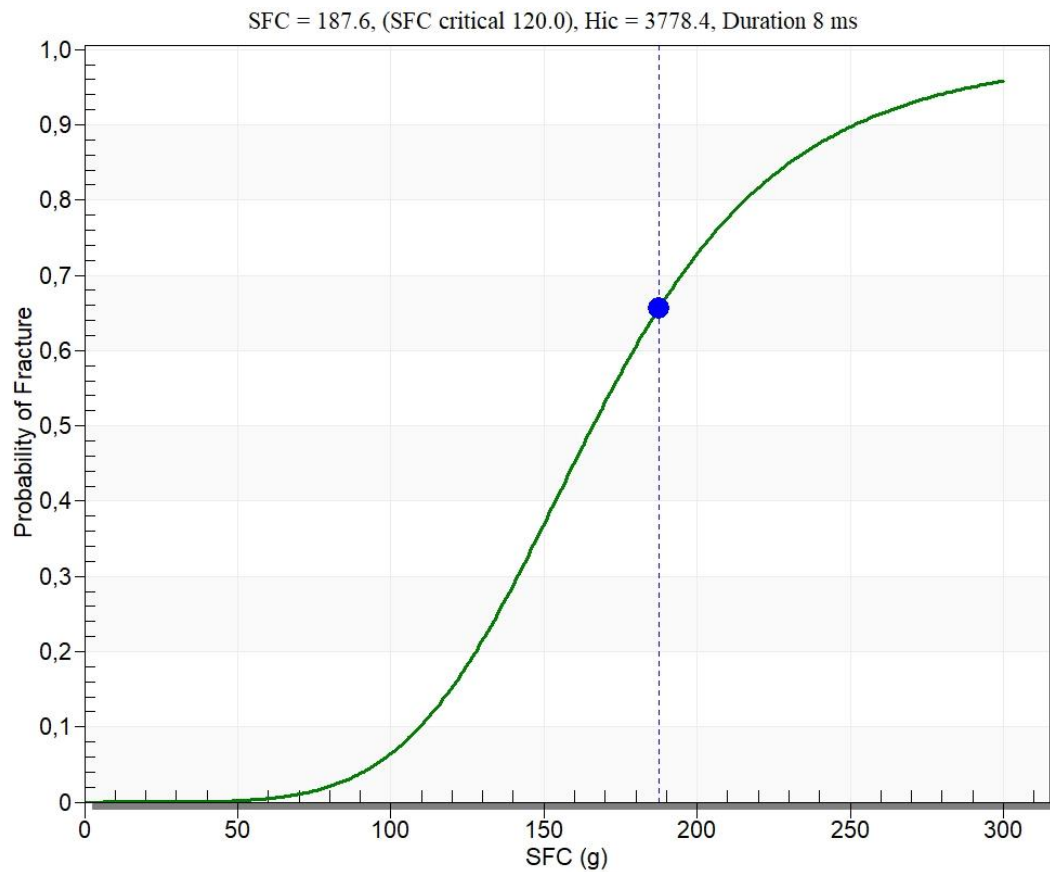


Рисунок Б.20 – Тест №5877, график вероятности травмы черепа

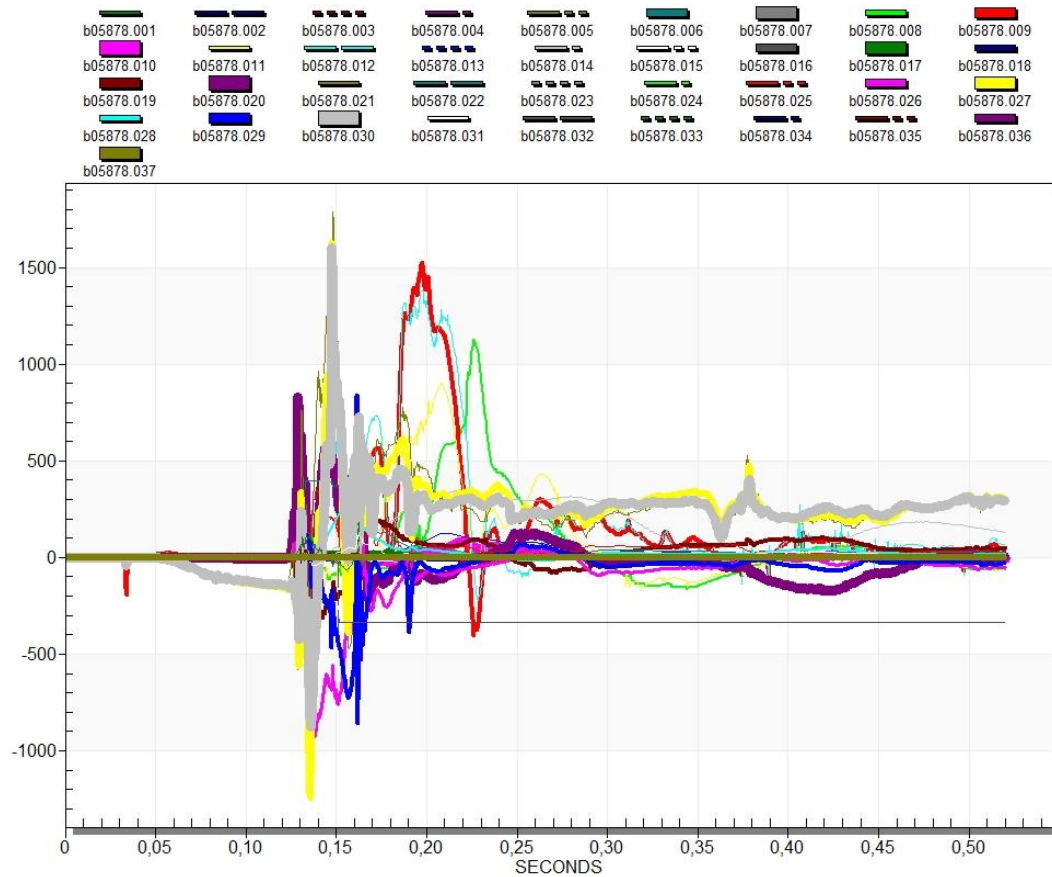


Рисунок Б.21 – Тест №5878, отображение всех каналов записи

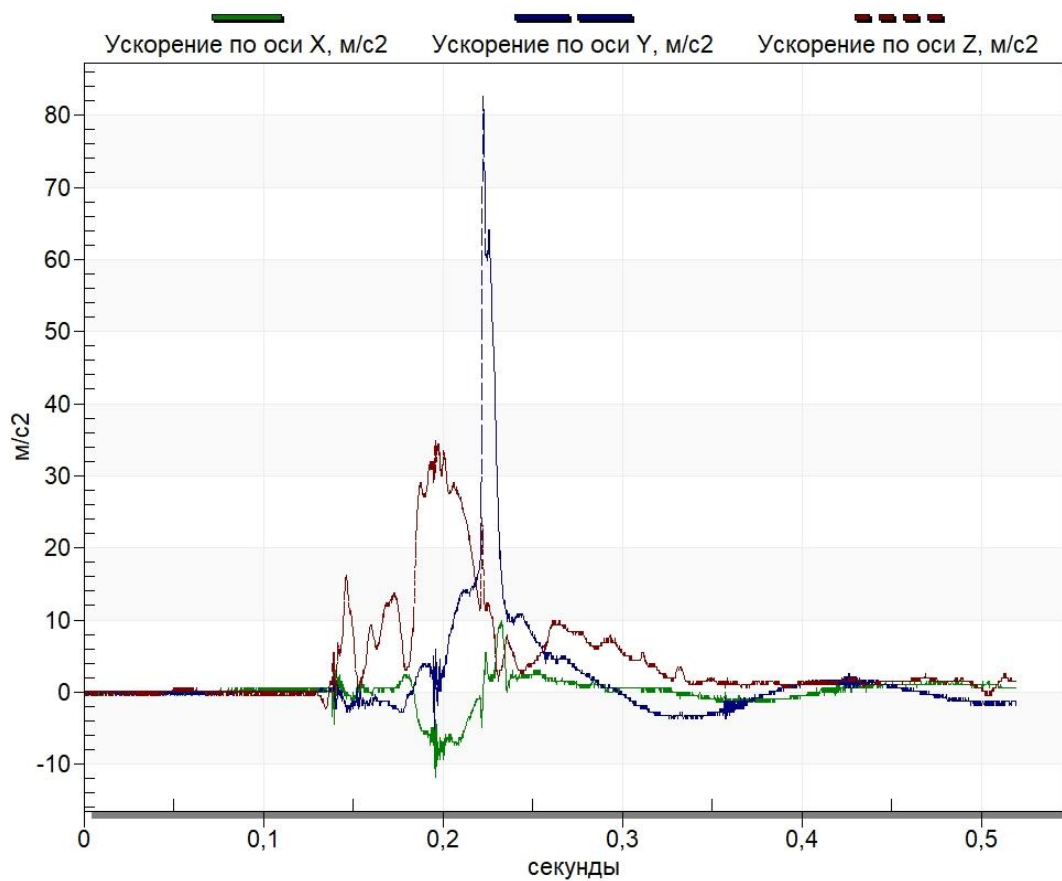


Рисунок Б.22 – Тест №5878, графики изменения ускорений на ЦТ головы АМ

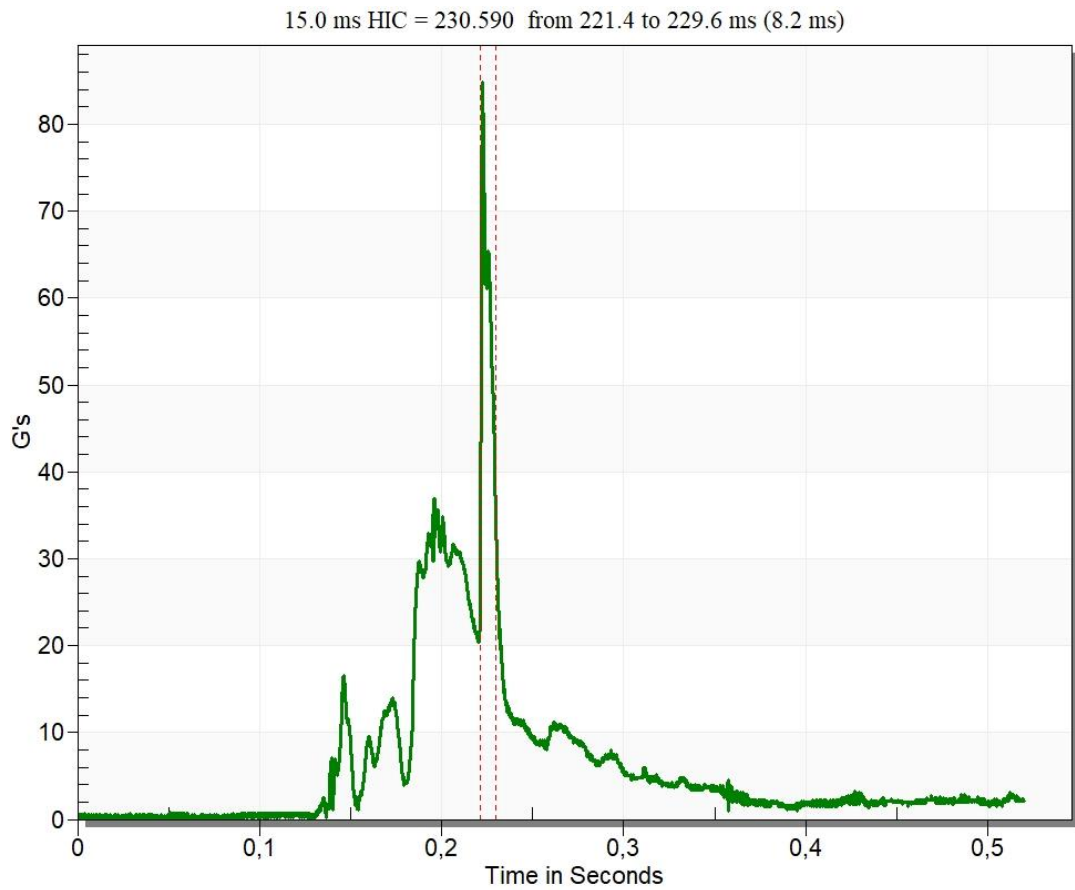


Рисунок Б.23 – Тест №5878, график пиковых величин расчета НИС

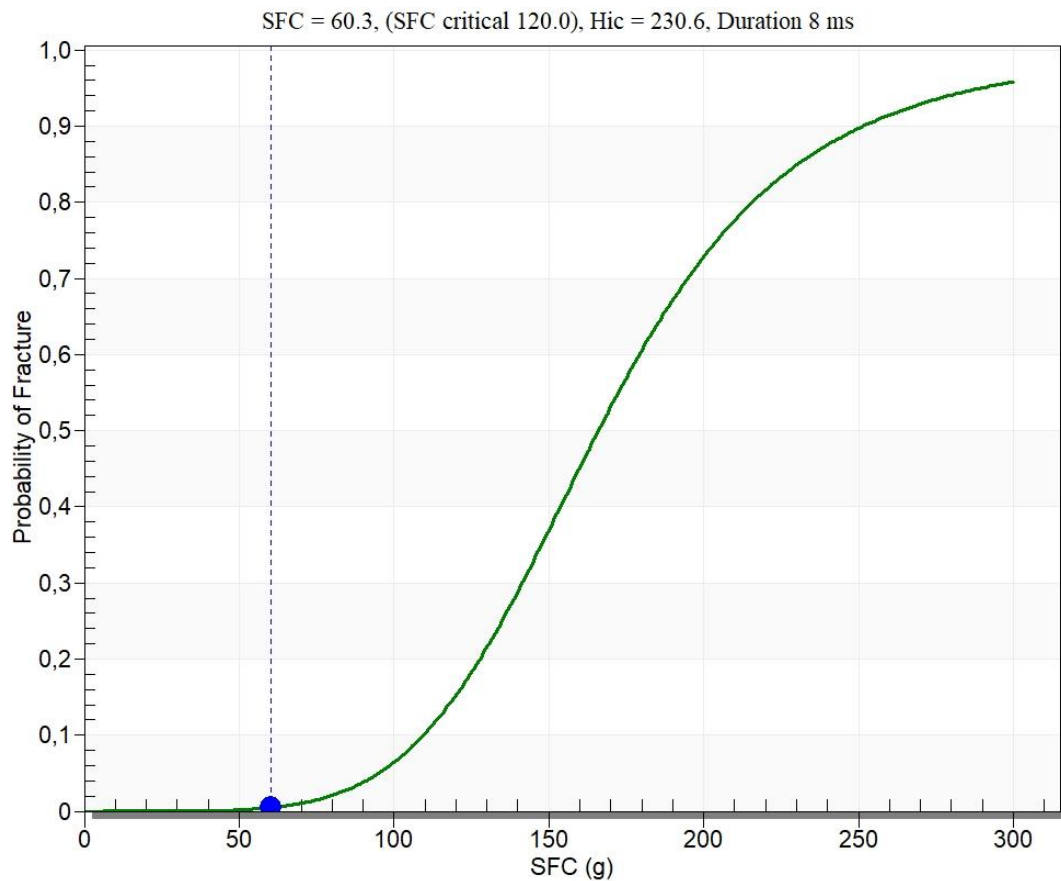


Рисунок Б.24 – Тест №5878, график вероятности травмы черепа

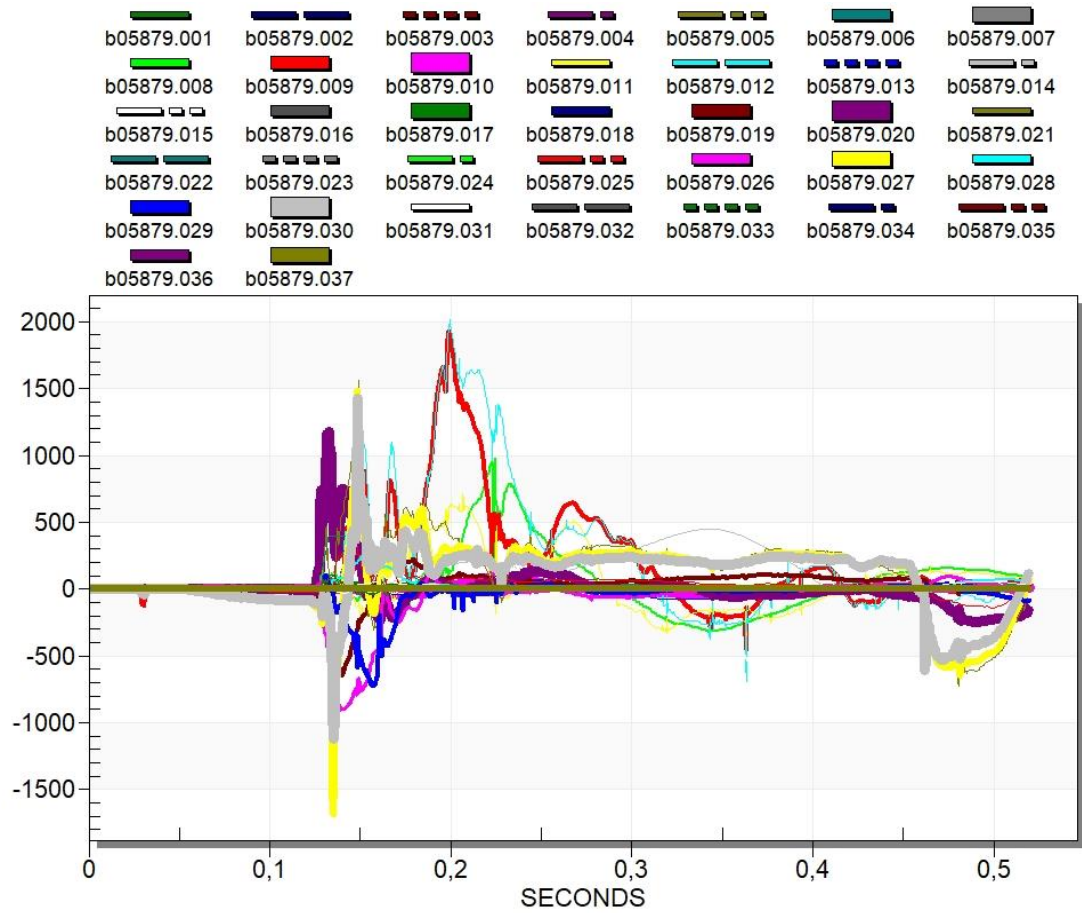


Рисунок Б.25 – Тест №5879, отображение всех каналов записи

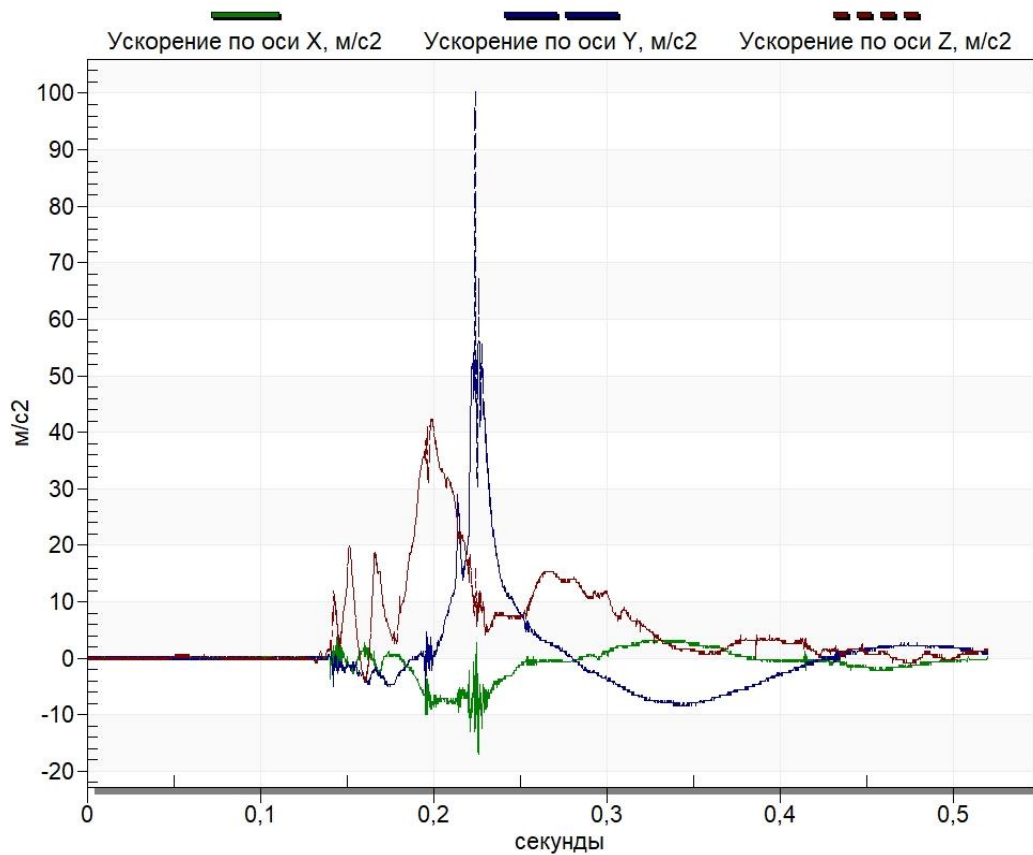


Рисунок Б.26 – Тест №5879, графики изменения ускорений на ЦТ головы АМ

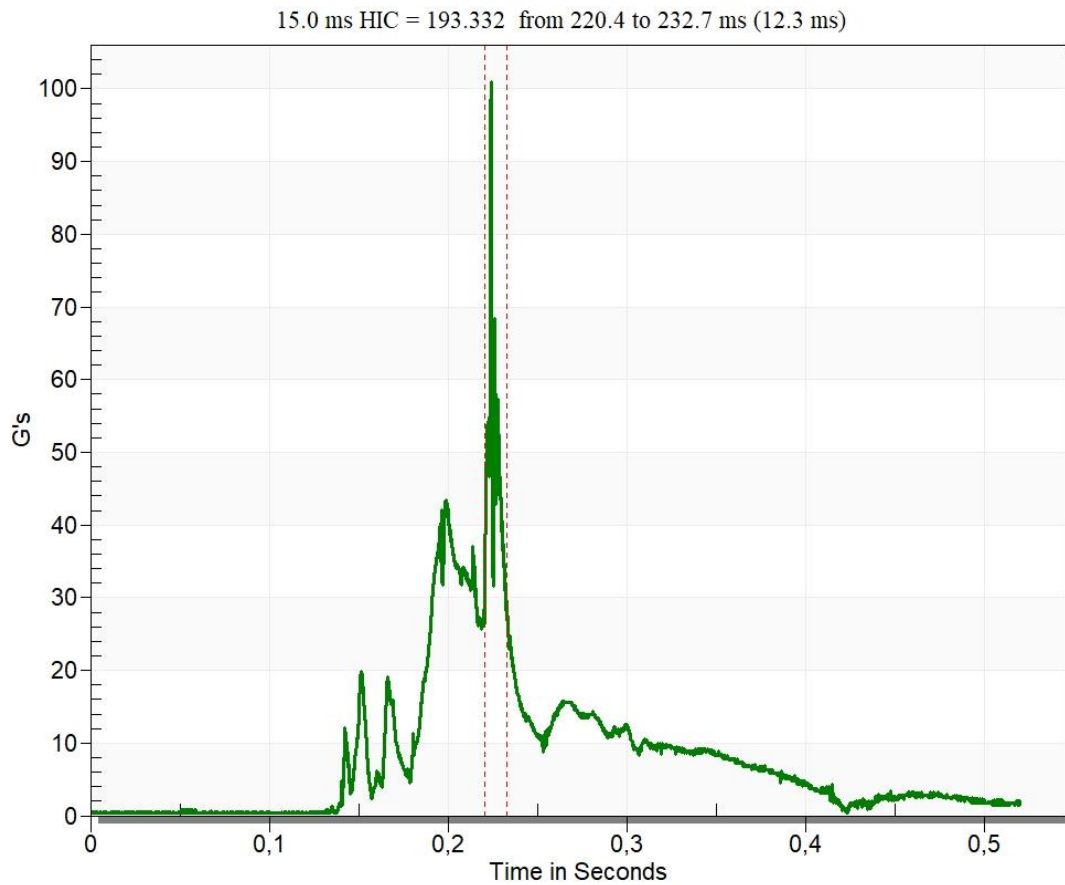


Рисунок Б.27 – Тест №5879, график пиковых величин расчета НИС

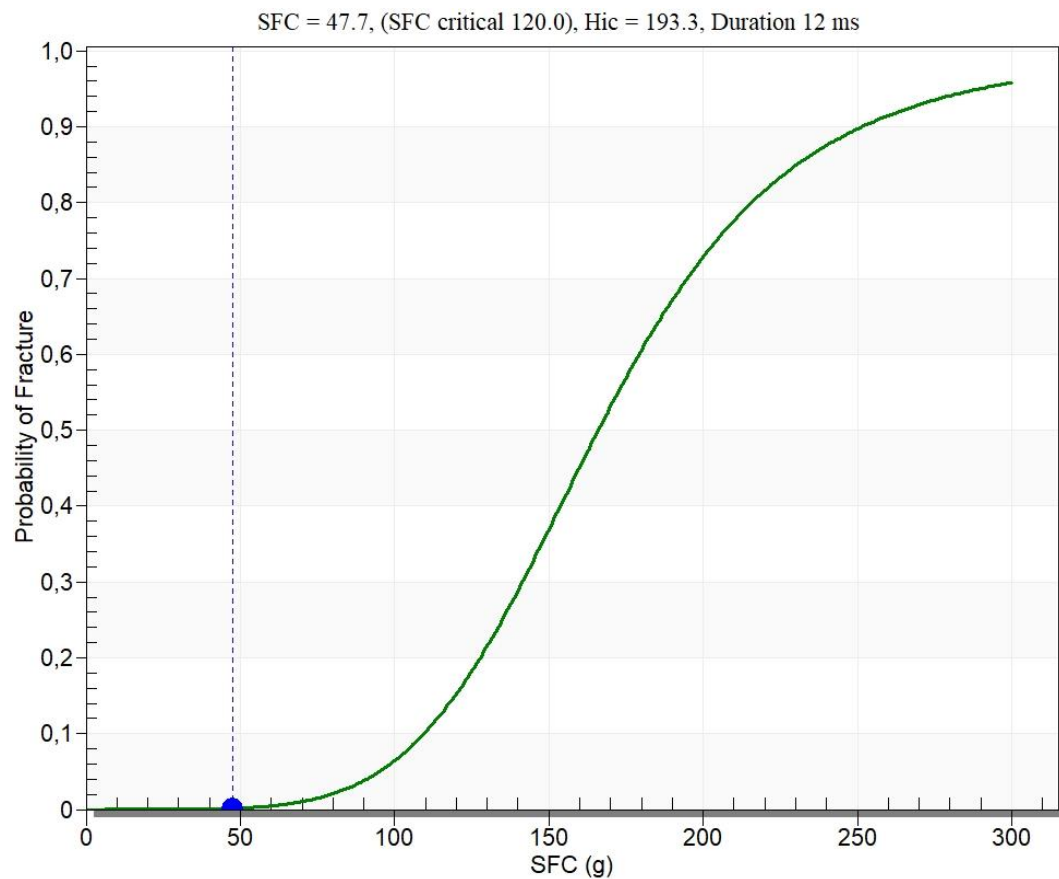


Рисунок Б.28 – Тест №5879, график вероятности травмы черепа

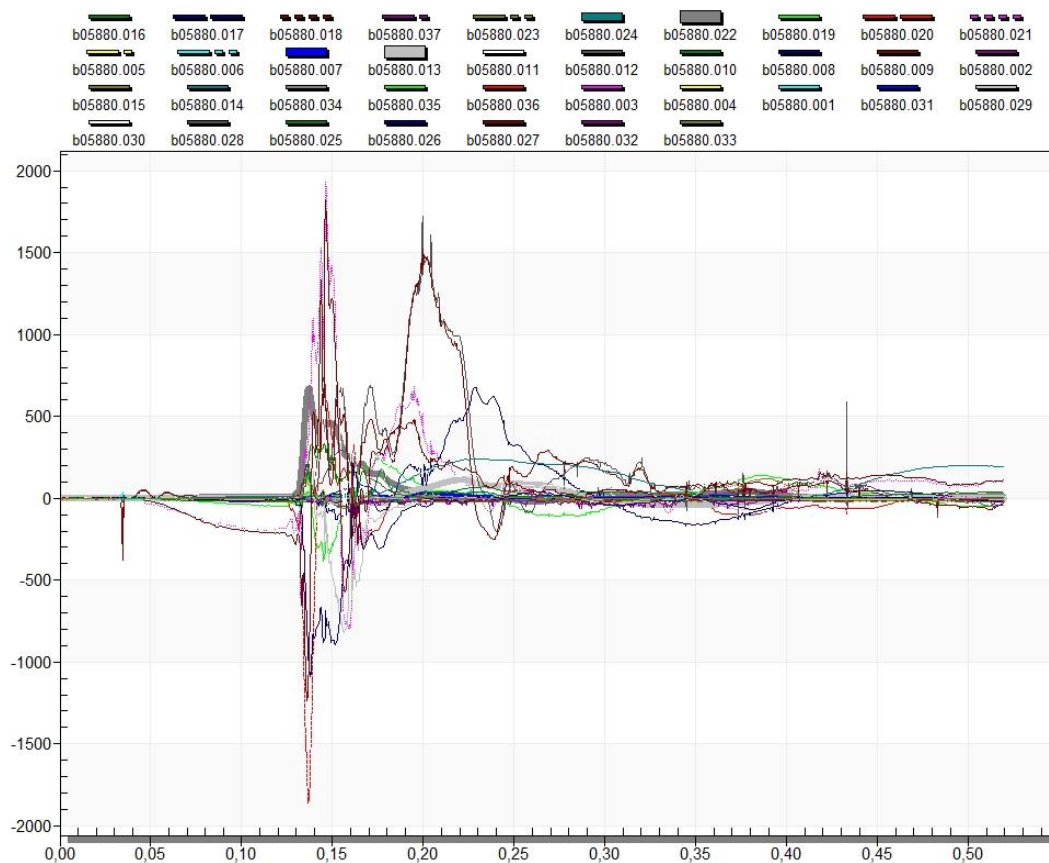


Рисунок Б.29 – Тест №5880, отображение всех каналов записи

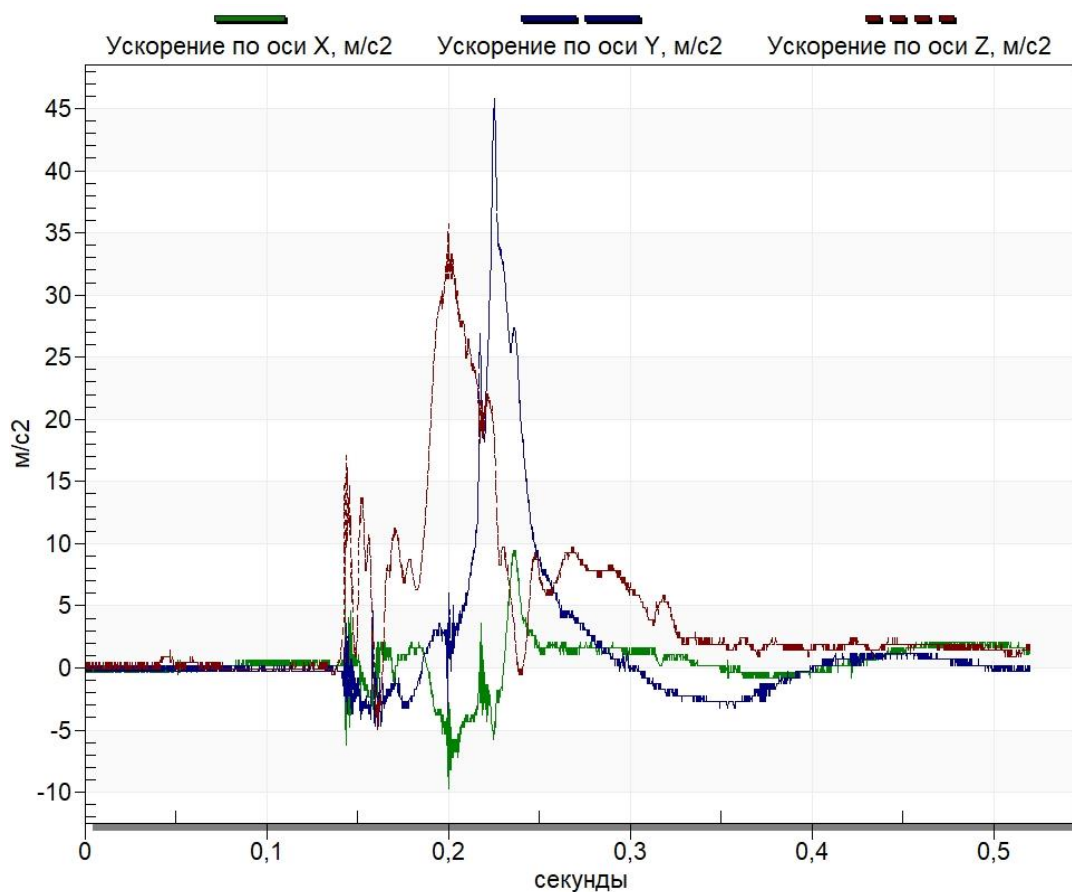


Рисунок Б.30 – Тест №5880, графики изменения ускорений на ЦТ головы АМ

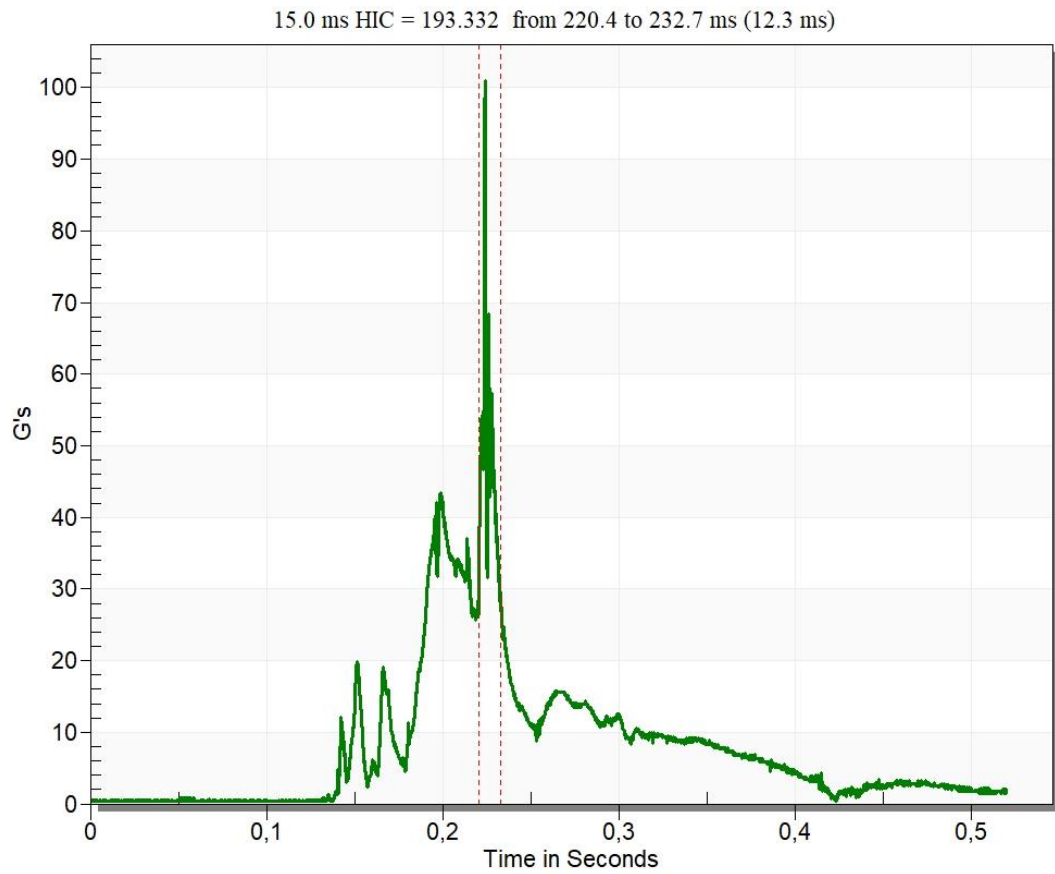


Рисунок Б.31 – Тест №5880, график пиковых величин расчета НИС

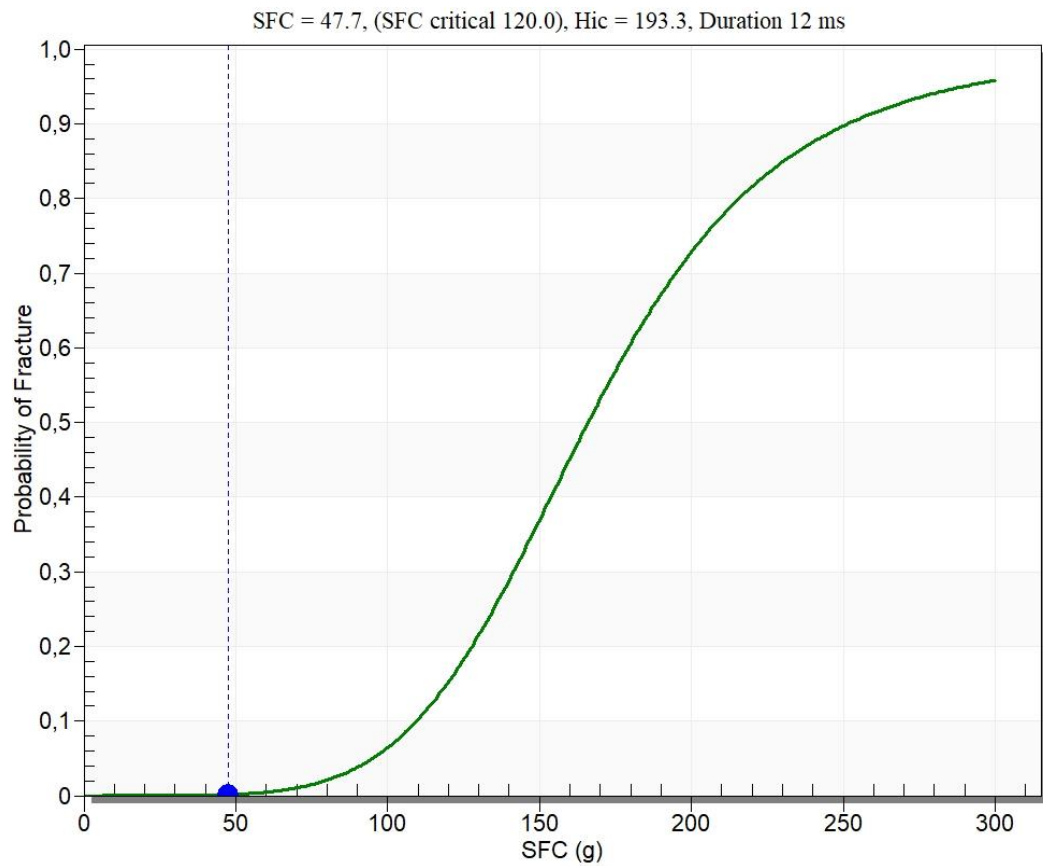


Рисунок Б.32 – Тест №5880, график вероятности травмы черепа

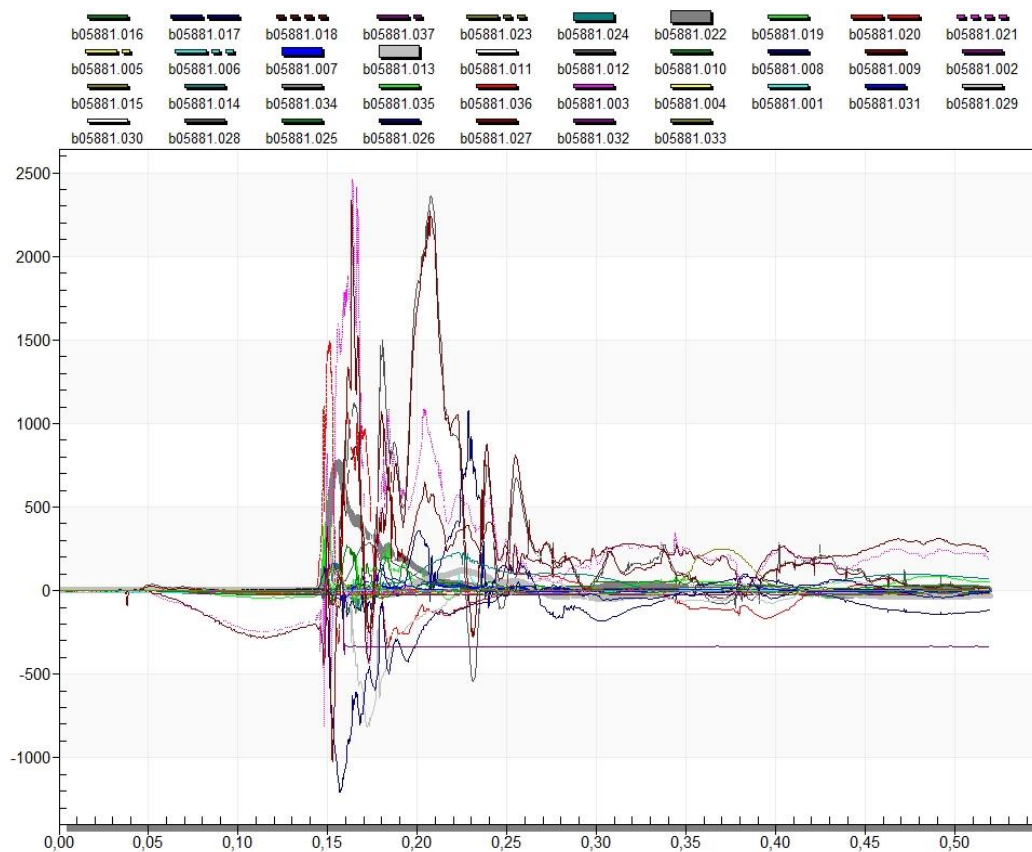


Рисунок Б.33 – Тест №5881, отображение всех каналов записи

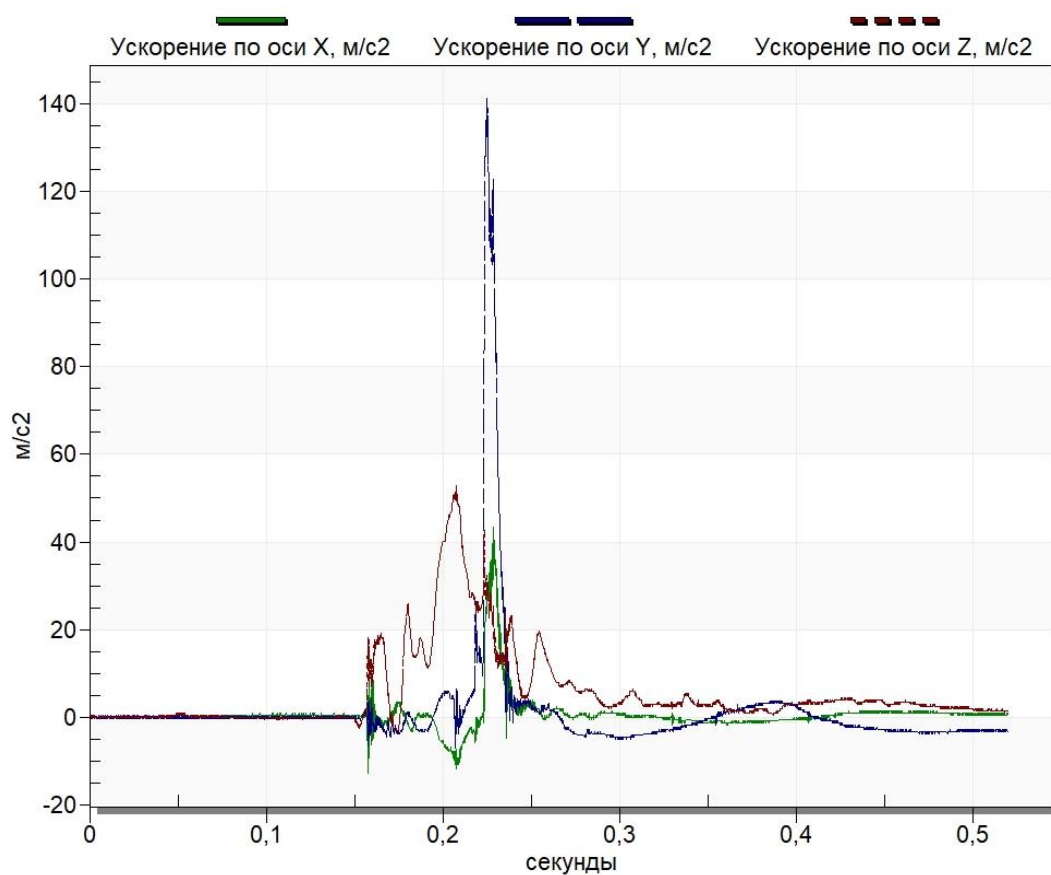


Рисунок Б.34 – Тест №5881, графики изменения ускорений на ЦТ головы АМ

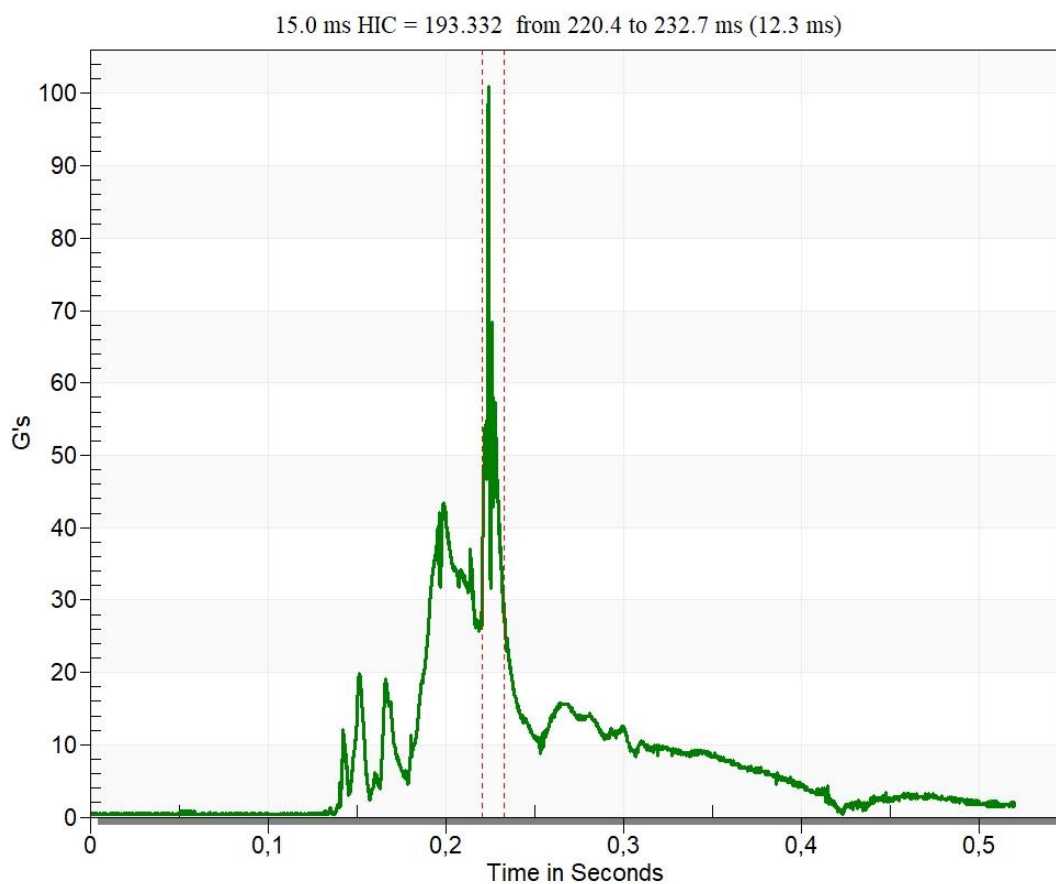


Рисунок Б.35 – Тест №5881, график пиковых величин расчета НИС

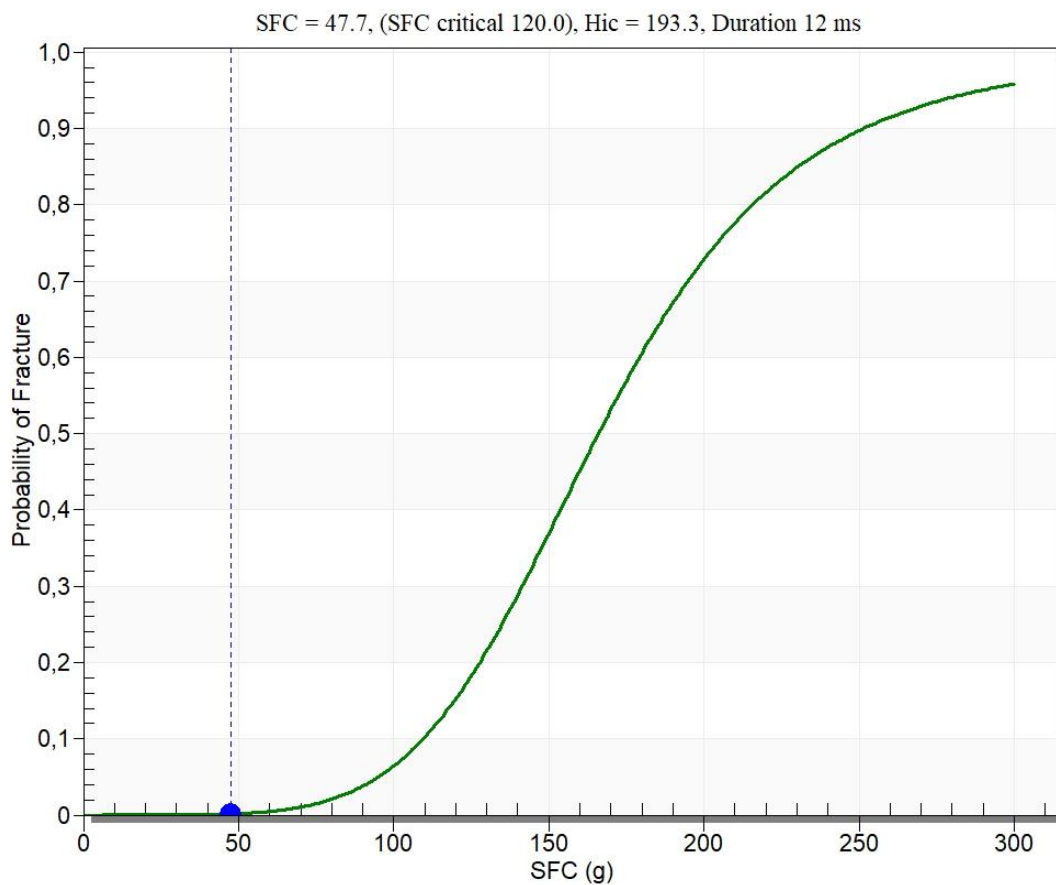


Рисунок Б.36 – Тест №5881, график вероятности травмы черепа

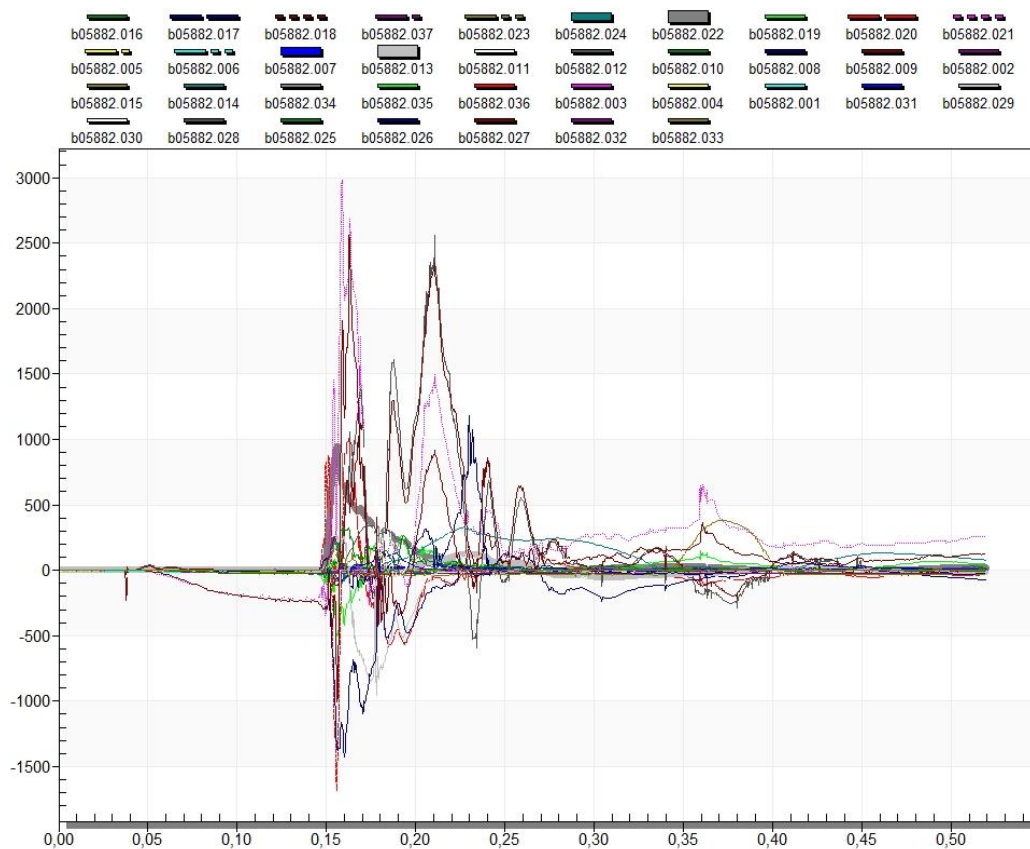


Рисунок Б.37 – Тест №5882, отображение всех каналов записи

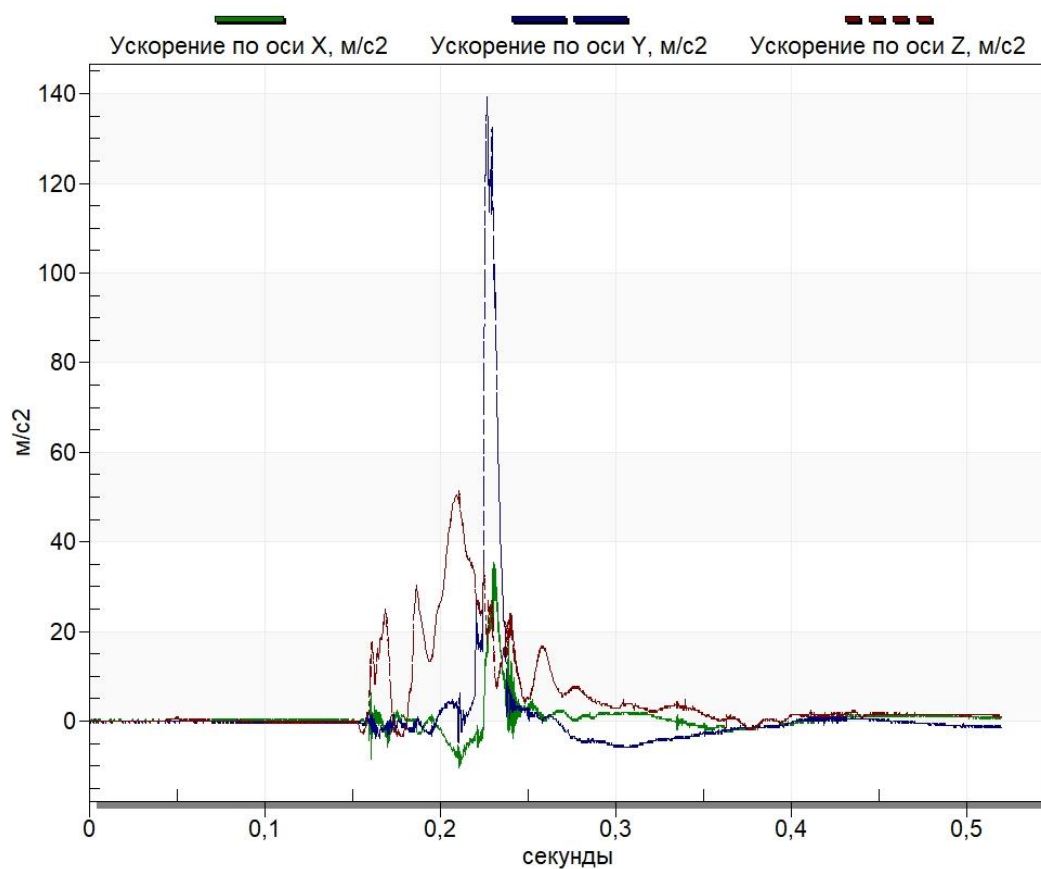


Рисунок Б.38 – Тест №5882, графики изменения ускорений на ЦТ головы АМ

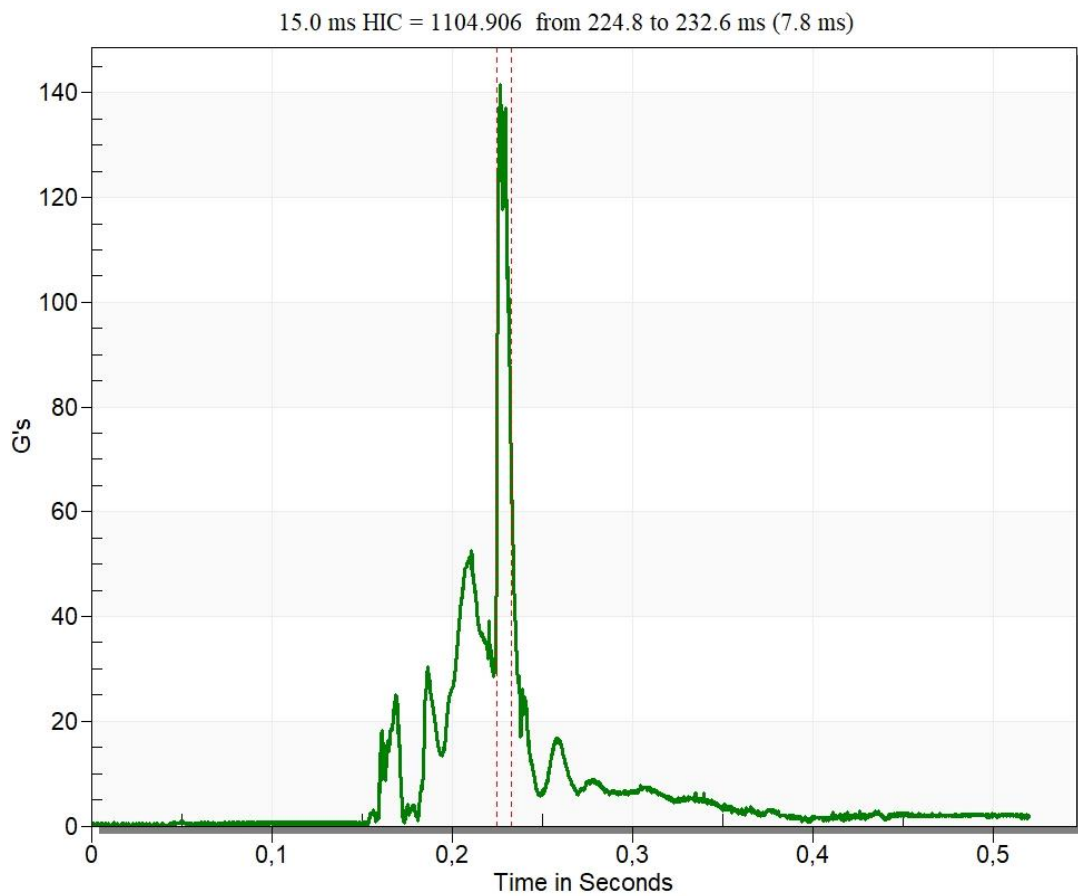


Рисунок Б.39 – Тест №5882, график пиковых величин расчета НИС

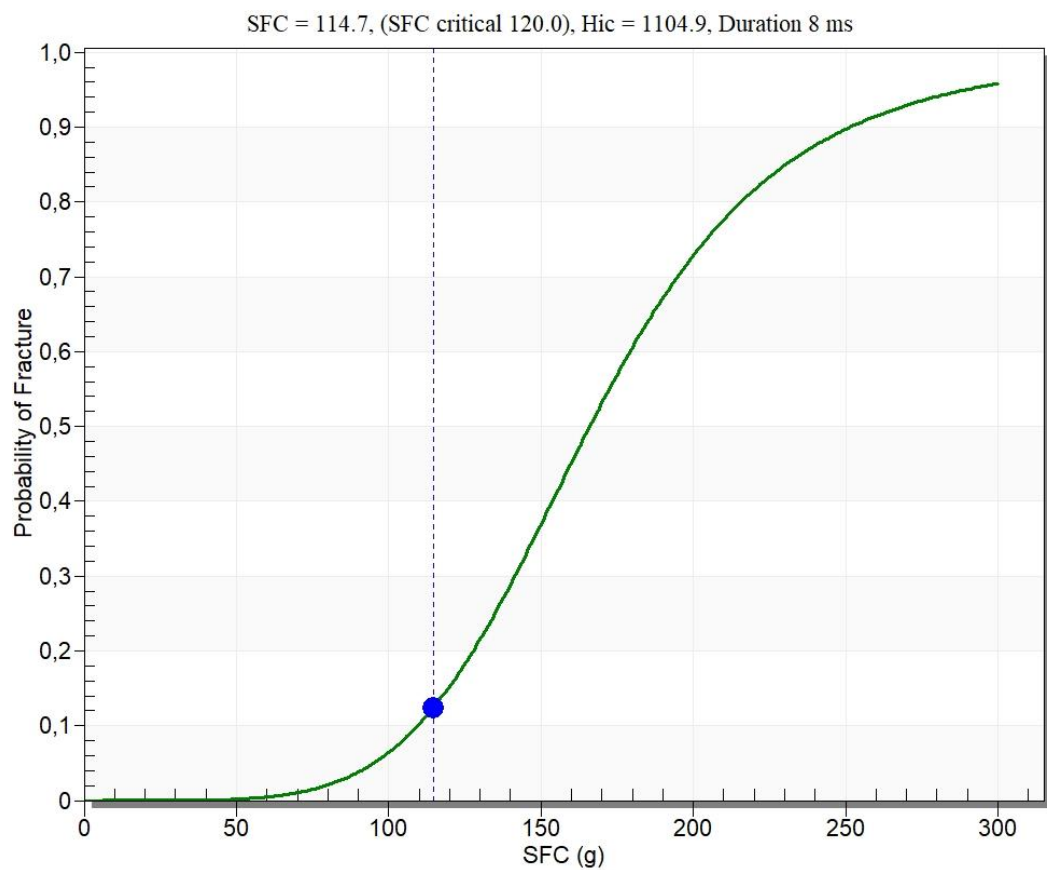


Рисунок Б.40 – Тест №5882, график вероятности травмы черепа

Общие данные по тестам с кадаврами

| №<br>п/п | номер<br>теста в<br>базе<br>NHTSA | Скорость<br>в момент<br>наезда,<br>км/ч | Угол<br>наезда,<br>град | Число<br>каналов<br>записи,<br>шт | Возраст<br>кадавра,<br>лет | Вес<br>кадавра,<br>кг | Пол<br>кадавра |
|----------|-----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------|
| 1        | 515                               | 39,59                                   | 90                      | 51                                | 71                         | 71                    | ж              |
| 2        | 584                               | 40,39                                   | 270                     | 50                                | 46                         | 60                    | м              |

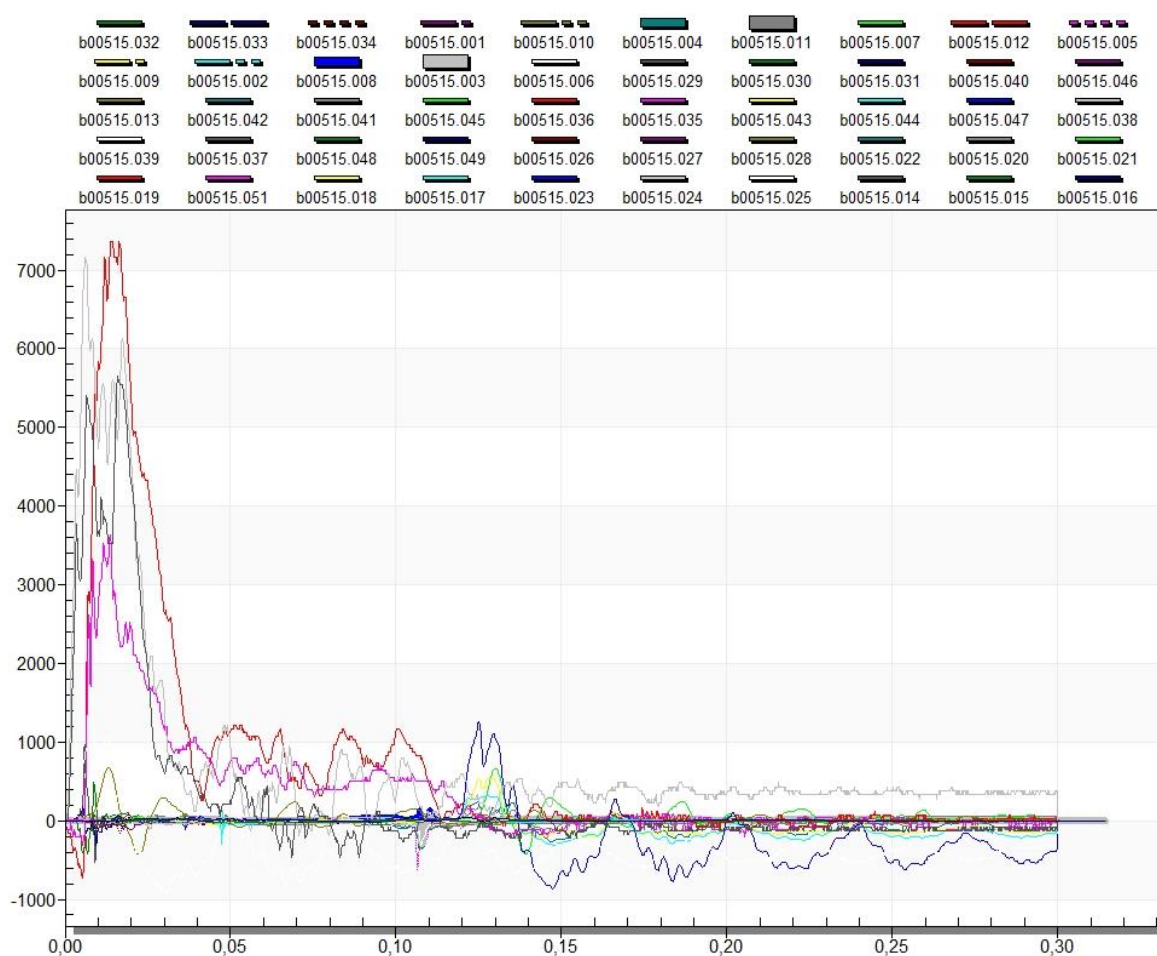


Рисунок Б.41 – Тест №515, отображение всех каналов записи

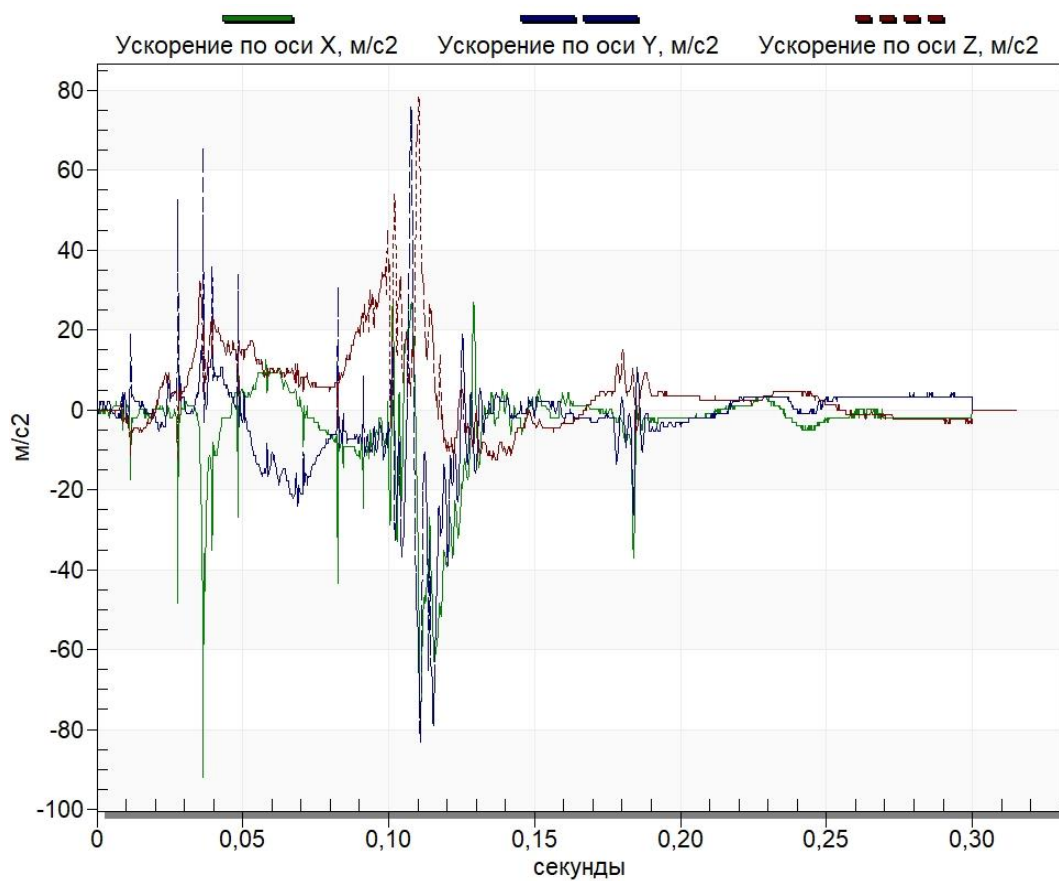


Рисунок Б.42 – Тест №515, графики изменения ускорений на ЦТ головы кадра

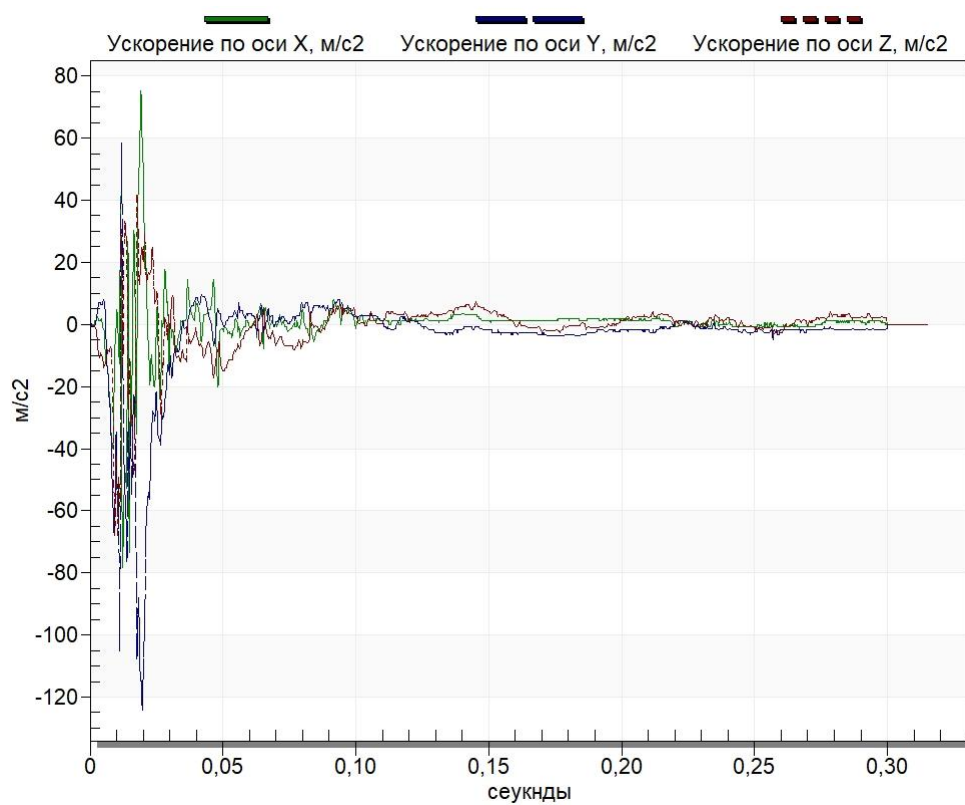


Рисунок Б.43 – Тест №515, графики изменения ускорений на ЦТ таза кадра

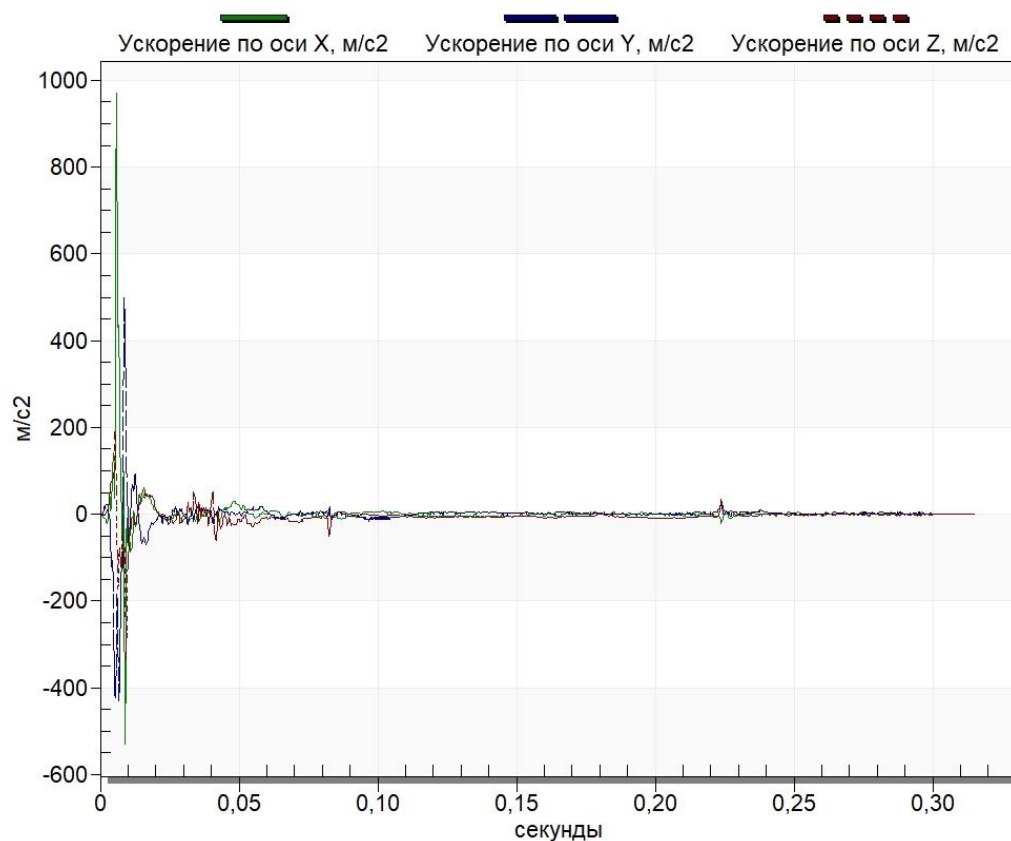


Рисунок Б.44 – Тест №515, графики изменения ускорений на ЦТ правого колена кадавра

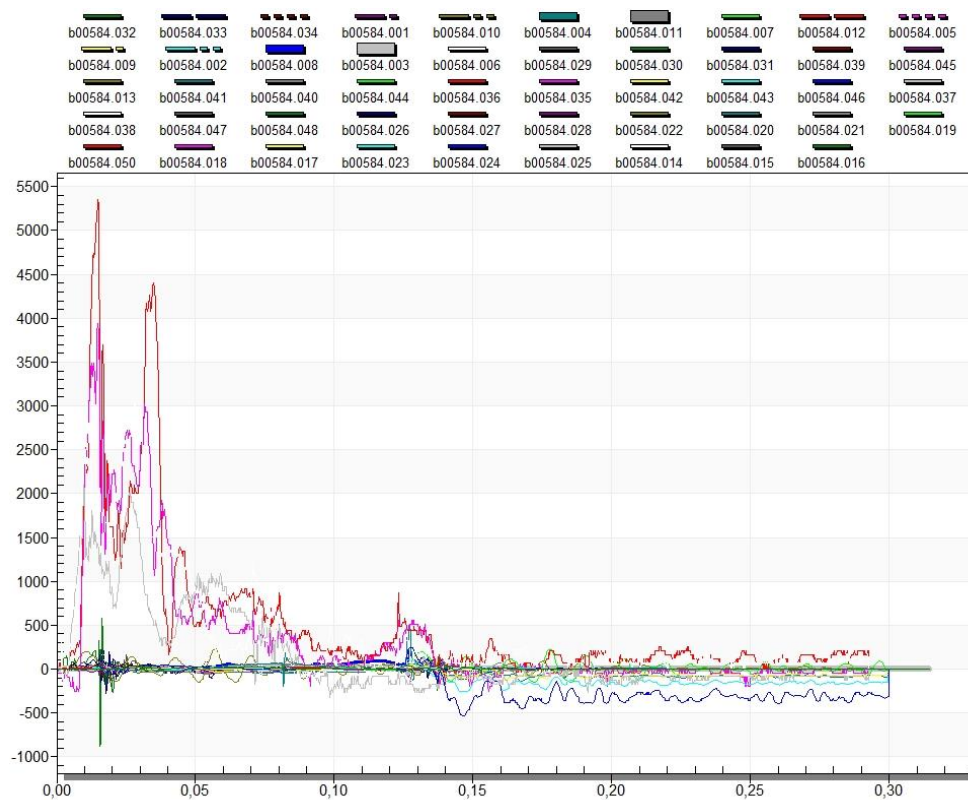


Рисунок Б.45 – Тест №584, отображение всех каналов записи

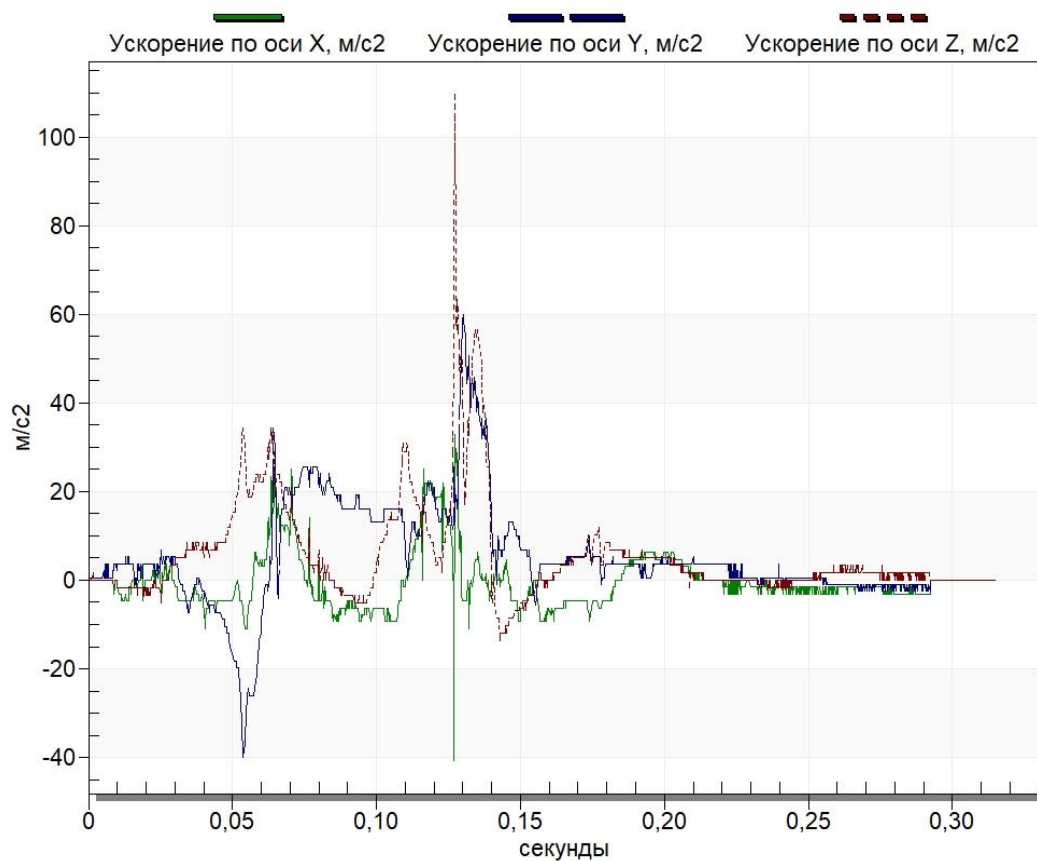


Рисунок Б.46 – Тест №584, графики изменения ускорений на ЦТ головы  
кадавра

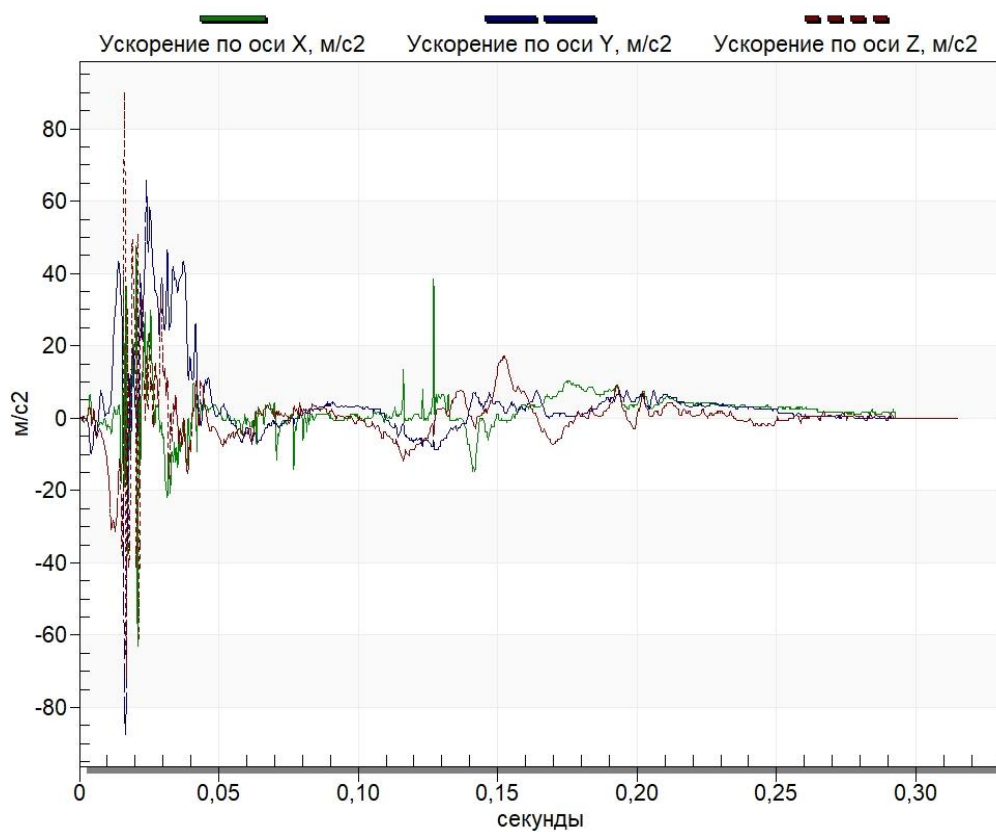


Рисунок Б.47 – Тест №584, графики изменения ускорений на ЦТ таза кадавра

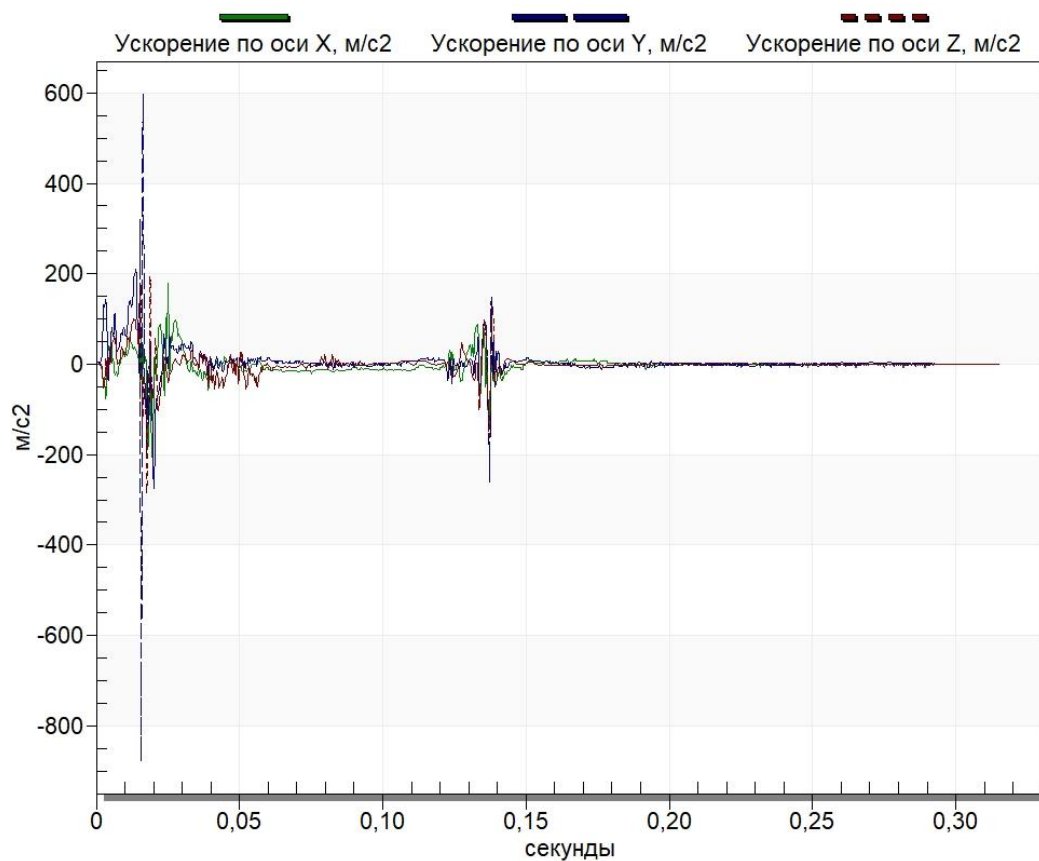


Рисунок Б.48 – Тест №584, графики изменения ускорений на ЦТ левого колена кадавра

## **ПРИЛОЖЕНИЕ В**

(Результаты верификации ГМАМ и виртуальных тестов по Главе 3)

## Графики сравнения результатов верификации ГМАМ

### В.1 Голова ГМАМ

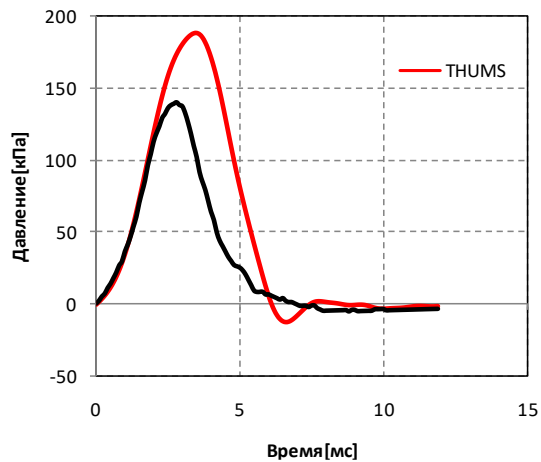


Рисунок В.1 – Результаты сравнения ГМАМ с моделью THUMS, давление на фронтальной части головы

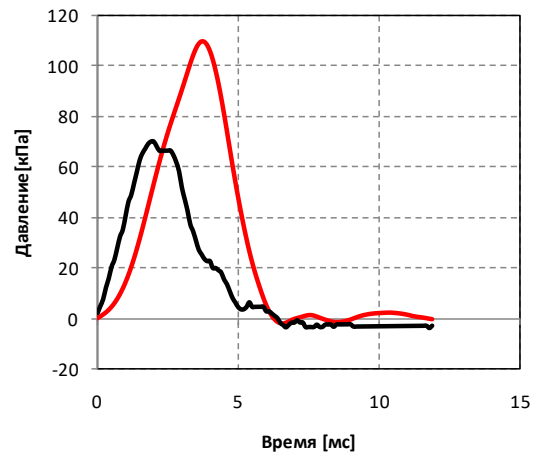


Рисунок В.2 – Результаты сравнения ГМАМ с моделью THUMS, давление на теменной части головы

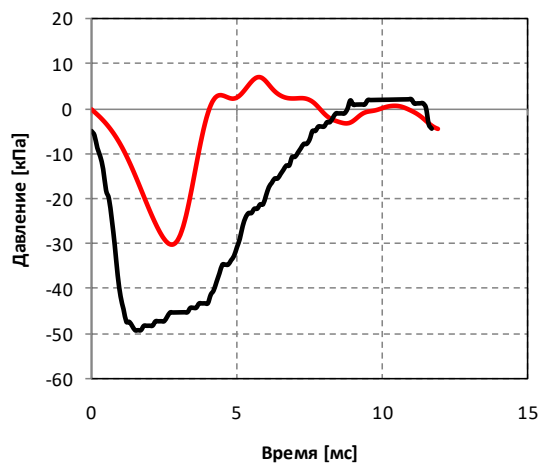


Рисунок В.3 – Результаты сравнения ГМАМ с моделью THUMS, давление на правой затылочной части головы

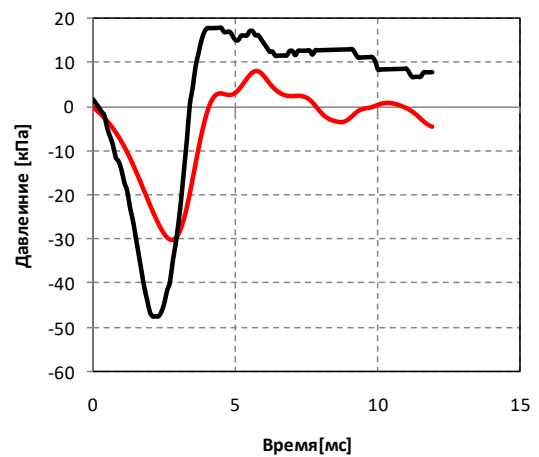


Рисунок В.4 – Результаты сравнения ГМАМ с моделью THUMS, давление на левой затылочной части головы

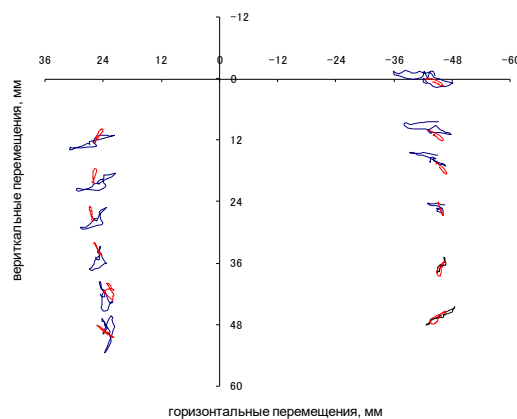


Рисунок В.4 – Результаты сравнения ГМАМ с моделью THUMS, траектории ЦТ головы

## В.2 Бедро ГМАМ

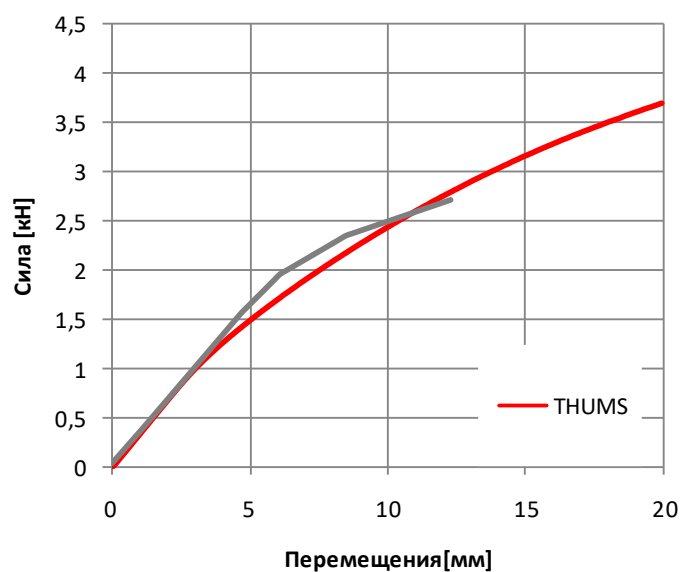


Рисунок В.6 – Результаты сравнения ГМАМ с моделью THUMS, зависимость перемещения бедра (внутреннего к контактной зоне)

## В.3 Колено ГМАМ (внутреннее к контактной зоне), боковой удар по коленному суставу (соединению)

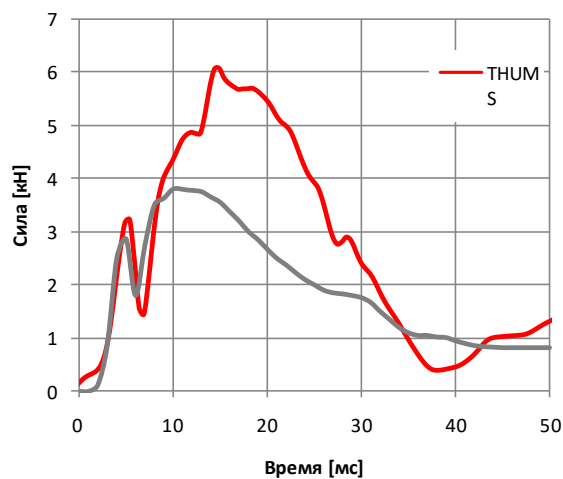


Рисунок В.7 – Результаты сравнения ГМАМ с моделью THUMS, зависимость силы на сдвиг от времени

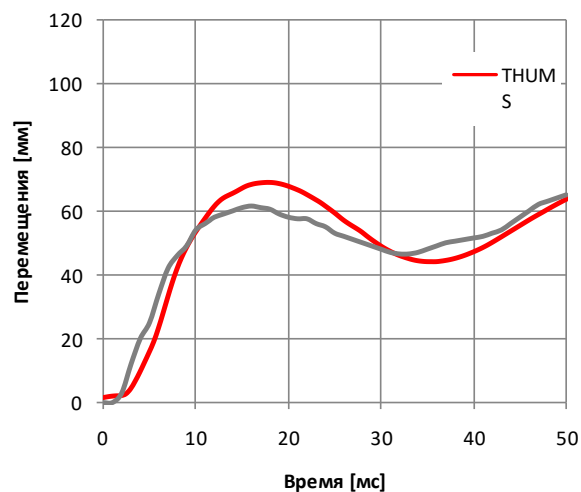


Рисунок В.8 – Результаты сравнения ГМАМ с моделью THUMS, зависимость перемещений от времени

#### В.4 Голень и стопа ГМАМ (внутреннее к контактной зоне)

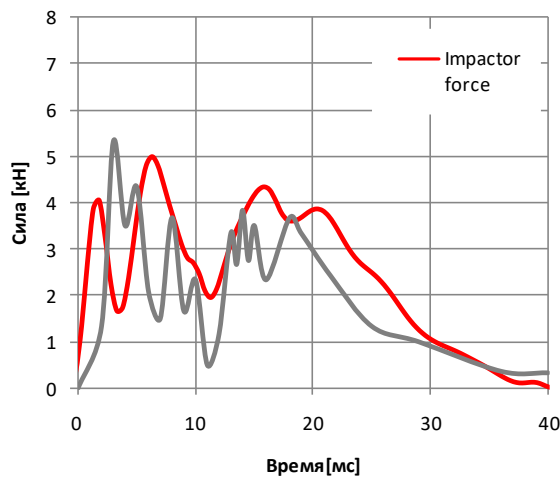


Рисунок В.9 - Результаты сравнения ГМАМ с моделью THUMS, зависимость силы на махе от времени

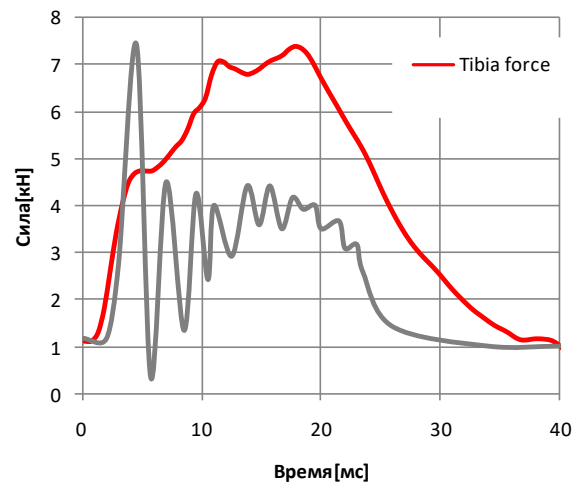


Рисунок В.10 - Результаты сравнения ГМАМ с моделью THUMS, зависимость силы на махе к колену от времени

#### В.5 Таз ГМАМ

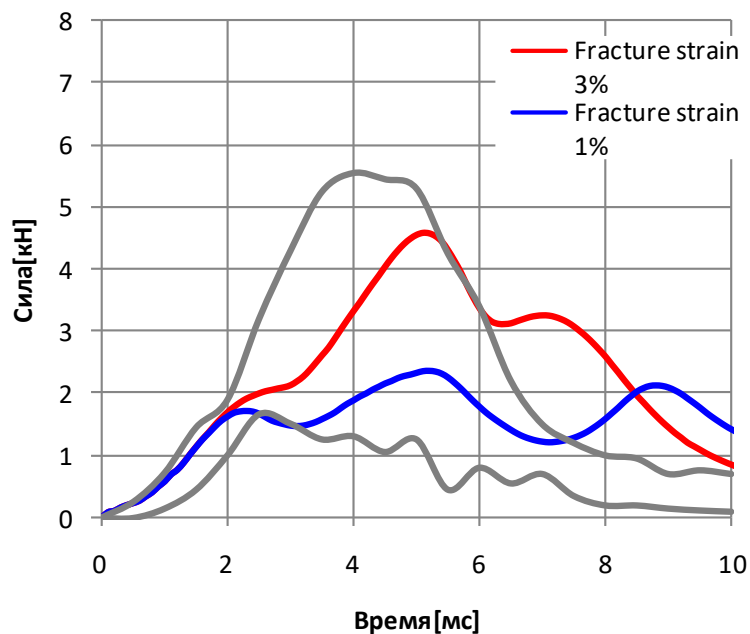


Рисунок В.10 - Результаты сравнения ГМАМ с моделью THUMS, зависимость силы от времени относительно данных по деформации разрушения в 1% и 3%

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г**

(Модели Matlab/Simulink и коды комплекса программ по Главам 1,3,4 и 5)

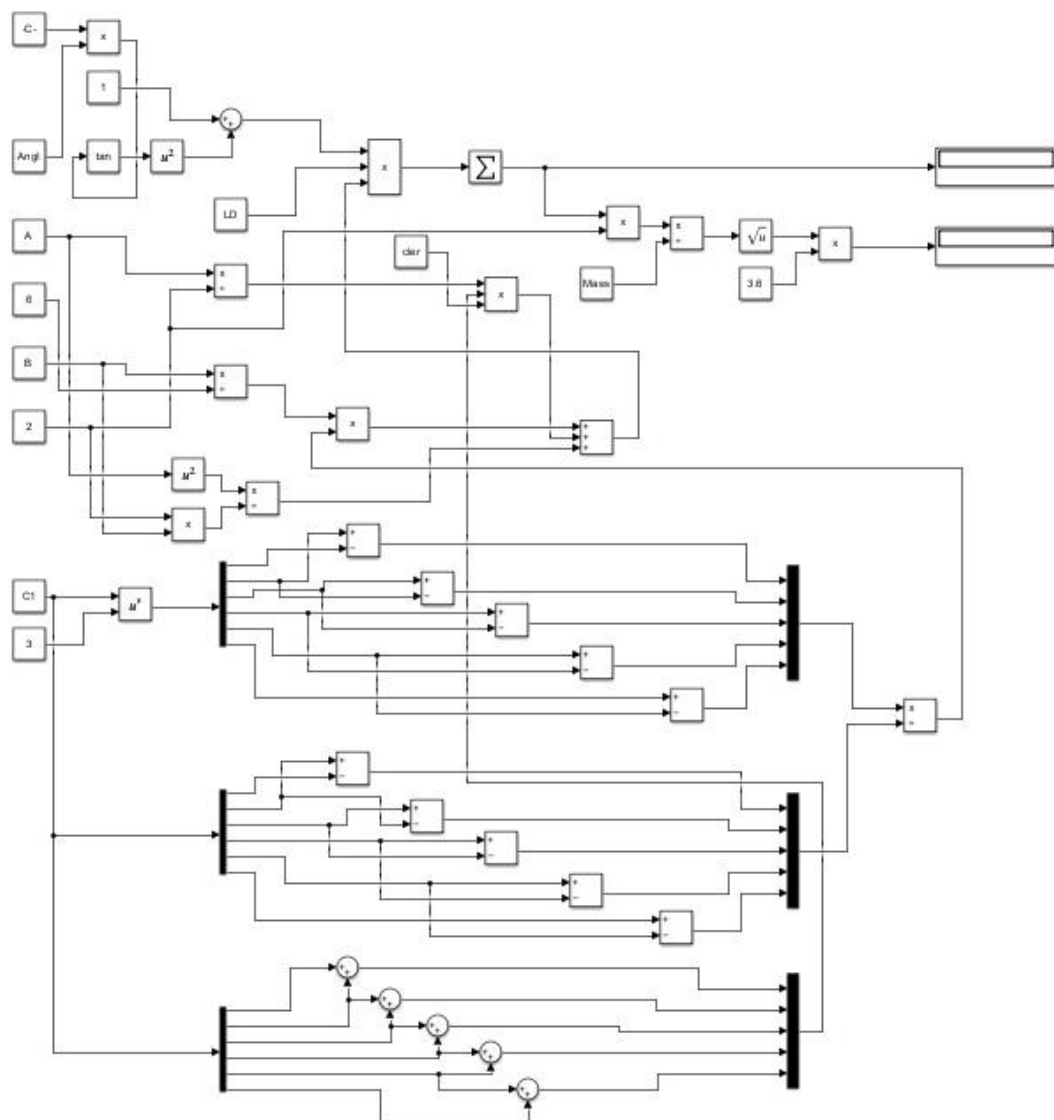


Рисунок Г.1 – Модель расчета скорости движения ТС с учетом деформаций по суррогатным КЭМ, схема в отображении библиотечных компонентов Matlab/Simulink

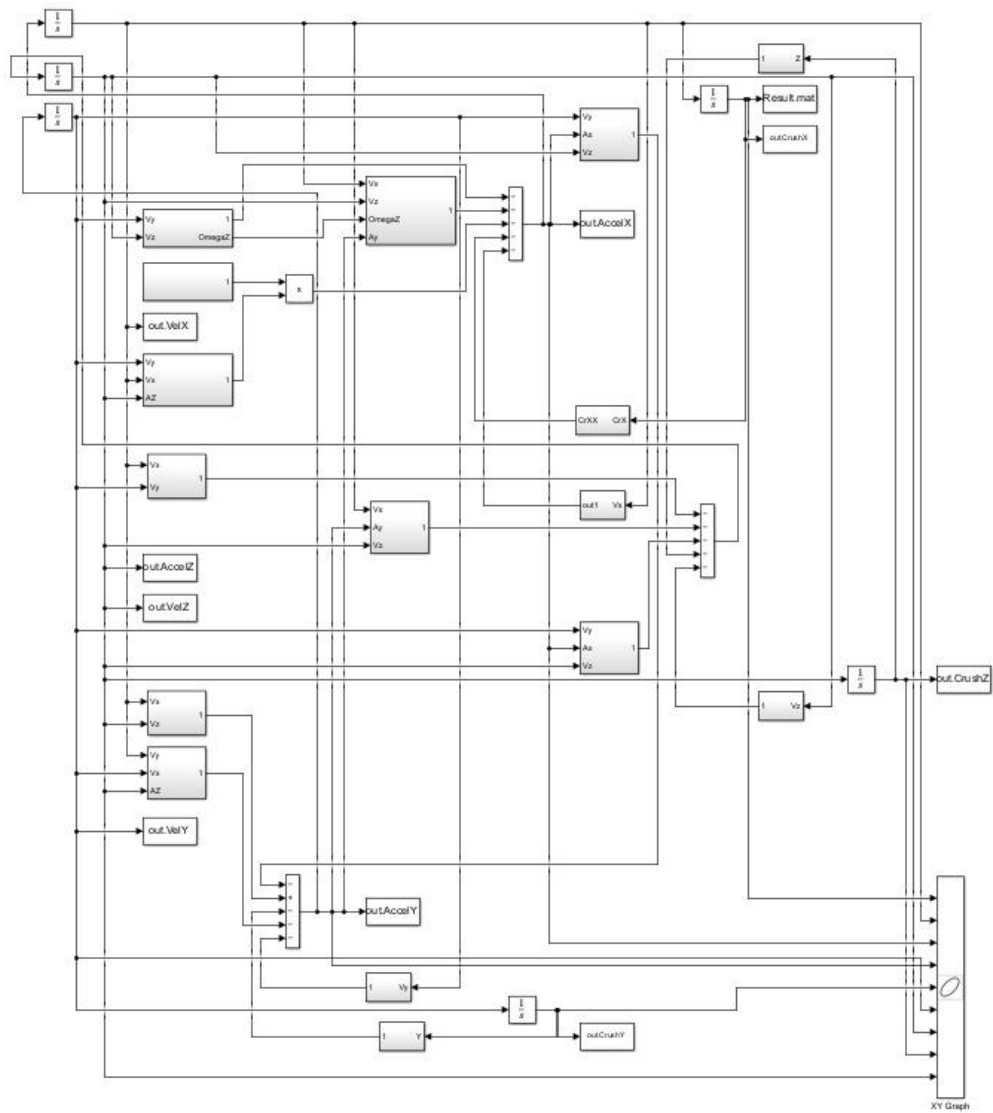


Рисунок Г.2 – Модель оптимизации КМ ДТП генетическим алгоритмом, схема в отображении библиотечных компонентов Matlab/Simulink

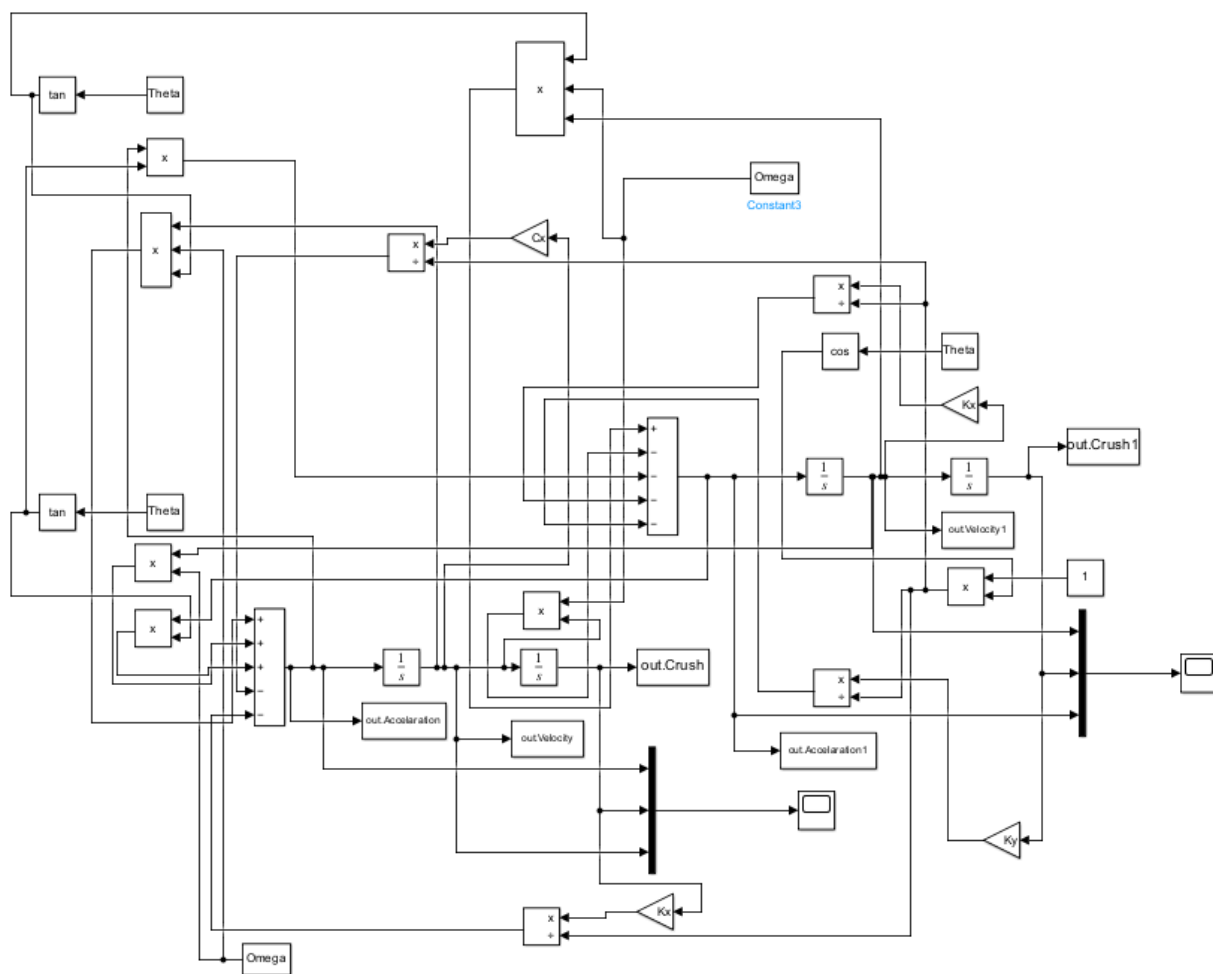


Рисунок Г.3 – Модель расчета риска травмирования, схема в отображении библиотечных компонентов Matlab/Simulink

## Приложение Г.1

### Код программы на Python, который реализует квазилинейную модель для слоев ДТЭ, ЭП ДТЭ и ОБДД, включая расчет целевых функций, условий экстремума и визуализацию результатов

Описание кода и порядок применения программы:

1. Функции критериев ( $F_{Di}$ ,  $F_{EPi}$ ,  $F_{Oi}$ ) реализуют квазилинейную форму по главе 1, раздел 1.7;
2. Целевые функции ( $target\_F\_D$ ,  $target\_F\_EP$ ,  $target\_F\_O$ ) строятся как произведения критериев в степенях, соответствующих приоритетам  $\alpha_i$ ;
3. Оптимизация: используется метод `scipy.optimize.minimize` для поиска максимума целевой функции (минимизируется её отрицательное значение).  
Учитываются ограничения: сумма переменных  $x_k=1$  и  $x_k \in [0,1]$ ;
4. Визуализация: результаты выводятся в виде 3D-графиков для первых трех переменных;
5. Примерные параметры: коэффициенты  $a_k^i$  и  $b_i$  (задаются из данных).  
Приоритеты  $\alpha_i$  взяты из таблицы 1.3;

Требования к запуску: Python не ниже версии 3.8, Jupyter notebooks, дополнительно требуется установить библиотеки:

```
pip install numpy scipy matplotlib
```

```
import numpy as np
from scipy.optimize import minimize
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D

# Определение функций критериев для каждого слоя
def F_Di(x, a, b, i):
    return (np.sum(a[i] * x) + b[i]) * (np.sum(a[i] * x) + b[i] > 0)

def F_EPi(x, a, b, i):
```

```

return (np.sum(a[i] * x) + b[i]) * (np.sum(a[i] * x) + b[i] > 0)

def F_Oi(x, a, b, i):
    return (np.sum(a[i] * x) + b[i]) * (np.sum(a[i] * x) + b[i] > 0)

# Целевые функции для каждого слоя
def target_F_D(x, a_D, b_D, alpha_D):
    F_D = [
        F_Di(x, a_D, b_D, 0)**alpha_D[0], # F_D1
        F_Di(x, a_D, b_D, 1)**alpha_D[1], # F_D2
        F_Di(x, a_D, b_D, 2)**alpha_D[1], # F_D3 (такой же приоритет, как
F_D2)
        F_Di(x, a_D, b_D, 3)**alpha_D[2], # F_D4
        F_Di(x, a_D, b_D, 4)**alpha_D[2], # F_D5
        F_Di(x, a_D, b_D, 5)**alpha_D[3], # F_D6
        F_Di(x, a_D, b_D, 6)**alpha_D[3], # F_D7
        F_Di(x, a_D, b_D, 7)**(1 - (alpha_D[0] + 2*alpha_D[1] + 2*alpha_D[2] +
2*alpha_D[3])) # F_D8
    ]
    return np.prod(F_D)

def target_F_EP(x, a_EP, b_EP, alpha_EP):
    F_EP = [
        F_EPi(x, a_EP, b_EP, 0)**alpha_EP[0], # F_EP1
        F_EPi(x, a_EP, b_EP, 1)**alpha_EP[1], # F_EP2
        F_EPi(x, a_EP, b_EP, 2)**alpha_EP[2], # F_EP3
        F_EPi(x, a_EP, b_EP, 3)**(1 - (alpha_EP[0] + alpha_EP[1] + alpha_EP[2]))
# F_EP4
    ]
    return np.prod(F_EP)

```

```
def target_F_O(x, a_O, b_O, alpha_O):
```

```
    F_O = [
        F_Oi(x, a_O, b_O, 0)**alpha_O[0], # F_O1
        F_Oi(x, a_O, b_O, 1)**alpha_O[1], # F_O2
        F_Oi(x, a_O, b_O, 2)**alpha_O[2], # F_O3
        F_Oi(x, a_O, b_O, 3)**(1 - (alpha_O[0] + alpha_O[1] + alpha_O[2])) #
F_O4
    ]
    return np.prod(F_O)
```

```
# Оптимизация целевых функций
```

```
def optimize_layer(x0, target_func, a, b, alpha, bounds):
```

```
    res = minimize(
        lambda x: -target_func(x, a, b, alpha), # Минимизируем отрицательную
целевую функцию
        x0,
        bounds=bounds,
        constraints={'type': 'eq', 'fun': lambda x: np.sum(x) - 1} # Сумма
переменных = 1
    )
    return res.x
```

```
# Визуализация результатов
```

```
def plot_results(optimal_x, layer_name):
```

```
    fig = plt.figure(figsize=(10, 6))
    ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
```

```
# Пример визуализации для первых трех переменных
```

```
ax.scatter(optimal_x[0], optimal_x[1], optimal_x[2], c='r', marker='o', s=100)
```

```

ax.set_xlabel('X1')
ax.set_ylabel('X2')
ax.set_zlabel('X3')
ax.set_title(f'Оптимальные параметры для слоя {layer_name}')
plt.show()

# Параметры модели (примерные значения)
n_vars = 5 # Количество переменных в каждом слое

# Коэффициенты для ДТЭ
a_D = np.random.rand(8, n_vars) # 8 критериев, n переменных
b_D = np.random.rand(8)
alpha_D = np.array([0.1, 0.15, 0.15, 0.2]) # Приоритеты (a_D1, a_D2, a_D3,
a_D4)

# Коэффициенты для ЭП ДТП
a_EP = np.random.rand(4, n_vars)
b_EP = np.random.rand(4)
alpha_EP = np.array([0.3, 0.2, 0.25]) # a_EP1, a_EP2, a_EP3

# Коэффициенты для ОБДД
a_O = np.random.rand(4, n_vars)
b_O = np.random.rand(4)
alpha_O = np.array([0.25, 0.25, 0.25]) # a_O1, a_O2, a_O3

# Границы переменных
bounds = [(0, 1) for _ in range(n_vars)]
x0 = np.ones(n_vars) / n_vars # Начальное приближение

# Оптимизация для каждого слоя

```

```
optimal_D = optimize_layer(x0, target_F_D, a_D, b_D, alpha_D, bounds)
optimal_EP = optimize_layer(x0, target_F_EP, a_EP, b_EP, alpha_EP, bounds)
optimal_O = optimize_layer(x0, target_F_O, a_O, b_O, alpha_O, bounds)
```

```
# Вывод результатов
```

```
print("Оптимальные параметры для слоя ДТЭ:", optimal_D)
print("Оптимальные параметры для слоя ЭП ДТП:", optimal_EP)
print("Оптимальные параметры для слоя ОБДД:", optimal_O)
```

```
# Визуализация
```

```
plot_results(optimal_D, "ДТЭ")
plot_results(optimal_EP, "ЭП ДТП")
plot_results(optimal_O, "ОБДД")
```

## Приложение Г.2

**Код программы на Python для параметризации геометрии факторной группы А при формировании суррогатов моделей, путем обработки xlsh таблицы массы/геометрии с применением иерархической кластеризации по методу Уорда**

Описание кода и порядок применения программы:

1. Подготовьте Excel-файл с данными автомобилей (с нужными столбцами, группа А, тип кузова и снаряженная масса);
2. Укажите путь к файлу в переменной `file_path`;
3. Задайте желаемое число кластеров в переменной `n_clusters`;
4. Запустите скрипт. Результаты (вывод таблиц со средними значениями параметров для каждого кластера, отображение размеров кластеров, круговые дендрограммы, графики центроидов с маркерами для каждого кластера) сохраняются в файл: `автомобили_с_(число)_кластеров.xlsx`.

Требования к запуску:

Python не ниже версии 3.8, Jupyter notebooks, дополнительно требуется установить библиотеки:

```
pip install pandas scikit-learn scipy matplotlib seaborn openpyxl tabulate
```

Код программы:

```
import pandas as pd
import numpy as np
from sklearn.preprocessing import StandardScaler, LabelEncoder
from scipy.cluster.hierarchy import dendrogram, linkage, fcluster
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
from tabulate import tabulate
```

```

def load_data(file_path):

    """Загрузка данных из Excel файла"""

    return pd.read_excel(file_path)


def preprocess_data(df):

    """Предварительная обработка данных"""

    # Копируем исходные данные для сохранения читаемых значений
    df_processed = df.copy()

    # Кодировем категориальную переменную (тип кузова)
    le = LabelEncoder()
    df_processed['Тип кузова_код'] = le.fit_transform(df_processed['Тип кузова'])

    # Выбираем нужные признаки для кластеризации
    features = [

        'Тип кузова_код',

        'Масса автомобиля',

        'Угол наклона бамперной касательной',

        'Угол наклона передней нижней доли капота',

        'Угол наклона задней доли капота',

        'Угол наклона ветрового стекла',

        'Высота центральной точки бампера',

        'Высота нижней точки бампера',

        'Длина продольной доли бампера',
    ]

```

```

'Передний свес',
'Длина бампера',
'Высота передней точки капота',
'Высота задней точки капота',
'Высота передней доли крыши'
]

```

```

# Удаляем строки с пропущенными значениями
df_processed = df_processed[features].dropna()

```

```

# Масштабируем данные
scaler = StandardScaler()
scaled_data = scaler.fit_transform(df_processed)

```

```

return scaled_data, df.loc[df_processed.index], scaler

```

```

def hierarchical_clustering(data, n_clusters=5):
    """Иерархическая кластеризация методом Уорда"""
    Z = linkage(data, method='ward')
    clusters = fcluster(Z, t=n_clusters, criterion='maxclust')
    return Z, clusters

```

```

def plot_circular_dendrogram(Z, labels, title):
    """Визуализация круговой дендрограммы"""
    plt.figure(figsize=(12, 12))

```

```
plt.title(title, size=16)
```

```
dendrogram(
    Z,
    labels=labels,
    orientation='left',
    leaf_rotation=90,
    leaf_font_size=8,
)
```

```
ax = plt.gca()
ax.set_theta_offset(np.pi / 2)
ax.set_theta_direction(-1)
ax.set_rlabel_position(0)
```

```
plt.tight_layout()
plt.show()
```

```
def analyze_clusters(df, clusters, n_clusters, feature_names):
    """Анализ центроидов кластеров и вывод статистики"""
    # Добавляем информацию о кластерах в DataFrame
    df_clustered = df.copy()
    df_clustered['Кластер'] = clusters

    # Группируем по кластерам и вычисляем средние значения
```

```

cluster_stats = df_clustered.groupby('Кластер')[feature_names].mean()

# Вычисляем размеры кластеров
cluster_sizes = df_clustered['Кластер'].value_counts().sort_index()

# Выводим статистику по кластерам
print("\nСтатистика по кластерам:")
print(tabulate(cluster_stats, headers='keys', tablefmt='pretty', showindex=True))

print("\nРазмеры кластеров:")
print(tabulate(cluster_sizes.reset_index().rename(columns={'index': 'Кластер',
'Кластер': 'Количество'}),
              headers='keys', tablefmt='pretty', showindex=False))

# Визуализация распределения по кластерам
plt.figure(figsize=(10, 6))
sns.countplot(x='Кластер', data=df_clustered)
plt.title(f'Распределение автомобилей по {n_clusters} кластерам')
plt.show()

# Визуализация центроидов
plt.figure(figsize=(12, 8))
for cluster_num in range(1, n_clusters + 1):
    cluster_data = cluster_stats.loc[cluster_num]
    plt.plot(cluster_data, label=f'Кластер {cluster_num}', marker='o')

```

```

plt.xticks(rotation=45, ha='right')
plt.title('Средние значения признаков по кластерам')
plt.xlabel('Признаки')
plt.ylabel('Стандартизированные значения')
plt.legend()
plt.grid()
plt.tight_layout()
plt.show()

return df_clustered, cluster_stats

def main():
    # Настройки

    file_path = 'автомобили.xlsx' # Укажите путь к вашему файлу
    n_clusters = 5 # Желаемое количество кластеров (можно изменить)

    # Загрузка и предварительная обработка данных
    data, df_original, scaler = preprocess_data(load_data(file_path))

    # Список признаков для анализа (без кодированного типа кузова)
    feature_names = [
        'Масса автомобиля',
        'Угол наклона бамперной касательной',
        'Угол наклона передней нижней доли капота',
        'Угол наклона задней доли капота',

```

```

'Угол наклона ветрового стекла',
'Высота центральной точки бампера',
'Высота нижней точки бампера',
'Длина продольной доли бампера',
'Передний свес',
'Длина бампера',
'Высота передней точки капота',
'Высота задней точки капота',
'Высота передней доли крыши'
]

```

```

# Кластеризация

```

```

Z, clusters = hierarchical_clustering(data, n_clusters)

```

```

# Получаем метки автомобилей

```

```

labels = [f"{row['Марка']} {row['Модель']}" for _, row in
df_original.iterrows()]

```

```

# Визуализация дендрограммы

```

```

plot_circular_dendrogram(Z, labels, f"Круговая дендрограмма ({n_clusters}
кластеров)")

```

```

# Анализ кластеров

```

```

df_clustered, cluster_stats = analyze_clusters(
    df_original[feature_names + ['Тип кузова', 'Марка', 'Модель']],
    clusters,

```

```
n_clusters,  
feature_names  
)  
  
# Сохранение результатов  
output_path = f'автомобили_с_{n_clusters}_кластерами.xlsx'  
df_clustered.to_excel(output_path, index=False)  
print(f"\nРезультаты сохранены в файл: {output_path}")  
  
if __name__ == "__main__":  
    main()
```

## Приложение Г.3

### Код программы на Python для формирования суррогатной КЭМ

Описание кода и порядок применения программы:

1. Загрузка облака точек: используется библиотека laspy для чтения LAS файла с данными лазерного сканирования, точки сохраняются в виде массива numpy;
2. Триангуляция поверхности: используется алгоритм Делоне для создания треугольной сетки, результат сохраняется в STEP файл с помощью PyVista;
3. Загрузка геометрии передней части: данные загружаются из Excel файла с помощью pandas;
4. Расчет диаграммы сила/прогиб: используется Matlab Engine для Python для запуска Simulink модели, результаты симуляции (сила и прогиб) сохраняются в DataFrame;
5. Загрузка данных жесткости: используется pyodbc для подключения к базе данных Access (.mdb), данные о жесткости загружаются в DataFrame.
6. Создание тепловой карты жесткости: данные жесткости интерполируются на регулярную сетку, создается визуализация тепловой карты с помощью matplotlib;
7. Назначение свойств жесткости: жесткость сопрягается с геометрией передней части, все данные модели сохраняются в JSON файл.

Требования к запуску: Matlab/Simulink в версии не ниже 2020b, файлы: stiffness\_db.mdb (база данных жесткости), проект PedCrash.slx (модель МОР в Simulink), scanKeyPo.las (облако точек лазерного сканирования), geomClust.xlsx (геометрия передней части после кластеризации, см. приложение В.2). Python не ниже версии 3.8, Jupyter notebooks, дополнительно требуется установить библиотеки:

```
pip install numpy pandas pyvista laspy matplotlib scipy pyodbc
matlab.engine
```

Код программы:

```
import numpy as np
import pandas as pd
import pyvista as pv
import laspy
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.spatial import Delaunay
from scipy.interpolate import griddata
import pyodbc
import matlab.engine
import os

class SurrogateCarModel:
    def __init__(self):
        self.points = None
        self.mesh = None
        self.front_geometry = None
        self.stiffness_data = None
        self.force_displacement = None
        self.stiffness_map = None

    def load_point_cloud(self, filename):
        """Загрузка облака точек из LAS файла"""
        print(f"Загрузка облака точек из {filename}...")
        las = laspy.read(filename)
        self.points = np.vstack((las.x, las.y, las.z)).T
        print(f"Загружено {len(self.points)} точек")

    def triangulate_surface(self):
```

```

"""Триангуляция поверхности из облака точек"""
print("Триангуляция поверхности...")
# Упрощение: используем 2D проекцию для триангуляции
xy_points = self.points[:, :2]
tri = Delaunay(xy_points)

# Создаем mesh из триангуляции
faces = np.hstack([np.full((tri.simplices.shape[0], 1), 3),
                    tri.simplices])
self.mesh = pv.PolyData(self.points, faces)

# Сохраняем в STEP файл
self.mesh.save("car_surface.step")
print("Триангуляция завершена, сохранено в car_surface.step")

def load_front_geometry(self, filename):
    """Загрузка геометрии передней части из Excel"""
    print(f"Загрузка геометрии передней части из {filename}...")
    self.front_geometry = pd.read_excel(filename)
    print("Геометрия передней части загружена")

def calculate_force_displacement(self, model_path):
    """Расчет диаграммы сила/прогиб из Matlab/Simulink модели"""
    print(f"Запуск расчета в Matlab/Simulink из {model_path}...")

    # Запуск Matlab engine
    eng = matlab.engine.start_matlab()

    # Загрузка и выполнение Simulink модели
    eng.eval(f"model = '{model_path.replace('.slx', '')}';", nargout=0)

```

```

eng.eval("load_system(model);", nargout=0)
eng.eval("simOut = sim(model);", nargout=0)

# Получение результатов
force = np.array(eng.workspace['simOut'].get('force').Data).flatten()
displacement =
np.array(eng.workspace['simOut'].get('displacement').Data).flatten()

self.force_displacement = pd.DataFrame({
    'displacement': displacement,
    'force': force
})

eng.quit()
print("Расчет сила/прогиб завершен")

def load_stiffness_data(self, db_path):
    """Загрузка данных по жесткости из базы данных Access"""
    print(f"Загрузка данных жесткости из {db_path}...")

    conn_str = (
        r'DRIVER={Microsoft Access Driver (*.mdb, *.accdb)};'
        r'DBQ=' + db_path + ';'
    )
    conn = pyodbc.connect(conn_str)

    query = "SELECT * FROM StiffnessData"
    self.stiffness_data = pd.read_sql(query, conn)

    conn.close()

```

```
print("Данные жесткости загружены")
```

```
def create_stiffness_map(self):
```

```
    """Создание тепловой карты жесткости"""
```

```
    print("Создание тепловой карты жесткости...")
```

```
    # Интерполяция данных жесткости на сетку
```

```
    grid_x, grid_y = np.mgrid[
        self.front_geometry['X'].min():self.front_geometry['X'].max():100j,
        self.front_geometry['Y'].min():self.front_geometry['Y'].max():100j
    ]
```

```
    points = self.stiffness_data[['X', 'Y']].values
```

```
    values = self.stiffness_data['Stiffness'].values
```

```
    grid_z = griddata(points, values, (grid_x, grid_y), method='cubic')
```

```
    # Визуализация тепловой карты
```

```
    plt.figure(figsize=(10, 8))
```

```
    plt.imshow(grid_z.T, extent=(
        self.front_geometry['X'].min(),
        self.front_geometry['X'].max(),
        self.front_geometry['Y'].min(),
        self.front_geometry['Y'].max()
    ), origin='lower')
```

```
    plt.colorbar(label='Жесткость (Н/мм)')
```

```
    plt.title("Тепловая карта жесткости передней части")
```

```
    plt.xlabel("X координата")
```

```
    plt.ylabel("Y координата")
```

```
    plt.savefig("stiffness_heatmap.png")
```

```
plt.close()
```

```
self.stiffness_map = grid_z
```

```
print("Тепловая карта жесткости создана и сохранена")
```

```
def assign_stiffness_properties(self):
```

```
    """Назначение свойств жесткости модели"""
```

```
    print("Назначение свойств жесткости модели...")
```

```
    # Сопряжение тепловой карты с геометрией передней части
```

```
    front_points = self.front_geometry[['X', 'Y']].values
```

```
    stiffness_values = griddata(
```

```
        (self.stiffness_data['X'], self.stiffness_data['Y']),
```

```
        self.stiffness_data['Stiffness'],
```

```
        (front_points[:, 0], front_points[:, 1]),
```

```
        method='nearest'
```

```
    )
```

```
    # Добавление жесткости к данным геометрии
```

```
    self.front_geometry['Stiffness'] = stiffness_values
```

```
    # Сохранение модели с назначенными свойствами
```

```
    model_data = {
```

```
        'points': self.points,
```

```
        'triangles': self.mesh.faces.reshape(-1, 4)[: , 1:4],
```

```
        'front_geometry': self.front_geometry.to_dict(),
```

```
        'stiffness_map': self.stiffness_map.tolist(),
```

```
        'force_displacement': self.force_displacement.to_dict()
```

```
    }
```

```

import json

with open('surrogate_model.json', 'w') as f:
    json.dump(model_data, f)

print("Модель с назначенными свойствами жесткости сохранена в
surrogate_model.json")

def run_full_pipeline(self):
    """Полный процесс построения модели"""
    self.load_point_cloud("scanKeyPo.las")
    self.triangulate_surface()
    self.load_front_geometry("geomClust.xlsx")
    self.calculate_force_displacement("PedCrash.slx")
    self.load_stiffness_data("stiffness_db.mdb")
    self.create_stiffness_map()
    self.assign_stiffness_properties()
    print("Процесс построения суррогатной модели завершен")

if __name__ == "__main__":
    # Проверка существования необходимых файлов
    required_files = {
        "scanKeyPo.las": "Файл облака точек лазерного сканирования",
        "geomClust.xlsx": "Файл геометрии передней части",
        "PedCrash.slx": "Simulink модель для расчета сила/прогиб",
        "stiffness_db.mdb": "База данных жесткости"
    }

    missing_files = [f for f in required_files if not os.path.exists(f)]

```

```
if missing_files:
    print("Ошибка: отсутствуют необходимые файлы:")
    for f in missing_files:
        print(f"- {f} ({required_files[f]})")
    print("Пожалуйста, убедитесь, что все файлы находятся в рабочей
директории.")
else:
    model_builder = SurrogateCarModel()
    model_builder.run_full_pipeline()
```

## Приложение Г.4

### Код программы на Python для методики расчета риска травмирования

Описание кода и порядок применения программы:

1. Функции расчета AIS: `calculate_ais_primary()` - расчет AIS для первичного травмирования по формуле (4.1), `calculate_ais_secondary()` - расчет AIS для вторичного травмирования по формуле (4.2);
2. Функция расчета вероятности: `calculate_injury_probability()` - расчет вероятности тяжелых последствий по формуле (4.3);
3. Пересчет AIS в НИС: `ais_to_hic()` - эмпирическая функция для пересчета AIS в НИС (может быть уточнена);
4. Проверка критических значений: `check_critical_values()` - проверка превышения критических значений AIS ( $\geq 3$ ) и НИС ( $> 1000$ );
5. Основная функция: `calculate_injury_risk()` - комплексный расчет всех показателей;
6. Пример использования демонстрирует работу функций с выводом результатов.

Требования к запуску: Python не ниже версии 3.8, Jupyter notebooks, дополнительно требуется установить библиотеки:

```
pip install numpy
```

Код программы:

```
import math
```

```
import numpy as np
```

```
def calculate_ais_primary(v):
```

```
    """
```

```
    Расчет индекса AIS при первичном травмировании
```

```
    :param v: скорость ТС в момент наезда (км/ч)
```

:return: значение AIS

"""

return 2.09651 \* math.exp(0.0154 \* v)

def calculate\_ais\_secondary(v):

"""

Расчет индекса AIS при вторичном травмировании

:param v: скорость ТС в момент наезда (км/ч)

:return: значение AIS

"""

return 1e-5 \* v\*\*3 - 0.0017 \* v\*\*2 + 0.0738 \* v + 1.6297

def calculate\_injury\_probability(va, vp, mp, rh):

"""

Расчет вероятности получения тяжкого вреда или летального исхода

:param va: скорость ТС в момент наезда (км/ч)

:param vp: скорость пешехода (км/ч)

:param mp: масса пешехода (кг)

:param rh: высотное соотношение (м)

:return: вероятность (в долях единицы)

"""

return -8.897 + 0.032 \* va + 0.013 \* vp + 0.027 \* mp + 5.798 \* rh

def ais\_to\_hic(ais):

"""

Пересчет из AIS в HIC (Head Injury Criterion)

На основе эмпирических данных и исследований

:param ais: значение AIS

:return: значение HIC

"""

```

# Эмпирическая зависимость (может потребовать уточнения)
if ais <= 1:
    return 100 + (ais - 1) * 100
elif ais <= 2:
    return 200 + (ais - 2) * 300
elif ais <= 3:
    return 500 + (ais - 3) * 500
elif ais <= 4:
    return 1000 + (ais - 4) * 1000
else:
    return 2000 + (ais - 5) * 2000

def check_critical_values(ais, hic):
    """
    Проверка превышения критических значений AIS и НИС
    :param ais: значение AIS
    :param hic: значение НИС
    :return: словарь с результатами проверки
    """
    # Критические значения (могут быть уточнены)
    ais_critical = 3 # AIS ≥ 3 считается тяжелой травмой
    hic_critical = 1000 # НИС > 1000 считается опасным

    result = {
        'ais_value': ais,
        'hic_value': hic,
        'ais_critical': ais_critical,
        'hic_critical': hic_critical,
        'ais_exceeded': ais >= ais_critical,
        'hic_exceeded': hic > hic_critical,
    }

```

```

    'ais_difference': ais - ais_critical,
    'hic_difference': hic - hic_critical
}

```

```

return result

```

```

def calculate_injury_risk(va, vp=None, mp=None, rh=None):

```

```

    """

```

```

    Комплексный расчет риска травмирования

```

```

    :param va: скорость ТС в момент наезда (км/ч)

```

```

    :param vp: скорость пешехода (км/ч, опционально)

```

```

    :param mp: масса пешехода (кг, опционально)

```

```

    :param rh: высотное соотношение (м, опционально)

```

```

    :return: словарь с результатами расчетов

```

```

    """

```

```

    # Расчет AIS для первичного и вторичного травмирования

```

```

    ais_primary = calculate_ais_primary(va)

```

```

    ais_secondary = calculate_ais_secondary(va)

```

```

    # Пересчет в HIC

```

```

    hic_primary = ais_to_hic(ais_primary)

```

```

    hic_secondary = ais_to_hic(ais_secondary)

```

```

    # Проверка критических значений

```

```

    primary_check = check_critical_values(ais_primary, hic_primary)

```

```

    secondary_check = check_critical_values(ais_secondary, hic_secondary)

```

```

    # Расчет вероятности тяжелых последствий (если есть все данные)

```

```

    probability = None

```

```

    if all([vp is not None, mp is not None, rh is not None]):

```

```

probability = calculate_injury_probability(va, vp, mp, rh)
# Ограничение вероятности в диапазоне [0, 1]
probability = max(0, min(1, probability))

return {
    'primary_impact': primary_check,
    'secondary_impact': secondary_check,
    'injury_probability': probability
}

# Пример использования
if __name__ == "__main__":
    # Входные параметры
    vehicle_speed = 60 # км/ч
    pedestrian_speed = 5 # км/ч
    pedestrian_mass = 70 # кг
    height_ratio = 0.5 # м

    # Расчет риска
    results = calculate_injury_risk(
        va=vehicle_speed,
        vp=pedestrian_speed,
        mp=pedestrian_mass,
        rh=height_ratio
    )

    # Вывод результатов
    print("Результаты расчета риска травмирования:")
    print(f"Скорость ТС: {vehicle_speed} км/ч")
    print(f"Скорость пешехода: {pedestrian_speed} км/ч")

```

```

print(f"Масса пешехода: {pedestrian_mass} кг")
print(f"Высотное соотношение: {height_ratio} м\n")

print("Первичное воздействие:")
print(f"AIS: {results['primary_impact']['ais_value']:.2f} (критическое:
{results['primary_impact']['ais_critical']})")
print(f"Превышение: {results['primary_impact']['ais_exceeded']}, разница:
{results['primary_impact']['ais_difference']:.2f}")
print(f"HIC: {results['primary_impact']['hic_value']:.0f} (критическое:
{results['primary_impact']['hic_critical']})")
print(f"Превышение: {results['primary_impact']['hic_exceeded']}, разница:
{results['primary_impact']['hic_difference']:.0f}\n")

print("Вторичное воздействие (падение):")
print(f"AIS: {results['secondary_impact']['ais_value']:.2f} (критическое:
{results['secondary_impact']['ais_critical']})")
print(f"Превышение: {results['secondary_impact']['ais_exceeded']}, разница:
{results['secondary_impact']['ais_difference']:.2f}")
print(f"HIC: {results['secondary_impact']['hic_value']:.0f} (критическое:
{results['secondary_impact']['hic_critical']})")
print(f"Превышение: {results['secondary_impact']['hic_exceeded']}, разница:
{results['secondary_impact']['hic_difference']:.0f}\n")

if results['injury_probability'] is not None:
    print(f"Вероятность тяжкого вреда или летального исхода:
{results['injury_probability']*100:.1f}%")

```

## Приложение Г.5

### Код программы на Python для методики оптимизации цифровой модели механизма ДТП выполненной при МОР генетическим алгоритмом

Описание кода и порядок применения программы:

1. Инициализация и загрузка данных: класс PedestrianCrashOptimizer загружает данные из Excel файла, параметры разделены на группы (A-F) согласно таблице 1.2;
2. Генетический алгоритм: используется библиотека DEAP для реализации генетического алгоритма, поддерживается параллельное выполнение оценок, включает кроссовер, мутацию и селекцию;
3. Метод Монте-Карло: случайный поиск в заданных границах параметров, сохранение истории для анимации;
4. Итерационный метод: координатный спуск с адаптивным шагом, поиск (расчет ЦМ) по каждому параметру по очереди;
5. Визуализация: тепловые карты корреляции параметров, параллельные координаты для многомерной визуализации, интерактивные графики с Plotly, анимация процесса оптимизации;
6. Интеграция с MATLAB/Simulink: используется MATLAB Engine API для Python, при этом модель PedCrash.slx вызывается с передачей параметров
7. Сравнение методов: отображается графическое сравнение сходимости методов, заложена возможность сохранения результатов в Excel.

Требования к запуску: наличие Matlab/Simulink в версии не ниже 2020b, файлы проекта PedCrash.slx. Python не ниже версии 3.8, Jupyter notebooks, дополнительно требуется установить библиотеки:

```
pip install numpy pandas matplotlib plotly seaborn deap imageio tqdm
```

Код программы:

```
import numpy as np
import pandas as pd
```

```

import matplotlib.pyplot as plt
import plotly.graph_objects as go
import plotly.express as px
from plotly.subplots import make_subplots
import seaborn as sns
import time
import os
from scipy.io import loadmat
import matlab.engine
from concurrent.futures import ProcessPoolExecutor
from functools import partial
from deap import base, creator, tools, algorithms
import random
import multiprocessing
from tqdm import tqdm
import imageio

# Инициализация MATLAB engine
eng = matlab.engine.start_matlab()
eng.addpath(os.path.dirname('PedCrash.slx'), nargout=0)

# Класс для управления оптимизацией
class PedestrianCrashOptimizer:
    def __init__(self, input_file):
        """
        Инициализация оптимизатора с загрузкой данных из Excel файла
        """
        self.load_data(input_file)
        self.setup_parameters()
        self.results = []

```

```

self.animation_frames = []

def load_data(self, input_file):
    """
    Загрузка входных данных из Excel файла
    """
    try:
        self.input_data = pd.read_excel(input_file, sheet_name=None)
        print("Данные успешно загружены из файла:", input_file)

        # Извлечение групп параметров
        self.group_A =
self.input_data['Group_A'].set_index('Parameter')['Value'].to_dict()
        self.group_B =
self.input_data['Group_B'].set_index('Parameter')['Value'].to_dict()
        self.group_C =
self.input_data['Group_C'].set_index('Parameter')['Value'].to_dict()
        self.group_D =
self.input_data['Group_D'].set_index('Parameter')['Value'].to_dict()
        self.group_E =
self.input_data['Group_E'].set_index('Parameter')['Value'].to_dict()
        self.group_F =
self.input_data['Group_F'].set_index('Parameter')['Value'].to_dict()

    except Exception as e:
        print(f"Ошибка при загрузке файла {input_file}: {str(e)}")
        raise

def setup_parameters(self):
    """

```

Настройка параметров оптимизации и границ переменных

"""

# Определение границ для оптимизируемых параметров

```
self.bounds = {
    'A1': (0, 45), # Угол наклона бамперной касательной (град)
    'A2': (0, 45), # Угол наклона передней нижней доли капота
    'A5': (300, 600), # Высота центральной точки бампера (мм)
    'B1': (50, 120), # Масса пешехода (кг)
    'B2': (1500, 2000), # Рост пешехода (мм)
    'C1': (10, 90), # Скорость ТС в момент начала КСВ (км/ч)
    'C2': (1, 10), # Скорость пешехода (км/ч)
    'D1': (-10, 10), # Уклон продольный (%)
    'D3': (0.3, 0.9), # Коэффициент трения покрытия
    'F1': (0.5, 2.5), # Время реакции водителя (с)
    'F9': (30, 120) # Скорость движения ТС (км/ч)
}
```

# Целевая функция - минимизация травматизма (0-1, где 0 - нет травм, 1 - смерть)

```
self.objective = 'minimize'
```

# Параметры алгоритмов

```
self.ga_params = {
    'population_size': 50,
    'generations': 30,
    'cx_prob': 0.7,
    'mut_prob': 0.2,
    'tournament_size': 3
}
```

```
self.mc_params = {
    'iterations': 1000
}
```

```
self.iterative_params = {
    'iterations': 100,
    'step_size': 0.1
}
```

```
def evaluate_model(self, individual):
```

```
    """
```

```
    Запуск модели Simulink с заданными параметрами и оценка результата
```

```
    """
```

```
    try:
```

```
        # Преобразование индивида в словарь параметров
```

```
        params = self.individual_to_params(individual)
```

```
        # Подготовка входных параметров для MATLAB
```

```
        matlab_params = {
```

```
            'A1': matlab.double([params['A1']]),
```

```
            'A2': matlab.double([params['A2']]),
```

```
            'A5': matlab.double([params['A5']]),
```

```
            'B1': matlab.double([params['B1']]),
```

```
            'B2': matlab.double([params['B2']]),
```

```
            'C1': matlab.double([params['C1']]),
```

```
            'C2': matlab.double([params['C2']]),
```

```
            'D1': matlab.double([params['D1']]),
```

```
            'D3': matlab.double([params['D3']]),
```

```
            'F1': matlab.double([params['F1']]),
```

```
            'F9': matlab.double([params['F9']])
```

```

    }

    # Запуск модели Simulink
    result = eng.PedCrash(matlab_params, nargout=1)

    # Оценка результата (пример - чем меньше, тем лучше)
    # В реальности нужно использовать выходные данные модели
    fitness = float(result[0]) # Предполагаем, что модель возвращает
оценку травматизма

    return fitness,

except Exception as e:
    print(f'Ошибка при оценке индивида: {str(e)}')
    return float('inf'),

def individual_to_params(self, individual):
    """
    Преобразование индивида (список значений) в словарь параметров
    """
    keys = list(self.bounds.keys())
    return {keys[i]: individual[i] for i in range(len(individual))}

def params_to_individual(self, params):
    """
    Преобразование словаря параметров в индивида (список значений)
    """
    keys = list(self.bounds.keys())
    return [params[key] for key in keys]

```

```

def run_ga_optimization(self):
    """
    Запуск генетической оптимизации
    """
    print("\nЗапуск генетической оптимизации...")

    # Создание типов для генетического алгоритма
    creator.create("FitnessMin", base.Fitness, weights=(-1.0,))
    creator.create("Individual", list, fitness=creator.FitnessMin)

    # Инициализация инструментов
    toolbox = base.Toolbox()

    # Регистрация функций
    bounds_list = list(self.bounds.values())
    toolbox.register("attr_float", random.uniform, bounds_list[0][0],
bounds_list[0][1])
    toolbox.register("individual", tools.initRepeat, creator.Individual,
        toolbox.attr_float, n=len(self.bounds))
    toolbox.register("population", tools.initRepeat, list, toolbox.individual)

    toolbox.register("evaluate", self.evaluate_model)
    toolbox.register("mate", tools.cxBlend, alpha=0.5)
    toolbox.register("mutate", tools.mutGaussian, mu=0, sigma=1, indpb=0.2)
    toolbox.register("select", tools.selTournament,
tournsize=self.ga_params['tournsize'])

    # Параллелизация
    pool = multiprocessing.Pool()
    toolbox.register("map", pool.map)

```

```

# Создание начальной популяции
pop = toolbox.population(n=self.ga_params['population_size'])

# Статистика и журналирование
stats = tools.Statistics(lambda ind: ind.fitness.values)
stats.register("avg", np.mean)
stats.register("min", np.min)
stats.register("max", np.max)

# Запуск алгоритма
start_time = time.time()

pop, logbook = algorithms.eaSimple(
    pop, toolbox,
    cxpb=self.ga_params['cx_prob'],
    mutpb=self.ga_params['mut_prob'],
    ngen=self.ga_params['generations'],
    stats=stats,
    verbose=True
)

elapsed_time = time.time() - start_time
print(f"Генетическая оптимизация завершена за {elapsed_time:.2f}
секунд")

# Сохранение результатов
best_ind = tools.selBest(pop, k=1)[0]
best_params = self.individual_to_params(best_ind)
best_fitness = best_ind.fitness.values[0]

```

```

ga_result = {
    'method': 'Genetic Algorithm',
    'best_params': best_params,
    'best_fitness': best_fitness,
    'logbook': logbook,
    'time': elapsed_time
}

```

```

self.results.append(ga_result)
pool.close()

```

```

return ga_result

```

```

def run_monte_carlo_optimization(self):

```

```

    """

```

```

    Запуск оптимизации методом Монте-Карло

```

```

    """

```

```

    print("\nЗапуск оптимизации методом Монте-Карло...")

```

```

    best_fitness = float('inf')

```

```

    best_params = None

```

```

    fitness_history = []

```

```

    param_history = []

```

```

    start_time = time.time()

```

```

    for i in tqdm(range(self.mc_params['iterations'])):

```

```

        # Генерация случайных параметров в заданных границах

```

```

        params = {}

```

```

for param, (lower, upper) in self.bounds.items():
    params[param] = random.uniform(lower, upper)

# Оценка
fitness = self.evaluate_model(self.params_to_individual(params))[0]

# Обновление лучшего результата
if fitness < best_fitness:
    best_fitness = fitness
    best_params = params

# Сохранение истории
fitness_history.append(fitness)
param_history.append(params)

# Сохранение кадра для анимации (каждые 10 итераций)
if i % 10 == 0:
    self.save_mc_frame(param_history, fitness_history, i)

elapsed_time = time.time() - start_time
print(f'Оптимизация методом Монте-Карло завершена за
{elapsed_time:.2f} секунд')

mc_result = {
    'method': 'Monte Carlo',
    'best_params': best_params,
    'best_fitness': best_fitness,
    'fitness_history': fitness_history,
    'param_history': param_history,
    'time': elapsed_time

```

```
}
```

```
self.results.append(mc_result)
```

```
# Создание анимации
```

```
self.create_optimization_animation('monte_carlo_animation.gif')
```

```
return mc_result
```

```
def run_iterative_optimization(self):
```

```
    """
```

```
    Запуск итерационной оптимизации (по координатному спуску)
```

```
    """
```

```
    print("\nЗапуск итерационной оптимизации...")
```

```
    # Начальная точка - средние значения границ
```

```
    current_params = {}
```

```
    for param, (lower, upper) in self.bounds.items():
```

```
        current_params[param] = (lower + upper) / 2
```

```
    best_fitness =
```

```
self.evaluate_model(self.params_to_individual(current_params))[0]
```

```
    best_params = current_params.copy()
```

```
    fitness_history = [best_fitness]
```

```
    param_history = [current_params.copy()]
```

```
    start_time = time.time()
```

```
    for iteration in tqdm(range(self.iterative_params['iterations'])):
```

```
        improved = False
```

```

# Перебираем все параметры
for param in self.bounds.keys():
    # Пробуем увеличить параметр
    new_params = current_params.copy()
    new_params[param] = min(
        current_params[param] + self.iterative_params['step_size'] *
        (self.bounds[param][1] - self.bounds[param][0]),
        self.bounds[param][1]
    )

    new_fitness =
self.evaluate_model(self.params_to_individual(new_params))[0]

if new_fitness < best_fitness:
    best_fitness = new_fitness
    best_params = new_params.copy()
    current_params = new_params.copy()
    improved = True
    break

# Пробуем уменьшить параметр
new_params = current_params.copy()
new_params[param] = max(
    current_params[param] - self.iterative_params['step_size'] *
    (self.bounds[param][1] - self.bounds[param][0]),
    self.bounds[param][0]
)

```

```

new_fitness =
self.evaluate_model(self.params_to_individual(new_params))[0]

if new_fitness < best_fitness:
    best_fitness = new_fitness
    best_params = new_params.copy()
    current_params = new_params.copy()
    improved = True
    break

# Если улучшений нет, уменьшаем шаг
if not improved:
    self.iterative_params['step_size'] *= 0.9

# Сохранение истории
fitness_history.append(best_fitness)
param_history.append(current_params.copy())

# Сохранение кадра для анимации (каждые 5 итераций)
if iteration % 5 == 0:
    self.save_iterative_frame(param_history, fitness_history, iteration)

elapsed_time = time.time() - start_time
print(f"Итерационная оптимизация завершена за {elapsed_time:.2f}
секунд")

iterative_result = {
    'method': 'Iterative',
    'best_params': best_params,
    'best_fitness': best_fitness,

```

```

        'fitness_history': fitness_history,
        'param_history': param_history,
        'time': elapsed_time
    }

    self.results.append(iterative_result)

    # Создание анимации
    self.create_optimization_animation('iterative_animation.gif')

    return iterative_result

def save_mc_frame(self, param_history, fitness_history, iteration):
    """
    Сохранение кадра для анимации Монте-Карло
    """
    fig = self.create_parallel_coordinates_plot(param_history, fitness_history)
    fig.write_image(f"frames/mc_frame_{iteration:04d}.png")
    plt.close()

def save_iterative_frame(self, param_history, fitness_history, iteration):
    """
    Сохранение кадра для анимации итерационного метода
    """
    fig = self.create_parallel_coordinates_plot(param_history, fitness_history)
    fig.write_image(f"frames/iter_frame_{iteration:04d}.png")
    plt.close()

def create_optimization_animation(self, filename):
    """

```

Создание анимации из сохраненных кадров

```
"""
```

```
frames = []
```

```
frame_files = sorted([f for f in os.listdir('frames') if f.startswith('mc_') or
f.startswith('iter_')])
```

```
for frame_file in frame_files:
```

```
    frames.append(imageio.imread(f'frames/{frame_file}'))
```

```
imageio.mimsave(filename, frames, fps=5)
```

```
print(f'Анимация сохранена как {filename}')
```

```
def create_parallel_coordinates_plot(self, param_history, fitness_history):
```

```
    """
```

Создание параллельных координат для визуализации параметров

```
    """
```

```
# Подготовка данных
```

```
df = pd.DataFrame(param_history)
```

```
df['Fitness'] = fitness_history
```

```
# Нормализация данных для параллельных координат
```

```
normalized_df = df.copy()
```

```
for param in self.bounds.keys():
```

```
    lower, upper = self.bounds[param]
```

```
    normalized_df[param] = (df[param] - lower) / (upper - lower)
```

```
# Создание фигуры
```

```
fig = px.parallel_coordinates(
```

```
    normalized_df,
```

```
    color="Fitness",
```

```

dimensions=list(self.bounds.keys()) + ['Fitness'],
color_continuous_scale=px.colors.diverging.Tealrose,
labels={param: param for param in self.bounds.keys()}
)

```

```

fig.update_layout(
    title="Параметры оптимизации",
    width=1200,
    height=600
)

```

```

return fig

```

```

def create_heatmap(self, style='seaborn'):
    """
    Создание тепловой карты корреляции параметров
    """
    if not self.results:
        print("Нет результатов для визуализации")
        return

    # Сбор всех параметров из всех методов
    all_params = []
    for result in self.results:
        if 'param_history' in result:
            all_params.extend(result['param_history'])
        else:
            all_params.append(result['best_params'])

    df = pd.DataFrame(all_params)

```

```

# Вычисление корреляционной матрицы
corr = df.corr()

# Создание тепловой карты
plt.figure(figsize=(12, 10))

if style == 'seaborn':
    sns.set(style="white")
    sns.heatmap(corr, annot=True, fmt=".2f", cmap='coolwarm',
                center=0, square=True, linewidths=.5)
elif style == 'plotly':
    fig = px.imshow(corr, text_auto=True, aspect="auto",
                    color_continuous_scale='RdBu', zmin=-1, zmax=1)
    fig.update_layout(title="Тепловая карта корреляции параметров")
    fig.show()
    return
else:
    plt.matshow(corr, cmap='coolwarm')
    plt.colorbar()
    plt.xticks(range(len(corr.columns)), corr.columns, rotation=90)
    plt.yticks(range(len(corr.columns)), corr.columns)

plt.title("Тепловая карта корреляции параметров")
plt.tight_layout()
plt.show()

def compare_results(self):
    """
    Сравнение результатов разных методов оптимизации

```

```
"""
```

```
if len(self.results) < 2:
```

```
    print("Недостаточно результатов для сравнения")
```

```
    return
```

```
# Создание сравнительного графика
```

```
fig = go.Figure()
```

```
for result in self.results:
```

```
    if 'fitness_history' in result:
```

```
        # Для методов с историей (Монте-Карло, итерационный)
```

```
        fig.add_trace(go.Scatter(
```

```
            y=result['fitness_history'],
```

```
            mode='lines',
```

```
            name=f"{result['method']} (best: {result['best_fitness']:.4f})"
```

```
        ))
```

```
    elif 'logbook' in result:
```

```
        # Для генетического алгоритма
```

```
        gen = [entry['gen'] for entry in result['logbook']]
```

```
        min_fitness = [entry['min'] for entry in result['logbook']]
```

```
        fig.add_trace(go.Scatter(
```

```
            x=gen,
```

```
            y=min_fitness,
```

```
            mode='lines',
```

```
            name=f"{result['method']} (best: {result['best_fitness']:.4f})"
```

```
        ))
```

```
fig.update_layout(
```

```
    title="Сравнение методов оптимизации",
```

```
    xaxis_title="Итерация / Поколение",
```

```

yaxis_title="Значение целевой функции",
legend_title="Метод",
width=1000,
height=600
)

```

```
fig.show()
```

```

def save_results(self, filename='optimization_results.xlsx'):
    """
    Сохранение результатов оптимизации в Excel файл
    """
    with pd.ExcelWriter(filename) as writer:
        for result in self.results:
            df = pd.DataFrame.from_dict(result['best_params'], orient='index',
columns=['Value'])
            df.to_excel(writer, sheet_name=result['method'])

    # Сохранение истории для методов, где она есть
    for result in self.results:
        if 'param_history' in result:
            history_df = pd.DataFrame(result['param_history'])
            history_df['Fitness'] = result['fitness_history']
            history_df.to_excel(writer, sheet_name=f"{result['method']}_history")

    # Сохранение логов генетического алгоритма
    for result in self.results:
        if 'logbook' in result:
            log_df = pd.DataFrame(result['logbook'])
            log_df.to_excel(writer, sheet_name=f"{result['method']}_log")

```

```

print(f'Результаты сохранены в файл {filename}')

# Основная функция
def main():
    # Создание папки для кадров анимации
    os.makedirs('frames', exist_ok=True)

    # Инициализация оптимизатора
    optimizer = PedestrianCrashOptimizer('input_parameters.xlsx')

    # Запуск оптимизаций
    ga_result = optimizer.run_ga_optimization()
    mc_result = optimizer.run_monte_carlo_optimization()
    iterative_result = optimizer.run_iterative_optimization()

    # Визуализация результатов
    optimizer.create_heatmap(style='seaborn')
    optimizer.compare_results()

    # Сохранение результатов
    optimizer.save_results()

    # Закрытие MATLAB engine
    eng.quit()

if __name__ == "__main__":
    main()

```

## Приложение Г.6

### Код программы на Python для оптимизации генетическим продольных и поперечных сечений кузова автомобиля по минимальным величинами индексов травмирования НИС, ASI, AIS

Описание кода и порядок работы программы:

Класс CarGeometryOptimization: определяет проблему оптимизации, связывая Python с Matlab/Simulink, обновляет геометрию в файле Excel перед каждой симуляцией, запускает симуляцию и получает значения НИС, ASI, AIS.

Генетический алгоритм: используется реализация из библиотеки `pygmo`, настраивается размер популяции, операторы кроссовера и мутации, критерий остановки - 50 поколений.

Визуализация результатов: график сходимости алгоритма, сравнение исходной и оптимизированной геометрии для продольных и поперечных сечений, тепловая карта параметров и сечения включают 10 лучших решений, сохранение результатов в Excel файлы (файл `top_solutions.xlsx`).

Интеграция с Matlab/Simulink: используется MATLAB Engine API для Python, запускается модель `PedCrashIT.slx` для каждого кандидата на решение, рассчитываются значения индексов травмирования.

Границы изменения параметров заданы как  $\pm 20\%$  от исходных значений, веса в целевой функции: 0.5 для НИС, 0.3 для ASI, 0.2 для AIS, размер популяции - 50, количество поколений – 50.

Требования к запуску: наличие Matlab/Simulink в версии не ниже 2020b, файлы проекта `PedCrashIT.slx`. Python не ниже версии 3.8, Jupyter notebooks, дополнительно требуется установить библиотеки:

```
pip install numpy, pandas, matplotlib, seaborn, pymoo, matlab.engine, openpyxl
```

Код программы:

```

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
from pymoo.algorithms.soo.nonconvex.ga import GA
from pymoo.core.problem import Problem
from pymoo.optimize import minimize
from pymoo.operators.crossover.sbx import SBX
from pymoo.operators.mutation.pm import PM
from pymoo.operators.sampling.rnd import FloatRandomSampling
from pymoo.termination import get_termination
import matlab.engine
import openpyxl

class CarGeometryOptimization(Problem):
    def __init__(self, initial_geom, bounds, matlab_engine):
        self.initial_geom = initial_geom
        self.matlab_engine = matlab_engine
        n_var = len(initial_geom)
        xl = [b[0] for b in bounds]
        xu = [b[1] for b in bounds]
        super().__init__(n_var=n_var, n_obj=1, n_ieq_constr=0, xl=xl, xu=xu)

    def _evaluate(self, X, out, *args, **kwargs):
        f = []
        for x in X:
            # Обновляем геометрию в файле Excel
            self.update_geometry(x)

            # Запускаем симуляцию в Matlab/Simulink

```

```

self.matlab_engine.run('PedCrashIT.slx', nargout=0)

# Получаем результаты из Matlab
hic = self.matlab_engine.workspace['HIC']
asi = self.matlab_engine.workspace['ASI']
ais = self.matlab_engine.workspace['AIS']

# Комбинированная целевая функция (можно настроить веса)
fitness = 0.5*hic + 0.3*asi + 0.2*ais
f.append(fitness)

out["F"] = np.array(f)

def update_geometry(self, x):
    # Обновляем геометрию в файле Excel
    wb = openpyxl.load_workbook('geomClust.xlsx')
    ws = wb.active

    # Предполагаем, что геометрия хранится в первом столбце, начиная со
    второй строки
    for i, value in enumerate(x, start=2):
        ws.cell(row=i, column=1, value=value)

    wb.save('geomClust.xlsx')

def load_initial_geometry(filename):
    # Загружаем начальную геометрию из Excel
    df = pd.read_excel(filename, header=None)
    return df.values.flatten()

```

```

def run_optimization():
    # Запускаем Matlab engine
    eng = matlab.engine.start_matlab()

    # Загружаем начальную геометрию
    initial_geom = load_initial_geometry('geomClust.xlsx')

    # Определяем границы изменения для каждой переменной (можно
настроить)
    bounds = [(val*0.8, val*1.2) for val in initial_geom]

    # Создаем проблему оптимизации
    problem = CarGeometryOptimization(initial_geom, bounds, eng)

    # Настраиваем генетический алгоритм
    algorithm = GA(
        pop_size=50,
        sampling=FloatRandomSampling(),
        crossover=SBX(prob=0.9, eta=15),
        mutation=PM(prob=0.1, eta=20),
        eliminate_duplicates=True
    )

    # Критерии остановки
    termination = get_termination("n_gen", 50)

    # Запускаем оптимизацию
    res = minimize(
        problem,
        algorithm,

```

```

    termination,
    seed=1,
    save_history=True,
    verbose=True
)

```

```

# Выводим результаты
print("Лучшее решение найдено: \nX = %s\nF = %s" % (res.X, res.F))

```

```

# Визуализация результатов
plot_results(res, initial_geom)

```

```

# Закрываем Matlab engine
eng.quit()

```

```

def plot_results(res, initial_geom):

```

```

    # График сходимости
    plt.figure(figsize=(12, 6))
    plt.plot([e.opt.get("F")[0] for e in res.history], marker='o')
    plt.title("График сходимости генетического алгоритма")
    plt.xlabel("Поколение")
    plt.ylabel("Значение целевой функции")
    plt.grid(True)
    plt.savefig('convergence_plot.png')
    plt.show()

```

```

# Сравнение начальной и оптимальной геометрии
plt.figure(figsize=(12, 8))

```

```

# Продольные сечения

```

```

plt.subplot(2, 1, 1)
plt.plot(initial_geom[:len(initial_geom)//2], 'b-', label='Исходная геометрия')
plt.plot(res.X[:len(res.X)//2], 'r-', label='Оптимизированная геометрия')
plt.title("Продольные сечения кузова")
plt.xlabel("Узлы")
plt.ylabel("Координаты")
plt.legend()
plt.grid(True)

# Поперечные сечения
plt.subplot(2, 1, 2)
plt.plot(initial_geom[len(initial_geom)//2:], 'b-', label='Исходная геометрия')
plt.plot(res.X[len(res.X)//2:], 'r-', label='Оптимизированная геометрия')
plt.title("Поперечные сечения кузова")
plt.xlabel("Узлы")
plt.ylabel("Координаты")
plt.legend()
plt.grid(True)

plt.tight_layout()
plt.savefig('geometry_comparison.png')
plt.show()

# Тепловая карта лучших решений из последнего поколения
last_gen = res.history[-1].pop.get("X")
fitness = res.history[-1].pop.get("F")

# Выбираем топ-10 решений
top_indices = np.argsort(fitness.flatten())[:10]
top_solutions = last_gen[top_indices]

```

```

plt.figure(figsize=(15, 8))
sns.heatmap(top_solutions, cmap="viridis", annot=True, fmt=".2f")
plt.title("Тепловая карта параметров топ-10 решений")
plt.xlabel("Параметры геометрии")
plt.ylabel("Решение")
plt.savefig('top_solutions_heatmap.png')
plt.show()

# Сохраняем результаты в Excel
df_results = pd.DataFrame({
    'Parameter': range(len(res.X)),
    'Initial': initial_geom,
    'Optimized': res.X,
    'Change (%)': (res.X - initial_geom) / initial_geom * 100
})

df_results.to_excel('optimization_results.xlsx', index=False)

# Сохраняем топ-10 решений
df_top = pd.DataFrame(top_solutions, columns=[f'Param_{i}' for i in
range(top_solutions.shape[1])])
df_top['Fitness'] = fitness[top_indices]
df_top.to_excel('top_solutions.xlsx', index=False)

if __name__ == "__main__":
    run_optimization()

```

## Приложение Г.7

### Код программы на Python для оценки эффективности мероприятий при комплексном применении методов по Главе 5

Описание кода и порядок работы программы: код разработан для оценки эффективности мероприятий по повышению безопасности дорожного движения на основе трех методов, описанных в Главе 5. Код учитывает: эффективность (снижение числа ДТП и травматизма), стоимость мероприятий, тип затрат (малозатратные, средnezатратные, высокозатратные) и приоритетность на основе дополнительных критериев (опасность участка – место концентрации ДТП, стабильность местоположения, недостатки дорожного состояния). Программа вычисляет: совокупную эффективность нескольких мероприятий; соотношение "стоимость/эффективность" для каждого мероприятия, приоритетность мероприятий на основе взвешенных критериев.

Порядок работы включает инициализацию данных, расчет показателей, визуализацию и вывод данных.

Требования к запуску: Python не ниже версии 3.8, Jupyter notebooks, дополнительно требуется установить библиотеки:

```
pip install numpy pandas matplotlib
```

Код программы:

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
from typing import List, Dict

class SafetyEffectivenessEvaluator:
    def __init__(self):
        pass
```

```
def evaluate_combined_effectiveness(self, delta_ks: List[float]) -> float:
```

```
    """
```

Оценка совокупной эффективности мероприятий по формуле:

$$\Delta k_k = 1 - (1 - \Delta k_1)(1 - \Delta k_2) \dots (1 - \Delta k_n)$$

Параметры:

delta\_ks (list): Список значений ожидаемого сокращения числа ДТП для каждого мероприятия.

Возвращает:

float: Совокупная эффективность в диапазоне [0, 1].

```
    """
```

```
    product = 1.0
```

```
    for delta_k in delta_ks:
```

```
        product *= (1 - delta_k)
```

```
    combined_effectiveness = 1 - product
```

```
    return combined_effectiveness
```

```
def calculate_cost_effectiveness_ratio(self, cost: float, delta_k: float) -> float:
```

```
    """
```

Расчет соотношения стоимости мероприятия к его эффективности.

Параметры:

cost (float): Стоимость мероприятия в тыс. руб.

delta\_k (float): Ожидаемое сокращение числа ДТП.

Возвращает:

float: Соотношение стоимости к эффективности (тыс. руб./% снижения ДТП).

```
"""
```

```
return cost / (delta_k * 100) if delta_k != 0 else float('inf')
```

```
def calculate_priority_score(self, row: Dict, weights: Dict) -> float:
```

```
"""
```

Расчет приоритетности мероприятия на основе заданных критериев и весов.

Параметры:

row (dict): Данные о мероприятии.

weights (dict): Веса для каждого критерия.

Возвращает:

float: Итоговый балл приоритетности.

```
"""
```

```
score = 0
```

```
score += row['Степень опасности'] * weights['Степень опасности']
```

```
score += row['Стабильность местоположения'] * weights['Стабильность
местоположения']
```

```
score += row['Недостатки ТЭС'] * weights['Недостатки ТЭС']
```

```
score += row['Индекс травмирования'] * weights['Индекс травмирования']
```

```
return score
```

```
def plot_effectiveness(self, data: pd.DataFrame, weights: Dict):
```

```
"""
```

Визуализация эффективности мероприятий с учетом стоимости, типа и приоритетности.

Параметры:

data (DataFrame): Данные о мероприятиях.

```

weights (dict): Веса для расчета приоритетности.
"""

# Рассчитываем приоритетность для каждого мероприятия
data['Приоритетность'] = data.apply(lambda row:
self.calculate_priority_score(row, weights), axis=1)
data = data.sort_values(by='Приоритетность', ascending=False)

combined_effectiveness =
self.evaluate_combined_effectiveness(data['delta_k'].values)

# Добавляем совокупную эффективность в данные
combined_row = pd.DataFrame({
    'Мероприятие': ['Совокупный эффект'],
    'delta_k': [combined_effectiveness],
    'Стоимость (тыс. руб.)': [data['Стоимость (тыс. руб.)'].sum()],
    'Тип мероприятия': ['Комбинированное'],
    'Снижение опасных ДТС': [data['Снижение опасных ДТС'].sum()],
    'Приоритетность': [None]
}, index=[len(data)])
plot_data = pd.concat([data, combined_row])

# Создаем график
fig, (ax1, ax2, ax3) = plt.subplots(3, 1, figsize=(14, 15))

# График эффективности
colors = {'Малозатратное': 'green', 'Среднезатратное': 'orange',
'Высокозатратное': 'red', 'Комбинированное': 'blue'}
for i, row in plot_data.iterrows():
    ax1.bar(row['Мероприятие'], row['delta_k'], color=colors.get(row['Тип
мероприятия'], 'gray'))

```

```

ax1.text(i, row['delta_k'], f'{row["delta_k"]:.2%}', ha='center', va='bottom')

ax1.set_title('Эффективность мероприятий по повышению БДД')
ax1.set_ylabel('Сокращение числа ДТП')
ax1.set_ylim(0, 1)
ax1.grid(axis='y', linestyle='--', alpha=0.7)
ax1.tick_params(axis='x', rotation=45)

# График соотношения стоимости к эффективности
cost_effectiveness = []
for i, row in plot_data.iterrows():
    if row['Мероприятие'] != 'Совокупный эффект':
        ratio = self.calculate_cost_effectiveness_ratio(row['Стоимость (тыс.
руб.)'], row['delta_k'])
        cost_effectiveness.append(ratio)
    else:
        cost_effectiveness.append(None)

ax2.bar(plot_data['Мероприятие'], cost_effectiveness,
        color=[colors.get(t, 'gray') for t in plot_data['Тип мероприятия']])
ax2.set_title('Соотношение стоимости к эффективности')
ax2.set_ylabel('Тыс. руб./% снижения ДТП')
ax2.grid(axis='y', linestyle='--', alpha=0.7)
ax2.tick_params(axis='x', rotation=45)

# График приоритетности
ax3.bar(plot_data['Мероприятие'], plot_data['Приоритетность'],
        color=[colors.get(t, 'gray') for t in plot_data['Тип мероприятия']])
ax3.set_title('Приоритетность мероприятий')
ax3.set_ylabel('Балл приоритетности')

```

```

ax3.grid(axis='y', linestyle='--', alpha=0.7)
ax3.tick_params(axis='x', rotation=45)

plt.tight_layout()
plt.show()

# Вывод таблицы с данными
print("\nДанные о мероприятиях с приоритетностью:")
display(plot_data.drop(columns=['Степень опасности', 'Стабильность
местоположения', 'Недостатки ТЭС']))

# Пример использования
if __name__ == "__main__":
    evaluator = SafetyEffectivenessEvaluator()

# Веса для критериев приоритетности
weights = {
    'Степень опасности': 0.4,
    'Стабильность местоположения': 0.3,
    'Недостатки ТЭС': 0.2,
    'Индекс травмирования': 0.1
}

# Данные о мероприятиях (расширенные)
data = pd.DataFrame({
    'Мероприятие': [
        "Оптимизация геометрии кузова",
        "Удобство обслуживания (ОПУС)",
        "Определение уровней безопасности (ПВВ)"
    ],

```

```

'delta_k': [0.23, 0.58, 0.37], # Ожидаемое сокращение числа ДТП
'Снижение индексов травмирования': [0.23, 0.58, 0.37], # Фактические
значения индексов травмирования
'Стоимость (тыс. руб.)': [500, 1500, 800], # Стоимость мероприятия
'Тип мероприятия': ['Среднезатратное', 'Высокозатратное',
'Mалозатратное'], # Тип по затратам
'Снижение опасных ДТС': [15, 40, 25], # Снижение числа опасных ДТС
'Степень опасности': [0.8, 0.9, 0.7], # Степень опасности мест
концентрации ДТП (0-1)
'Стабильность местоположения': [0.6, 0.7, 0.5], # Характеристики
стабильности местоположения (0-1)
'Недостатки ТЭС': [0.7, 0.8, 0.6] # Наличие недостатков транспортно-
эксплуатационного состояния (0-1)
})

# Оценка совокупной эффективности
combined_effect =
evaluator.evaluate_combined_effectiveness(data['delta_k'].values)
print(f"Совокупная эффективность: {combined_effect:.2%}")

# Визуализация с учетом приоритетности
evaluator.plot_effectiveness(data, weights)

```

**ПРИЛОЖЕНИЕ Д**  
**(Акты внедрения)**



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное**  
**образовательное учреждение высшего образования**  
**«Санкт-Петербургский государственный**  
**архитектурно-строительный университет»**  
**(СПбГАСУ)**

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

03.12.2024

№ 124

[Акт внедрения материалов диссертации]  
 в учебный процесс СПбГАСУ



**«УТВЕРЖДАЮ»**  
 Проректор по образовательной  
 деятельности  
 ФГБОУ ВО СПбГАСУ

Михайлов С.В.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

материалов, содержащихся в диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук «Научные основы обеспечения эффективности дорожно-транспортной экспертизы и экспертной профилактики ДТП с участием пешеходов» Васильева Ярослава Владимировича в учебный процесс Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета

Комиссия в составе:

Председателя: кандидата технических наук, доцента Зазыкина А.В. – декана автомобильно-дорожного факультета.

Членов комиссии:

доктора технических наук, профессора Евтюкова С.С. – заведующего кафедрой транспортных систем и дорожно-мостового строительства;

доктора технических наук, доцента Куракиной Е.В. – заведующего кафедрой наземных транспортно-технологических машин;

кандидата технических наук, доцента Черняева И.О. – заведующего кафедрой технической эксплуатации транспортных средств.

Настоящим подтверждает внедрение материалов, содержащихся в диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук «Научные основы обеспечения эффективности дорожно-транспортной экспертизы и экспертной профилактики ДТП с участием пешеходов» доцента кафедры наземных транспортно-технологических машин Васильева Ярослава Владимировича (научный консультант: доктор технических наук, профессор Евтюков С.А.), в учебный процесс выпускающей кафедры наземных транспортно-технологических машин автомобильно-дорожного факультета для обучающихся по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства» и аспирантов по направлению подготовки 2.9.5 «Эксплуатация автомобильного транспорта».

Результаты диссертации Васильева Ярослава Владимировича нашли теоретическое и практическое применение в учебном процессе по следующим дисциплинам учебного плана по специальности:

23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства»:

- Б1.О.31 Диагностика, инструментальный контроль и экспертиза наземных транспортно-технологических машин.

2.9.5 «Эксплуатация автомобильного транспорта»:

- Б1.В.01 Эксплуатация автомобильного транспорта.

Внедрение результатов диссертации Васильева Ярослава Владимировича обсуждено на заседании учебно-методической комиссии автомобильно-дорожного факультета Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета «28» ноября 2024 г., протокол № 2.

Основные положения диссертации «Научные основы обеспечения эффективности дорожно-транспортной экспертизы и экспертной профилактики ДТП с участием пешеходов» для экспертной деятельности по профилактике и реконструкции ДТП изложены в следующих печатных трудах автора:

1. Васильев Я.В., Головина С.Г., Евтюков С.А., Карелина М.Ю., Терентьев А.В. Грузовые перевозки в транспортных системах / Учебно-методический комплекс (информационные ресурсы дисциплины: учебное пособие). – Санкт-Петербург: Изд-во «Петрополис», 2015. – 288 с.

2. Васильев Я.В., Евтюков С.А., Терентьев А.В. Основы судебной автотехнической экспертизы / Базовый курс. Том 1: Учебное пособие. – Санкт-Петербург: Издательский дом «Петрополис», 2018. – 354 с.

3. Васильев Я.В., Евтюков С.А., Терентьев А.В. Основы судебной автотехнической экспертизы / Расширенный курс. Том 2: Учебное пособие. – Санкт-Петербург: Издательский дом «Петрополис», 2018. – 340 с.

4. Васильев Я.В., Головина С.Г., Евтюков С.А., Карелина М.Ю., Терентьев А.В. Цифровизация процессов управления дорожно-транспортной инфраструктурой и БДД. Том 1 / СПб: ИД «Петрополис», 2019. 372с.

5. Васильев Я.В., Головина С.Г., Евтюков С.А., Карелина М.Ю., Терентьев А.В. Цифровизация процессов управления дорожно-транспортной инфраструктурой и БДД. Том 2 / СПб: ИД «Петрополис», 2019. 364с.

Председатель комиссии:  
Декан АДФ, к.т.н., доцент



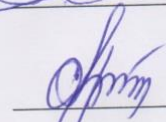
Зазыкин А.В.

Члены комиссии:  
Заведующий кафедрой ТСидМС,  
д.т.н., профессор



Евтюков С. С.

Заведующий кафедрой НТТМ,  
д.т.н., доцент



Куракина Е.В.

Заведующий кафедрой ТЭТС,  
к.т.н., доцент



Черняев И.О.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Вологодский государственный университет»  
(ВоГУ)  
ул. Ленина, д.15, Вологда, 160000

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по образовательной  
и воспитательной деятельности ВоГУ

С.Б. Виноградова

2025 года



#### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательской (диссертационной) работы  
**«НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ И ЭКСПЕРТНОЙ  
ПРОФИЛАКТИКИ ДТП С УЧАСТИЕМ ПЕШЕХОДОВ»**

к.т.н., доцента Васильева Ярослава Владимировича в учебный процесс  
Вологодского государственного университета

Комиссия в составе: Фролова А.А. – директора института машиностроения, энергетики и транспорта, кандидата технических наук, доцента; Пикалева О.Н. – заведующего кафедрой автомобилей и автомобильного хозяйства, кандидата технических наук, доцента; Смирнова П.И. – доцента кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства, кандидата технических наук; Ракова В.А. – доцента кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства, кандидата технических наук, доцента, настоящим актом подтверждает внедрение результатов научно-исследовательской (диссертационной работы) на тему: «Научные основы обеспечения эффективности дорожно-транспортной экспертизы и экспертной профилактики ДТП с участием пешеходов», выполненную на кафедре наземных транспортно-технологических машин автомобильно-дорожного факультета ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» кандидатом технических наук, доцентом, Васильевым Я.В., в

учебный процесс кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства для преподавания дисциплин у специалистов специальности 23.05.02 «Наземные транспортно-технологические средства» и бакалавров направления подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

Результаты научно-исследовательской (диссертационной работы) к.т.н., доцента Васильева Я.В. для учебного процесса изложены в следующих учебных изданиях:

1. Васильев Я.В., Головина С.Г., Евтюков С.А., Карелина М.Ю., Терентьев А.В. Цифровизация процессов управления дорожно-транспортной инфраструктурой и БДД. Том 1 / СПб: ИД «Петрополис», 2019.- 372с.
2. Васильев Я.В., Головина С.Г., Евтюков С.А., Карелина М.Ю., Терентьев А.В. Цифровизация процессов управления дорожно-транспортной инфраструктурой и БДД. Том 2 / СПб: ИД «Петрополис», 2019.- 364с.
3. Васильев Я.В., Головина С.Г., Евтюков С.А., Карелина М.Ю., Терентьев А.В. Грузовые перевозки в транспортных системах / Учебно-методический комплекс (информационные ресурсы дисциплины: учебное пособие). – Санкт-Петербург: Изд-во «Петрополис», 2015. – 288 с.
4. Васильев Я.В., Евтюков С.А., Терентьев А.В. Комплексный научно-методический подход к изучению транспортных систем / Под общ. ред. А.В. Терентьева: Учебное пособие. – Санкт-Петербург: ИД «Петрополис», 2016.– 276 с.
5. Васильев Я.В., Евтюков С.А., Терентьев А.В. Основы судебной автотехнической экспертизы / Базовый курс. Том 1: Учебное пособие. – Санкт-Петербург: Издательский дом «Петрополис», 2018. – 354 с.
6. Васильев Я.В., Евтюков С.А., Терентьев А.В. Основы судебной автотехнической экспертизы / Расширенный курс. Том 2: Учебное пособие. – Санкт-Петербург: Издательский дом «Петрополис», 2018. – 340 с.
7. Васильев Я.В., Евтюков С.А., Терентьев А.В. Организация грузовых перевозок в сложных транспортных системах: учебно-методический комплекс (информационные ресурсы дисциплины: учебное пособие) / под общей редакцией А.В.Терентьева. - Санкт-Петербург: Издательский дом «Петрополис», 2023. – 284 с.

Использование результатов диссертационной работы «Научные основы обеспечения эффективности дорожно-транспортной экспертизы и экспертной профилактики ДТП с участием пешеходов» доцента кафедры НТТМ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» кандидата технических наук, доцента Васильева Я.В. для внедрения в учебный процесс обсуждено

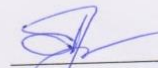
на заседании кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства 14 января 2025 года, протокол № 5 и на заседании методического совета института машиностроения, энергетики и транспорта ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет» 24 января 2025, протокол № 5.

Председатель комиссии:  
директор института машиностроения,  
энергетики и транспорта, к.т.н., доцент



Фролов А.А.

Члены комиссии:  
заведующий кафедрой автомобилей и  
автомобильного хозяйства, к.т.н., доцент



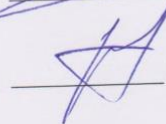
Пикалев О.Н.

доцент кафедры автомобилей и  
автомобильного хозяйства, к.т.н., доцент



Смирнов П.И.

доцент кафедры автомобилей и  
автомобильного хозяйства, к.т.н., доцент



Раков В.А.



**Общество с ограниченной ответственностью  
«СПБГАСУ-Дорсервис»**

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор МИП  
ООО «СПБГАСУ-Дорсервис»,  
кандидат технических наук  
\_\_\_\_\_ Е.В. Голов

**АКТ  
О ВНЕДРЕНИИ**

результатов диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук «Научные основы обеспечения эффективности дорожно-транспортной экспертизы и экспертной профилактики ДТП с участием пешеходов» к.т.н., доцента кафедры НТТМ ФГБОУ ВО «СПБГАСУ»  
Васильева Ярослава Владимировича  
по специальности 2.9.5 «Эксплуатация автомобильного транспорта»

ООО «СПБГАСУ-Дорсервис» настоящим актом подтверждает внедрение материалов, содержащихся в диссертации «Научные основы обеспечения эффективности дорожно-транспортной экспертизы и экспертной профилактики ДТП с участием пешеходов» доцента кафедры наземных транспортно-технологических машин автомобильно-дорожного факультета Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета Васильева Я.В. (научный консультант – доктор технических наук, профессор Евтюков С.А.), в процессы выполнения НИР по государственным контрактам:

УД №47/421 на научно-исследовательскую работу по теме: «Разработка национального стандарта ГОСТ Р "Автомобильные дороги. Пешеходные переходы в разных уровнях. Общие требования. Правила размещения"»;

ФДА №47/169 на научно-исследовательскую работу по теме: «Разработка ОДМ "Методические рекомендации по созданию системы опытно-экспериментальных полигонов на действующей сети автомобильных дорог федерального значения для внедрения новых технологий и материалов в дорожном хозяйстве в различных природно-климатических зонах Российской Федерации"»;

ФДА №47/112 на научно-исследовательскую работу по теме: «ГОСТ Р "Дороги автомобильные общего пользования. Ограничивающие пешеходные и защитные ограждения. Технические требования. Методы контроля"»;

ГК №35/1-2019 на научно-исследовательскую работу по теме: «Разработка ГОСТ Р "Дороги автомобильные общего пользования. Требования к уровню летнего содержания. Критерии оценки и методы контроля"».

190013, г. Санкт-Петербург,  
ул. Рузовская, д.8, литера Б, помещ.10-Н, оф.402

Телефон:  
8-965-054-51-38

E-mail:  
dor.spbgasu@mail.ru



**Общество с ограниченной ответственностью**  
**«СПБГАСУ-Дорсервис»**

ГК №22/1-2022 на научно-исследовательскую работу по теме: «Исследование и анализ практики применения опор для установки дорожных информационно-указательных знаков и опор стационарного электрического освещения с пассивной безопасностью, а также нормативных правовых и технических документов, регулирующих данный вопрос, с разработкой документа по стандартизации».

Материалы диссертационной работы Васильева Я.В. были использованы в разработке и внедрении четырех национальных стандартов и одной отраслевой дорожной методики (ОДМ), а именно:

ГОСТ Р 59292-2021 Дороги автомобильные общего пользования. Требования к уровню летнего содержания. Критерии оценки и методы контроля (при участии автора)

ГОСТ Р 59401-2021 Дороги автомобильные общего пользования. Ограничивающие пешеходные и защитные ограждения. Общие технические условия (под руководством автора)

ГОСТ Р 59610-2021 Дороги автомобильные общего пользования. Пешеходные переходы в разных уровнях. Общие требования. Правила размещения (под руководством автора)

ГОСТ Р 71410-2024 Дороги автомобильные общего пользования. Опоры дорожных информационных знаков и стационарного электрического освещения. Общие технические условия (под руководством автора)

ОДМ 218.4.033-2017 Методические рекомендации по созданию системы опытно-экспериментальных полигонов на действующей сети автомобильных дорог федерального значения для внедрения новых технологий и материалов в дорожном хозяйстве в различных природно-климатических зонах Российской Федерации (при участии автора).

Разработанные Васильевым Я.В. комплексы методик с применением универсального полимодельного комплекса, реализованного на виртуальном полигоне были использованы в расчете ширины пешеходных переходов при работе над ГОСТ Р 59610, при обосновании к требованиям к пешеходным ограждениям при работе над ГОСТ Р 59401, при ранжировании уровней безопасности по ПВВ в ГОСТ Р 59610 к пешеходным переходам, при этом метод также применим для оценки уровней ПБ опор в ГОСТ Р 71410.

Композиционное решение по формированию виртуального полигона учитывалось при разработке требований к натурным полигонам ОДМ 218.4.033 с заложением возможностей симуляционного анализа МКЭ при разработке ЦМ ДТП при проведении расчетов по ГОСТ Р 59401 и ГОСТ Р 71410.



**Общество с ограниченной ответственностью**  
**«СПБГАСУ-Дорсервис»**

При выполнении проектных и научно-исследовательских работ в МИП «СПБГАСУ-Дорсервис» используются следующие публикации Васильева Я.В.:

1. 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.

2. Васильев Ю.Э., Васильев Я.В., Евтюков С.А., Лазарев Ю.Г., Карелина М.Ю., Котлярский Э.В., Орешкин А.С., Приходько В.М., Чигликов Р.Р. Диагностика состояния подсистемы «дорога в системе ВАДС. Том 1: Методики прогнозирования / СПб: ИД «Петрополис», 2018.-308с.

3. Васильев Ю.Э., Васильев Я.В., Евтюков С.А., Лазарев Ю.Г., Карелина М.Ю., Котлярский Э.В., Орешкин А.С., Приходько В.М., Чигликов Р.Р. Диагностика состояния подсистемы «дорога в системе ВАДС. Том 2: Организация освоения инноваций / СПб: ИД «Петрополис», 2019.-298с.

4. Васильев Ю.Э., Васильев Я.В., Евтюков С.А., Лазарев Ю.Г., Карелина М.Ю., Котлярский Э.В., Орешкин А.С., Приходько В.М., Чигликов Р.Р. Диагностика состояния подсистемы «дорога в системе ВАДС. Том 3: Дорожная экспертиза / СПб: ИД «Петрополис», 2019.- 296с.

5. Васильев Я.В., Головина С.Г., Евтюков С.А., Карелина М.Ю., Терентьев А.В. Цифровизация процессов управления дорожно-транспортной инфраструктурой и БДД. Том 1 / СПб: ИД «Петрополис», 2019.- 372с.

6. Васильев Я.В., Головина С.Г., Евтюков С.А., Карелина М.Ю., Терентьев А.В. Цифровизация процессов управления дорожно-транспортной инфраструктурой и БДД. Том 2 / СПб: ИД «Петрополис», 2019.- 364с.

В рамках работ по разработке проектов ОДД, результаты диссертационного исследования также применяются:

при оценке удобства обслуживания для пешеходов с вариацией факторов оценки, при этом получено прогнозируемое снижение индексов травмирования пешехода до 58% при соотношении стоимости решений (введения организационных мер) к сокращению числа наездов до 1:8;

при определении уровней безопасности участка дороги по оценке прогнозируемого времени выхода, при этом было отмечено, что рациональное смещение области конфликтов в границы высоких и средних уровней пассивной безопасности может достигать до 37% при комплексном применении методов ОБДД, включая изложенные в работе Васильева Я.В.

Инженер отдела научного сопровождения

« 27 » марта 2025 года

Антипов И.В.

190013, г. Санкт-Петербург,  
ул. Рузовская, д.8, литера Б, помещ.10-Н, оф.402

Телефон:  
8-965-054-51-38

E-mail:  
dor.spbgasu@mail.ru

УТВЕРЖДАЮ  
Отдел Госавтоинспекции УМВД России  
по Кировскому району  
г. Санкт-Петербурга  
Корпачев С.В.



2025 г.

### АКТ

об использовании результатов докторанта  
диссертационной работы канд. техн. наук, доцента  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-  
строительный университет»  
Васильева Ярослава Владимировича

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационной работы на тему «Научные основы обеспечения эффективности дорожно-транспортной экспертизы и экспертной профилактики ДТП с участием пешеходов» внедрены в работу отделов и групп по исполнению административного законодательства в отдела Госавтоинспекции УМВД России по Кировскому району г. Санкт-Петербурга.

Разработанные автором комплексы методик производства дорожно-транспортных экспертиз и методов экспертной профилактики, были принят к внедрению. В частности, практическое применение нашли: методика расчета риска травмирования, методика расчета затрат скорости на контакт тела пешехода с ТС на базе суррогатных конечно-элементных моделей, методика оптимизации генетическим алгоритмом цифровой модели механизма ДТП, а также связанные с реализацией данного комплекса методик: базы данных и субприложения.

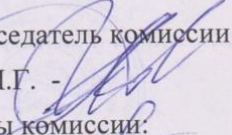
А также были внедрены методы экспертной профилактики ДТП, среди которых используются: метод расчета оценки удобства обслуживания (безопасности доступа к обслуживанию) для пешеходов с вариацией факторов оценки и метод определения уровней безопасности участка дороги по оценке прогнозируемого времени выхода.

Применение данного комплекса методик и методов позволило: исключить вероятностные выводы по задачам связанным с определением нахождения в причинной связи превышения скорости водителем ТС и полученными пешеходом индексами травмирования, снизить сроки выполнения экспертиз и существенно сузить площадь областей вариации значений в цифровой модели механизма ДТП.

Практическое использование указанных методик в практике производства комплексных трасолого-автотехнических и дорожно-транспортных экспертиз позволило увеличить категоричность выводов

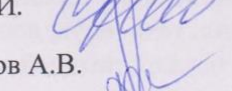
экспертов, повысить точность их расчетов, при этом при разработке мероприятий по ОБДД повысить эффективность от внедрения мер.

Председатель комиссии:

Беспалов М.Г. - 

Члены комиссии:

Данилин А.В. 

Сытина М.И. 

Александров А.В. 



**«СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР ЭКСПЕРТИЗ»**

ООО «СЗРЦЭ», адрес: 195112, Санкт-Петербург, Уткин пр., д. 11, к.2, оф. 312,  
тел. +7(812)943-71-75, E-mail: [info@szrce.ru](mailto:info@szrce.ru), сайт: <https://szrce.ru>

**ИНН 7838413200, КПП 780601001, ОГРН 1089847318978**

**ОКВЭД 71.20., 62.02.2, 66.21, 71.11, 71.12.1, 71.20, 71.20.5, 71.20.6, 71.20.62, 74.90, 74.90.24, 74.90.25, 82.99**

**АКТ**

**внедрения в практическое применение**

результатов диссертационной работы к.т.н., доцента кафедры НТТМ ФГБОУ  
ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный  
университет»

Васильева Ярослава Владимировича

на тему

«Научные основы обеспечения эффективности дорожно-транспортной  
экспертизы и экспертной профилактики ДТП с участием пешеходов»

Настоящим Актом повреждается, что результаты диссертационной работы Васильева Ярослава Владимировича на соискание ученой степени доктора технических наук с 11 мая 2024 года были внедрены в работу ООО СЗРЦЭ при производстве дорожно-транспортных экспертиз по ДТП с участием пешеходов.

В практическом применении в ООО СЗРЦЭ были использованы следующие инструменты комплекса методического обеспечения цифрового моделирования ДТП, разработанных Васильевым Я.В.:

- параметризированная гибридная модель антропоморфного манекена (ГМАМ). Использование ГМАМ при реконструкции стадий контакт - отброс показало на практике к существенно сокращение времени расчета методом конечных элементов до 23% при сравнении с моделями в LS-Dyna.

- базы данных по жесткостным характеристикам ТС и связанные с ними решения по генерации суррогатных конечно-элементных моделей. При этом использование методики расчета затрат скорости на КСВ на базе суррогатных КЭМ при определении фактической скорости ТС в момент наезда на пешехода позволило снизить полное время производства экспертизы (составления заключения) на 18%, при обеспечении допустимой сходимости с результатами расчета скорости по видеозаписям с ошибкой не более 5%;

- методики методика расчета риска травмирования. При решении задач связанных с оценкой нахождения превышения скорости движения водителем ТС до наезда в причинной связи с объем полученных пешеходом травм было установлена возможность категоричного решения;

- методика оптимизации генетическим алгоритмом цифровой модели механизма ДТП внедряемая в модельно-ориентированную реконструкцию (МОР) через субприложения. При практическом применении было достигнуто снижение до 87% площади областей варьируемых параметров всей модели, что при сравнении с общепринятыми методами существенно повышает эффективность МОР.

В практической деятельности экспертами ООО СЗРЦЭ используются следующие публикации Василюева Ярослава Владимировича:

1. Василюев Я.В. Анализ вторичного травмирования пешеходов в задачах дорожно-транспортной экспертизы // Грузовик. 2023. №1. С. 36-42. DOI: 10.36652/1684-1298-2023-1-36-42
2. Василюев Я.В. Методика расчета риска получения травм при реконструкции дорожно-транспортных происшествий с участием пешеходов // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 2 (97). С. 103–109. DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-2-103-109
3. Василюев Я.В., Евтюков С.А. Судебная автотехническая экспертиза. Теория и практика. Том 1 / СПб.: Издательский дом Петрополис, 2018 – 244 с.
4. Василюев Я.В., Евтюков С.А. Судебная автотехническая экспертиза. Примеры исследований. Справочные данные. Том 2 / СПб.: Издательский дом Петрополис, 2019. – 260 с.
5. Василюев Я.В., Евтюков С.А. Справочник по экспертизе ДТП. Изд. 3-е переработ. и доп. / ИД «Петрополис», СПб, 2020 - 516 с.

Генеральный директор ООО СЗРЦЭ Кутузов С.В./

Дата 15.10.2024 года





Общество с ограниченной ответственностью  
«Департамент Экспертизы и Оценки»

344018, г. Ростов-на-Дону, пер. Семашко, 117А, оф. 17.

Юр. Адрес: 344019 г. Ростов-на-Дону ул. Мясникова, 44

тел: 8-919-887-88-07

## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

в практическое применение результатов диссертационной работы на тему  
«Научные основы обеспечения эффективности дорожно-транспортной экспертизы и  
экспертной профилактики ДТП с участием пешеходов»

к.т.н., доцента кафедры НТТМ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет»

Васильева Ярослава Владимировича

Настоящим Актом повреждается, что результаты диссертационной работы Васильева Ярослава Владимировича «Научные основы обеспечения эффективности дорожно-транспортной экспертизы и экспертной профилактики ДТП с участием пешеходов» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.9.5 «Эксплуатация автомобильного транспорта» внедрены ООО «Департамент Экспертизы и Оценки» в процессы реконструкции, моделирования и анализа ДТП с участием пешеходов при производстве трасолого-автотехнических и дорожно-транспортных экспертиз.

При практическом применении в ООО «Департамент Экспертизы и Оценки» в экспертных исследованиях были использованы научно-методические разработки Васильева Я.В., позволившие обеспечить процессы моделирования ДТП, в частности применяются: параметризованная гибридная модель антропоморфного манекена; базы данных по жесткостным характеристикам ТС; подход к формированию и применению в цифровых моделях механизма ДТП суррогатных конечно-элементных моделей при расчете скорости движения ТС в момент наезда на пешехода; методики расчета риска травмирования; методика оптимизации генетическим алгоритмом цифровой модели механизма ДТП.

В практической деятельности экспертами ООО «Департамент Экспертизы и Оценки» используются следующие публикации Васильева Ярослава Владимировича:

1. Васильев Я.В., Евтюков С.А. Судебная автотехническая экспертиза. Теория и практика. Том 1 / СПб.: Издательский дом Петрополис, 2018 – 244 с.
2. Васильев Я.В., Евтюков С.А. Судебная автотехническая экспертиза. Примеры исследований. Справочные данные. Том 2 / СПб.: Издательский дом Петрополис, 2019. – 260 с.
3. Васильев Я.В., Евтюков С.А. Справочник по экспертизе ДТП. Изд. 3-е переработ. и доп. / ИД «Петрополис», СПб, 2020 - 516 с.

Генеральный директор

ООО «Департамент Экспертизы и Оценки»

30.09.2024 года

Г.С. Цатурян



### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертации к.т.н., доцента кафедры НТТМ ФГБОУ ВО  
«СПбГАСУ»

Васильева Ярослава Владимировича

на соискание ученой степени доктора технических наук «Научные основы  
обеспечения эффективности дорожно-транспортной экспертизы и  
экспертной профилактики ДТП с участием пешеходов»

Настоящим Актом подтверждается, что результаты диссертационной работы к.т.н., доцента кафедры НТТМ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» Васильева Ярослава Владимировича внедрены акционерным обществом «АльфаСтрахование» в процессы производства дорожно-транспортных экспертиз при реконструкции и анализе ДТП с участием пешеходов. В частности при практическом применении экспертами при работе по выплатным делам с 01.07.2024 года используются следующие результаты вышеуказанной диссертационной работы:

1. Методика расчета риска травмирования. Применение данной методики позволило исключить вероятностные выводы по задачам связанным с определением нахождения в причинной связи превышения скорости водителем ТС и полученными пешеходом индексами травмирования;

2. Методика расчета затрат скорости на КСВ на базе суррогатных КЭМ. Внедрение данной методики при определении фактической скорости ТС в момент наезда на пешехода позволило снизить сроки выполнения экспертиз на 17%, при сходимости с результатами расчета скорости по видеозаписям с ошибкой не более 5%;

3. Методика оптимизации цифровой модели механизма ДТП выполненной при МОР генетическим алгоритмом. Применение методики на практике показало, снижение до 86% площади областей вариативных значений цифровой модели, при сравнении результатов с общепринятыми методами итерационной оптимизации и методом Монте-Карло.

Применение в практической деятельности вышеуказанных методик в составе результатов диссертационного исследования Васильева Я.В. позволило в целом повысить категоричность выводов по экспертным исследованиям, а также расширит объем применения цифровых моделей в реконструкции механизма ДТП с участием пешеходов.

Руководитель СЭБ СЗРЦ

АО «АльфаСтрахование»

24 января 2025



А.О.Балуев



ООО ЭКСПЕРТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
РОСТОВСКИЙ ЭКСПЕРТНО-ПРАВОВОЙ ЦЕНТР  
«ДОН»

ИНН/КПП 6163091125/616301001  
ОГРН 1086163001704

344000, Ростов-на-Дону, Пр. Соколова 41 оф.28А,  
тел. 8-918-550-72-07  
Email shirshov60@mail.ru

### АКТ

внедрения по практическому использованию результатов диссертационной работы  
«Научные основы обеспечения эффективности дорожно-транспортной экспертизы и  
экспертной профилактики ДТП с участием пешеходов» на соискание ученой степени  
доктора технических наук по специальности 2.9.5 «Эксплуатация автомобильного  
транспорта»

Настоящим Актом повелевается, что результаты диссертационной работы к.т.н.,  
доцента кафедры НТТМ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-  
строительный университет» Васильева Ярослава Владимировича были внедрены в ООО ЭУ  
РЭПЦ «Дон» при экспертных исследованиях. В частности, разработки автора в части  
комплекса методик и методов применяются при моделировании и анализе ДТП с участием  
пешеходов в задачах дорожно-транспортной экспертизы и экспертной профилактики ДТП.

В ООО ЭУ РЭПЦ «Дон» в экспертных исследованиях при моделировании с ДТП с  
участием пешеходов были использованы изложенные в диссертационной работе Васильева  
Я.В. подходы к синтезу суррогатных конечно-элементных моделей с учетом зависимостей  
жесткость/прогиб и баз данных к ним, а также к применению в моделях гибридной модели  
антропоморфного манекена. Это позволило реализовать на практике методический комплекс  
Васильева Я.В., позволившего решить задачи расчета скорости движения ТС в момент наезда  
на пешехода, расчета риска травмирования, как при первичном так и при вторичном контакте  
тела пешехода и оптимизировать на основе генетического алгоритма цифровую модель  
механизма ДТП на всех стадиях.

При осуществлении практической деятельности экспертами ООО ЭУ РЭПЦ  
«Дон» также активно применяются публикации Васильева Ярослава Владимировича:

1. Васильев Я.В., Евтюков С.А. Реконструкция и экспертиза ДТП в примерах / СПб.:  
Издательство «Петрополис», 2012. – 324 с.
2. Евтюков С.А., Васильев Я.В., Евтюков С.С., Голов Е.В. Прогнозирование  
изменения технико-эксплуатационных показателей подсистемы автомобильных дорог в  
системе ВАДС / СПб, ООО Издательский дом «Петрополис», 2017 – 232 с.
3. 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», 2019.-124 с.
4. Васильев Я.В., Евтюков С.А. Справочник по экспертизе ДТП. Изд. 3-е переработ. и  
доп. / ИД «Петрополис», СПб, 2020 - 516 с

Генеральный директор  
ООО ЭУ РЭПЦ «Дон»

20.09.2024 года



Ширшов И.В.



Страховое акционерное общество «ВСК»  
ИНН 7710026574  
Санкт-Петербургский филиал  
ул. Чапаева, д. 15, лит. А, пом. 14-Н  
г. Санкт-Петербург, 197046

«17» декабря 2024 года

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

в практическое применение результатов диссертационной работы к.т.н.,  
доцента кафедры НТТМ ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»  
Васильева Ярослава Владимировича  
на тему «Научные основы обеспечения эффективности дорожно-  
транспортной экспертизы и экспертной профилактики ДТП с участием  
пешеходов»

Настоящим сообщаем, что результаты диссертационной работы «Научные основы обеспечения эффективности дорожно-транспортной экспертизы и экспертной профилактики ДТП с участием пешеходов» на соискание ученой степени доктора технических наук были с 01 августа 2024 года приняты к внедрению Страховым акционерным обществом «ВСК» и применяются экспертами при производстве экспертных исследований по выплатным делам, а также при решении вопросов, связанных с реконструкцией механизма ДТП с участием пешеходов.

В практическом применении в САО «ВСК» были использованы параметризованная гибридная модель антропоморфного манекена, что привело к сокращению времени расчета МКЭ до 23% и методика расчета затрат скорости на КСВ на базе суррогатных КЭМ, которая при определении фактической скорости ТС в момент наезда на пешехода позволила снизить сроки выполнения экспертиз на 18%, при сходимости с результатами расчета скорости действующими методами с ошибкой не более 5%.

Применение данных результатов в практической деятельности САО «ВСК» позволило при выполнении исследований по ДТП с участием пешеходов повысить эффективность экспертных исследований, в части снижения временных и трудовых затрат, а также повысило категоричность выводов по исследованиям.

Заместитель директора филиала –  
Руководитель  
Дирекции по юридическому обеспечению,  
представитель по доверенности  
Рыскина К. А.

8 (812) 325-14-15, доб. 1614  
ryskina@vsk.ru





пр. Непокоренных, 49А, С.-Петербург, 195220  
 тел. (812) 346-85-23, факс. (812) 449-61-04  
 e-mail: nwrn@spb.reso.ru www.reso.ru

17.01.2025

### АКТ

об использовании результатов диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук «Научные основы обеспечения эффективности дорожно-транспортной экспертизы и экспертной профилактики ДТП с участием пешеходов» к.т.н., доцента кафедры НТТМ ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»  
 Васильева Ярослава Владимировича

Настоящим сообщаем, что результаты диссертационной работы к.т.н., доцента кафедры НТТМ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» Васильева Ярослава Владимировича приняты к внедрению страховым акционерным обществом «РЕСО-Гарантия» и используются с 01 августа 2024 года экспертами в расчетно-исследовательских работах по выплатным делам, а также в их практической деятельности при решении вопросов, связанных с реконструкцией механизма ДТП в которых имели место наезды транспортных средств на пешехода и/или группу пешеходов.

В частности, практическое применение в CAO «РЕСО-Гарантия» нашли следующие результаты вышеуказанной диссертационной работы:

- методика расчета затрат скорости на КСВ на базе суррогатных КЭМ;
- методика расчета риска травмирования;
- методика оптимизации цифровой модели механизма ДТП выполненной при МОР генетическим алгоритмом.

Применение результатов диссертационной работы Васильева Я.В. в практической деятельности позволило при анализе ДТП с наездом на пешеходов использовать оценки риска травмирования при решении задач связанных с анализом причинных связей в реконструкции ДТП, а также в задачах установления фактического места наезда повысить точность выполняемых расчетов определения положения объектов исследования в момент начала контакта, что повысило категоричность выводов по экспертным исследованиям, а также снизить сроки их выполнения.

Начальник отдела правового обеспечения  
 ПУ РУ по СЗФО CAO «РЕСО-Гарантия»

А. А. Карпушенко



### АКТ

о практическом применении результатов диссертационной работы на тему  
 «Научные основы обеспечения эффективности дорожно-транспортной  
 экспертизы и экспертной профилактики ДТП с участием пешеходов»  
 к.т.н., доцента кафедры НТТМ ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»  
 Васильева Ярослава Владимировича

Настоящим Актом повреждается, что результаты диссертационной работы Васильева Ярослава Владимировича на соискание ученой степени доктора технических наук были с 01 июня 2024 года приняты к внедрению в экспертных исследованиях по выплатам и используются в решении вопросов реконструкцией механизма ДТП с участием пешеходов.

При практическом применении в АО «Совкомбанк Страхование» были установлено, что использование методики расчета затрат скорости на КСВ на базе суррогатных КЭМ при определении фактической скорости ТС в момент наезда на пешехода позволило снизить полное время выполнения исследований (составления заключения) на 19%, при сходимости с результатами расчета скорости по видеозаписям с ошибкой не более 5%; применение методики методика расчета риска травмирования позволяет полностью исключить вероятностные выводы; внедрение методики оптимизации генетическим алгоритмом цифровой модели механизма ДТП выполненной при МОР показало снижение до 88% площади областей итоговых вариаций в цифровой модели, при сравнении результатов с общепринятыми методами итерационной оптимизации и методом Монте-Карло.

В практической деятельности АО «Совкомбанк Страхование» также используются базы данных по жесткостным характеристикам ТС и следующие публикации Васильева Ярослава Владимировича:

1. Васильев Я.В., Евтюков С.А. Справочник по экспертизе ДТП. Изд. 3-е переработ. и доп. / ИД «Петрополис», СПб, 2020 - 516 с.
2. Васильев Я.В., Евтюков С.А. Реконструкция и экспертиза ДТП в примерах / СПб.: Издательство «Петрополис», 2012. – 324 с.
3. Васильев Я.В. Анализ вторичного травмирования пешеходов в задачах дорожно-транспортной экспертизы // Грузовик. 2023. №1. С. 36-42. DOI: 10.36652/1684-1298-2023-1-36-42
4. Васильев Я.В. Методика расчета риска получения травм при реконструкции дорожно-транспортных происшествий с участием пешеходов // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 2 (97). С. 103–109. DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-2-103-109

Начальник Управления Расследований

АО «Совкомбанк Страхование»

/А.В. Дорогов/

23.01.2025

