

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Брянский государственный технический университет»

На правах рукописи



Бондаренко Ольга Игоревна

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ
БЕЗОПАСНОСТИ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ
ПРИ ОПРОКИДЫВАНИИ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов
и электрификация

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Антипин Дмитрий Яковлевич

Брянск – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА БЕЗОПАСНОСТИ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	10
1.1 Обзор аварийных ситуаций и крушений пассажирского железнодорожного подвижного состава	10
1.2 Направления исследований безопасности пассажирских транспортных средств в мировой практике.....	18
1.3 Обзор исследований в области безопасности пассажирского железнодорожного транспорта при аварийных ситуациях	20
1.4 Обзор исследований, направленных на повышение безопасности транспортных средств при их опрокидываниях	23
1.5 Обзор правил и нормативных документов по обеспечению безопасности пассажирских транспортных средств	25
1.6 Антропометрические измерительные устройства, используемые для оценки безопасности транспортных средств.....	29
1.7 Описание универсальных критериев травмирования в аварийных ситуациях на транспорте.....	34
1.8 Постановка цели и задач исследования	37
2 ОБОСНОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ОПРОКИДЫВАНИЯ ВАГОНА.....	39
2.1 Описание объекта исследования	39
2.2 Разработка методики определения безопасности пассажирского вагона при опрокидывании.....	41
2.3 Разработка компьютерной модели кузова пассажирского вагона.....	47
2.3.1 Разработка твердотельной модели пассажирского вагона	47
2.3.2 Разработка конечноэлементной модели кузова пассажирского вагона	52
2.3.3 Модель материала для конечноэлементной модели кузова вагона.....	55
2.3.4 Верификация конечноэлементной модели пассажирского вагона.....	56
2.4 Разработка моделей аварийного опрокидывания пассажирского вагона	64
2.5 Разработка модели антропометрического манекена для оценки безопасности пассажирского вагона	68
2.5.1 Описание натурального антропометрического манекена	68
2.5.2 Характеристики антропометрического манекена Hybrid III 50th Percentile Male.....	71
2.5.3 Разработка компьютерной модели антропометрического манекена.....	75

2.6. Верификация модели антропометрического манекена.....	78
Выводы по разделу 2	81
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ ПРИ ОПРОКИДЫВАНИИ.....	83
3.1 Применение разработанной методики для моделирования опрокидывания пассажирского вагона	83
3.2 Определение критериев травмирования	90
3.3 Разработка технических решений, направленных на повышение безопасности вагонов при опрокидывании	97
3.4 Выводы по разделу 3	99
4 РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ ПРИ ОПРОКИДЫВАНИИ И ОЦЕНКА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ	101
4.1 Применение технических решений повышения безопасности пассажирских вагонов при опрокидывании	101
4.2 Выбор параметров технических решений повышения безопасности пассажиров.....	102
4.3 Оценка безопасности пассажирского вагона при опрокидывании с учетом технических решений	106
4.4 Выводы по разделу 4	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	114
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	116
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ А	140
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	142
ПРИЛОЖЕНИЕ В	144
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	147
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	153
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	163
ПРИЛОЖЕНИЕ И	168
ПРИЛОЖЕНИЕ К	173
ПРИЛОЖЕНИЕ Л	176

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Обеспечение эффективной перевозки пассажиров железнодорожным транспортом напрямую связано с высокой концентрацией пассажиропотока, а, следовательно, уплотнению графика движения поездов. Это приводит к дополнительным нагрузкам на железнодорожные пути, полотно под ними и несущие конструкции вагонов и локомотивов, а также к увеличению износа подвижного состава [1]. В связи с этим увеличиваются динамические нагрузки, действующие на подвижной состав и пассажиров, что влечет за собой возрастание рисков угрозы безопасности жизни и здоровья пассажиров и членов поездных бригад. Перечисленные факторы учитываются при проектировании и эксплуатации подвижного состава, поэтому вновь разрабатываемый подвижной состав соответствует требованиям безопасности железнодорожных перевозок. Однако, количество происшествий на железнодорожном транспорте с каждым годом растет.

Сход подвижного состава с рельсов, сопровождаемый опрокидыванием вагонов, может привести к травмированию пассажиров и человеческим жертвам. Избежать травм и увечий в подобных аварийных ситуациях достаточно сложно. Это связано с конструктивными особенностями вагонов, принципами размещения в них пассажирских мест, отношением пассажиров к возможности возникновения ситуаций, что влечет за собой угрозу для жизни и здоровья пассажиров и персонала поездов [1].

Согласно Федеральному закону и техническому регламенту [2] и [3] современный подвижной состав железных дорог должен соответствовать мировым требованиям безопасности.

В соответствии со «Стратегией развития железнодорожного транспорта в РФ» [4] проблематика повышения безопасности пассажирских перевозок подвижным составом с каждым годом является более актуальной.

Степень разработанности темы.

Исследования в области безопасности железнодорожного транспорта неразрывно связано с динамикой подвижного состава. Значительный вклад в освещение вопросов динамики и безопасности подвижного состава внесли отечественные ученые ведущих научных школ: Л.Н. Никольский [5], Б.Г. Кеглин [6], Д.Ю. Погорелов [7], В.В. Кобищанов, Д.Я. Антипин [8], В.Н. Котуранов [9], Г.П. Бурчак, А.Н. Савоськин [10], В. Н. Филиппов [11], Ю.С. Ромен [12], В.В. Хусидов, Г.И. Петров, А.А. Хохлов [13], Э.С. Оганьян [14], Ю.П. Бороненко, А.М. Орлова [15], А.В. Третьяков [16], А.В. Смолянинов [17], А.Э. Павлюков [18], В.Ф. Лапшин [19], А.П. Буйносков [20], С.В. Мямлин [21], С.В. Вершинский [22], В.А. Лазарян [23], Е.П. Блохин [24], С.Д. Коршунов, А. Н. Скачков, С.Л. Самошкин [25], А.А. Юхневский [26], В.И. Беляев, Ю.М. Черкашин Д.Л. Ступин, А.Д. Кочнов [27] и др.

Цель и задачи. Цель работы заключается в разработке и научном обосновании технических решений, направленных на повышение безопасности пассажирских вагонов при опрокидывании. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи.

1 Создание методики определения безопасности пассажирских вагонов при опрокидывании.

2 Разработка и верификация компьютерной модели опрокидывания пассажирского вагона.

3 Оценка динамической нагруженности кузова пассажирского вагона при опрокидывании.

4 Разработка и верификация компьютерной модели антропометрического манекена для определения степени травмирования пассажиров при опрокидывании вагона.

5 Определение конструктивных особенностей подвижного состава, влияющих на степень травмирования пассажиров железнодорожного транспорта.

6 Выработка технических решений, снижающих вероятность и тяжесть травмирования пассажиров в аварийных ситуациях, в виде системы,

ограничивающей перемещение ручной клади при опрокидывании вагона, и элементов с пониженной жесткостью, располагающихся на боковых стенах и кромке стола купе вагона.

7 Оценка эффективности разработанных технических решений, направленных на повышение безопасности пассажирских вагонов.

Объектом исследования в работе является пассажирский вагон и его безопасность для пассажиров при опрокидывании.

Предметом исследования является повышение безопасности интерьера пассажирского вагона на основе разработанных технических решений.

Научная новизна.

1 Разработана методика анализа безопасности несущих конструкций пассажирских вагонов в условиях аварийных ситуаций, сопровождающихся опрокидыванием кузова вагона.

2 Выполнен анализ влияния конструктивных особенностей интерьера пассажирского салона на степень травмирования пассажиров в аварийных ситуациях с опрокидыванием вагона.

3 Разработаны твердотельные и конечноэлементные модели пассажирского вагона, исследовано напряженно-деформируемое состояние кузова вагона при опрокидывании.

4 Разработаны аварийные сценарии и компьютерные модели опрокидывания пассажирского вагона.

5 Разработана модель антропометрического манекена для исследования степени травмирования пассажиров железнодорожного транспорта в условиях опрокидывания вагона.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1 Предложенная методика определения безопасности пассажирских вагонов при аварийных ситуациях, связанных с опрокидыванием вагонов, может быть использована для улучшения механических свойств железнодорожного пассажирского подвижного состава на этапе проектирования.

2 Компьютерная модель опрокидывания пассажирского вагона дает возможность проводить приближенную оценку степени травмирования пассажиров, в том числе, с учетом влияния расположения пассажира в купе при опрокидывании вагона.

3 Разработанные модели опрокидывания пассажирского вагона могут быть использованы для доработки существующих и разработки новых межгосударственных стандартов.

Методология и методы исследования.

В теоретических исследованиях по определению динамической нагруженности конструкций вагонов при опрокидывании использованы методы твердотельного и конечноэлементного компьютерного моделирования. Для анализа прочности несущей конструкции кузова пассажирского вагона при действии статических и динамических нагрузок использован программный комплекс конечноэлементного анализа решения нелинейных задач механики деформируемого тела. Для оценки степени травмирования пассажиров применены антропометрические комплексы.

Положения, выносимые на защиту.

1 Методика определения безопасности пассажирских вагонов при опрокидывании.

2 Результаты оценки динамической нагруженности кузовов пассажирских вагонов при опрокидывании пассажирского вагона.

3 Математическая модель опрокидывания кузова пассажирского вагона.

4 Анализ уровней возможного травмирования пассажиров при опрокидывании вагона.

5 Технические решения, направленные на повышение безопасности пассажирских вагонов при опрокидывании.

6 Результаты теоретических исследований по обоснованию технических решений повышения безопасности пассажирских вагонов при опрокидывании.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность результатов работы подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов расчетов с данными натурных статических, динамических и поездных испытаний, проведенных АО НО «Тверской институт вагоностроения» (АО НО «ТИВ»), а также с динамическими испытаниями антропометрических манекенов, проведенных Федеральным управлением железных дорог США.

Основные результаты исследования докладывались на научно-технических и научно-практических конференциях. Наиболее значимые результаты диссертации докладывались на конференциях международного уровня: на всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых «Молодежь и наука: шаг к успеху» (ЮЗГУ, 2017 г.), 60-ой всероссийской научной конференции МФТИ (МФТИ, 2017 г.), XXIX международной конференции МИКМУС (ИМАШ РАН, 2018 г.), международной научно-практической конференций-конкурсе «Новые горизонты» (БГТУ, 2018, 2019, 2020 г.), II международной научно-практической конференции «САПР и моделирование в современной электронике» (БГТУ, 2018, 2019 гг.), научно-техническом семинаре молодых ученых УНИТ «Современные методы исследования динамики и прочности подвижного состава» (БГТУ, 2018 г.), VIII международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2019» (ГПС МЧС, 2019 г.), всероссийской научно-технической конференции «Транспорт Урала» (УрГУПС, 2019, 2020 гг.), всероссийской научной конференции «Проблемы и перспективы развития России: молодежный взгляд в будущее» (ЮЗГУ, 2020 г.), X международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте» (БелГУТ, 2020 г.).

По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, в том числе три работы опубликованы в журналах, входящих в Перечень изданий, рекомендованный ВАК России для публикации научных результатов диссертаций,

и три работы опубликованы в журналах, входящих в международную базу цитирования Scopus.

Основные результаты диссертационной работы отмечены призовыми местами при участии в гранте президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-2881.2018.8, и в программе поддержки коммерчески ориентированных научно-технических проектов молодых исследователей «УМНИК».

Получены патенты на полезные модели: № 193195 «Устройство для счета пассажиров», № 191688 «Кузов двухэтажного пассажирского вагона с местами для сидения с аварийными выходами».

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, состоящего из 165 наименований. Общий объем диссертации составляет 176 страниц машинописного текста, содержит 42 рисунка, 10 таблиц и 10 приложений.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА БЕЗОПАСНОСТИ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Обзор аварийных ситуаций и крушений пассажирского железнодорожного подвижного состава

В настоящее время железнодорожный подвижной состав является преимущественным средством транспортировки пассажиров и грузов на дальние расстояния в мире. Согласно статистике, аварийность на железнодорожном транспорте характеризуется количеством крушений поездов и аварий, числом погибших и пострадавших в них людей, а также количеством поврежденного или выбывшего из эксплуатации подвижного состава [28].

За последние двадцать лет участились крушения пассажирских поездов, сопровождаемые столкновениями с препятствиями на рельсах, сходом подвижного состава с рельс и опрокидыванием вагонов на откос насыпи железнодорожного полотна. Перечисленные аварии характеризуются травмированием различной степени тяжести и гибелью пассажиров и членов поездных бригад, а также повреждениями инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Основными причинами допущенных крушений и аварий на пассажирском подвижном составе являются опасные отказы технических средств железнодорожного транспорта, халатное отношение персонала к своим служебным обязанностям, недостаточный контроль за выполнением требований к эксплуатации подвижного состава, отсутствие систематической работы по предупреждению и устранению различных технических неисправностей [28].

При аварийных ситуациях пассажирского подвижного состава, сопровождаемых опрокидыванием вагонов, избежать травмирования и человеческих жертв практически невозможно. Большое влияние на это

оказывают конструктивные особенности несущих элементов кузовов пассажирских вагонов и интерьера салона.

Для определения степени тяжести последствий крушений подвижного состава, сопровождаемых опрокидыванием пассажирских вагонов, необходимо провести анализ произошедших железнодорожных катастроф за последние годы.

Крупная железнодорожная катастрофа произошла 7 июля 1998 года. В результате проезда на запрещающий сигнал светофора поезда №5202 на скорости 35 км/ч произошло его столкновение с электропоездом, следовавшим по маршруту № 6406 Бекасово-Сортировочная – Москва. Сходу с рельс подверглись два вагона электропоезда и путевая машина, которая столкнулась с поездом следовавшим по встречному направлению со скоростью 70 км/ч по маршруту Апрелевка – Наро-Фоминск. Четыре вагона поезда по маршруту Апрелевка – Наро-Фоминск сошли с рельсового полотна и три из них опрокинулись. Жертвами катастрофы стали машинист и пощник электропоезда и помощник машиниста мотовоза. Пострадало три вагона и путевая машина. Движение по участку было остановлено на 10 часов [29]. Благодаря тому, что в головных вагонах поезда Апрелевка – Наро-Фоминск не было пассажиров, а в электропоезде следовавшего в Москву пассажиры находились в основном в головных вагонах удалось избежать десятков жертв аварии.

17 марта 2001 года в штате Айова, США, поезд, следовавший со скоростью 80 км/ч сошел с рельсовой колеи. Причиной крушения является разлом одного рельса. В результате локомотив отсоединился от вслед идущих вагонов, которые в последствии были наклонены и опрокинуты (рисунок 1.1). В поезде находились 225 пассажиров и 16 членов локомотивной бригады и обслуживающего персонала. В результате крушения погиб один пассажир, 98 человек госпитализированы с травмами разной степени тяжести [30].

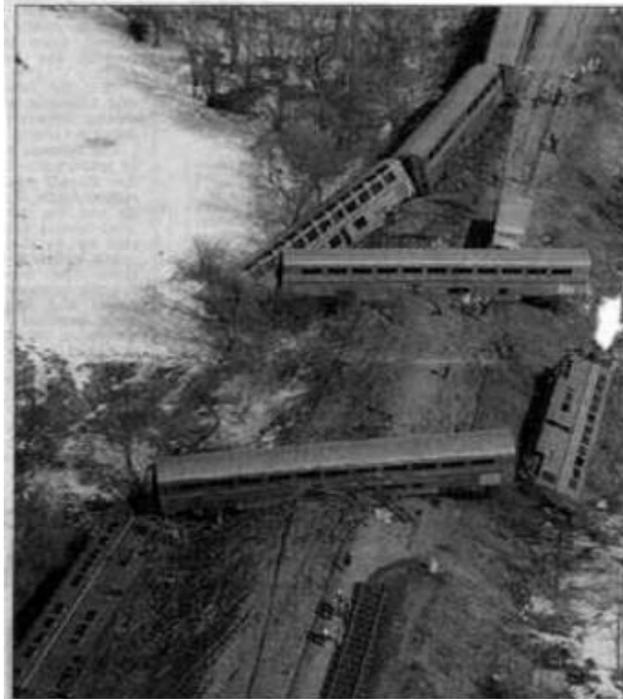


Рисунок 1.1 – Последствия аварии в штате Айова, США

29 июля 2002 года пассажирский поезд, следовавший из Чикаго в Вашингтон, состоявший из 13 вагонов и двухсекционного локомотива, сошел с рельс. В результате 11 вагонов потеряли контакт с рельсами, а 4 вагона опрокинулись на бок (рисунок 1.2). В результате аварии 97 человек получили ранения, в том числе 30 – серьезные [31].



Рисунок 1.2 – Последствия аварии в Вашингтоне, США

6 ноября 2004 года лондонский поезд, следовавший со скоростью 160 км/ч столкнулся с автомобилем, находящимся на железнодорожных путях. Поезд включал двухсекционный локомотив и восемь пассажирских вагонов. Удар с автомобильным средством привел к сходу с рельсовой колеи ведущей колесной пары (рисунок 1.3). В результате катастрофы погибли 6 человек, около 150 человек получили ранения и травмы различной степени тяжести [32].



Рисунок 1.3 – Последствия катастрофы в Лондоне

27 ноября 2009 года на границе Новгородской и Тверской областей в результате взрыва произошел сход трех вагонов скоростного поезда «Невский экспресс» сообщением Москва – Санкт-Петербург (рисунок 1.4). На момент катастрофы в поезде находились 682 человека, из которых 661 пассажир. Первые десять вагонов не пострадали, вагоны № 2, 3 и 4 завалились набок, а вагон № 1 оторвался от состава, поднялся над рельсами, столкнулся с тремя бетонными опорами ЛЭП и ударился в откос своей торцевой частью, остановившись на расстоянии 750 м от вагона предпоследнего. Большинство из погибших пассажиров ехали как раз в этом вагоне. В общей сложности жертвами крушения стали 28 человек, более 130 получили ранения [33].



Рисунок 1.4 – Последствия крушения в Новгородской области

7 июля 2013 на 1461 км перегона Кисляковская – Крыловская Крыловского района Краснодарского края сошли с рельсов 11 вагонов, из которых пять упали на железнодорожное полотно (рисунок 1.5). 13 человек в тяжелом состоянии были доставлены в больницы [34].



Рисунок 1.5 – Последствия схода с рельс поезда в Краснодарском крае

24 июля 2013 года крупная железнодорожная катастрофа унесла 79 жизней, около 150 человек получили травмы и увечья различной степени. На высокоскоростной железнодорожной магистрали, на расстоянии менее пяти километров от станции Сантьяго-де-Компостела, крушение потерпел поезд, шедший по маршруту Мадрид – Ферроль (рисунок 1.6). С рельсов сошли восемь вагонов данного поезда. Так как авария произошла на большой скорости,

множество людей получили травмы и погибли в результате опрокидывания вагонов [35].



Рисунок 1.6 – Последствия железнодорожной катастрофы в Испании

9 апреля 2014 года на участке Макат - Сагиз в Атырауской области вагоны пассажирского поезда № 42 Алматы – Атырау сошли с рельсов. Состав поезда состоял из 19 вагонов: трех почтовых и 16 пассажирских, с пути сошли 13 вагонов, семь из них упали на бок. К счастью, все пассажиры и обслуживающий персонал живы, 33 человека получили травмы [36].

Серьезная авария произошла 31 июля 2015 года. При движении пассажирского поезда Москва-Белгород через железнодорожный переезд в районе поселка Прохоровка в Белгородской области произошло его столкновение с грузовым автомобилем. При этом удар был настолько сильным, что локомотив опрокинулся, а часть вагонов сошли с рельс. Пострадало более двух десятков человек, четверо из них были госпитализированы [37].

Одна из трагичных аварий произошла 13 мая 2015 года. При движении по маршруту из Вашингтона в Нью-Йорк, в котором находились более двухсот пассажиров и пять членов экипажа, пассажирский поезд сошел с рельс. В результате аварии опрокинулись восемь из десяти вагонов. Трагедия унесла жизни восьми человек, госпитализация потребовалась более сорока пассажирам [38].

8 августа 2015 года четыре вагона пассажирского поезда «Екатеринбург – Адлер» сошли с рельсов в Мордовии. Два вагона опрокинулись, травмы получили два человека [39].

20 ноября 2016 на севере Индии в штате Уттар-Прадеш 14 вагонов пассажирского поезда сошли с рельсов. В результате 116 пассажиров погибли, более 200 ранены [40].

17 июня 2018 года в Жамбылской области Казахстана в 50 км от города Шу с рельс сошли 8 пассажирских вагонов, в том числе 2 с опрокидыванием (рисунок 1.7). В результате схода поезда с рельсов погиб 1 пассажир, 14 человек пострадали, среди них – 4 ребенка [41].



Рисунок 1.7 – Последствия аварийного опрокидывания в Казахстане

19 августа 2018 года при движении пассажирского поезда следовавшего из Пури в Хардвар, в индийском штате Уттар-Прадеш сошли с рельсов шесть вагонов поезда. В результате аварии погибло более двадцати человек., а за медицинской помощью обратилось более тысячи. Основная причина катастрофы – проведение ремонтных работ на пути следования поезда. [42].

Анализ крупномасштабных аварий XIX в. показал, что при опрокидывании пассажирского подвижного состава большинство травм пассажиры получают не из-за разрушения несущих конструкций подвижного состава, а вследствие взаимодействия с элементами интерьера вагона [43]. Следует отметить, что тяжесть

получаемых травм не всегда зависит от скорости движения подвижного состава на момент зарождения аварийной ситуации, а в большей степени определяется сценарием развития аварийной ситуации [43].

Для Российской Федерации, на железнодорожном транспорте статистика смертности составляет 0,7 смертей на 1,5 млрд. пассажиро-км, что является достаточно невысоким показателем. Но пассажирские перевозки железнодорожным транспортом, имеющие смертельный исход настолько редки, что одна авария резко меняет статистику. Например, устраняя одну аварийную ситуацию на пассажирском железнодорожном транспорте, пассажиры в поездах до нескольких десятков раз безопаснее, чем пассажиры в автотранспортных средствах [44].

В связи с нарастающей тенденцией развития высокоскоростного железнодорожного транспорта в стране большое внимание при проектировании пассажирского подвижного состава уделяется недопущению произвольного опрокидывания кузова вагона. В качестве основного критерия для обеспечения устойчивости вагона выступает коэффициент запаса устойчивости. Основные факторы, которые оказывают влияние на коэффициент являются максимальная скорость движения, ветровые и центробежные нагрузки, поперечные смещения от вертикальной оси вагона центров тяжести кузова вагона и тележки в результате относительных поперечных зазоров между ними и боковых наклонов кузова за счет односторонних просадок рессорных комплектов при действии боковых опрокидывающих моментов [45].

По результатам динамических испытаний определяется динамический показатель – допустимый коэффициент запаса поперечной устойчивости вагона в кривых от опрокидывания как для порожнего вагона, так и для вагона с пассажирами:

$$k_{y.o} = \frac{P_{ст}}{P_{дин}} \geq [k_{y.o.}], \quad 1.1$$

где $P_{ст}$ – статическая вертикальная сила давления колеса на рельс; $P_{дин}$ – динамическая вертикальная сила давления колеса на рельс, вызванная действием

поперечных сил с учетом перемещений центров тяжести кузова и тележки; $[k_{y.o}] = 1,4$ – допускаемый коэффициент запаса устойчивости от опрокидывания [46].

Таким образом, проведя анализ крупных аварий можно отметить, что аварии, связанные со сходом с рельс пассажирского подвижного состава и опрокидыванием вагонов на откос насыпи, имеют высокую степень травмирования и гибели пассажиров. Пассажирский поезд, безусловно, самый удобный, практичный и дешёвый вид транспорта. И по статистике на сегодняшний день – один из самых безопасных. Однако с каждым годом количество катастроф и аварий на железнодорожном транспорте увеличивается из-за халатности как обслуживающего персонала поездов и диспетчеров железнодорожных станций, так и устаревших конструкций подвижного состава.

1.2 Направления исследований безопасности пассажирских транспортных средств в мировой практике

В настоящее время исследования ученых, направленные на обеспечение безопасности пассажирских транспортных средств, можно разделить по следующим направлениям:

1 экспериментальные натурные испытания транспортных средств на обеспечение безопасности пассажиров при аварийных ситуациях позволяют с высокой достоверностью подтвердить или опровергнуть результаты теоретических расчетов, а также выявить влияние существенных факторов и допущений, принятых в математических моделях. В настоящее время в большинстве случаев система сертификации транспортных средств требует проведения практических сертификационных испытаний [47]. При этом следует обращать особое внимание на корректность учета, регистрации и поддержания условий испытаний, поскольку объективность результатов испытаний существенно зависят от условий их проведения. Также следует учитывать, что подобного рода испытания являются трудоемкими, дорогостоящими и требуют использования специализированного испытательного полигона;

2 реконструкция и расследование аварийных ситуаций, произошедших на пассажирских транспортных средствах. Данное направление применимо для проведения исследования и реконструкции аварийных ситуаций на транспорте с выявлением причинно-следственной связи факторов, которые повлекли за собой аварийную ситуацию. Основой выполнения реконструкции аварийных ситуаций служат инженерные принципы и законы физики, используемые для расчета необходимых ключевых значений. Главной задачей при реконструкции аварий является выявление механизма формирования аварийной ситуации в едином масштабе времени для всех участников аварии. Результаты решение подобной задачи существенно зависят от объема и качества фактической информации обо всех факторах аварийной ситуации и от возможностей расчетного моделирования сложных процессов силового взаимодействия транспортных средств с окружающей средой, друг с другом и их движения при аварии;

3 моделирование аварийных ситуаций, которое можно разделить на:

– натурное моделирование аварийных ситуаций с использованием объектно-ориентированных антропометрических устройств;

– математическое моделирование, к которому относится твердотельное и гибридное моделирование с использованием конечноэлементных моделей с граничными элементами;

– моделирование аварийных ситуаций в условиях, приближенных к реальным, включающих эвакуацию пассажиров из транспортных средств в аварийных ситуациях.

Развитие компьютерных технологий, появление вычислительных станций и использование специализированного программного обеспечения позволяют получать адекватные результаты моделирования, качественно и количественно близкие к результатам натуральных испытаний, в рамках допускаемых погрешностей. Проведение большого количества вычислительных экспериментов позволяет спрогнозировать поведение объекта в заданных условиях с различными вариациями граничных условий. Результаты моделирования учитываются на стадии проектирования транспортных средств и позволяют сократить цикл

изготовления изделия за счет отсутствия этапов доработки конструкции по результатам промежуточных испытаний.

Современные программные комплексы на основе метода конечных элементов позволяют разрабатывать модели любой сложности, учитывать все особенности конструкций транспортных средств, решать практические задачи по оценке пассивной безопасности и прочности конструкций транспорта. Производители транспортных средств используют такие расчетные системы как ANSYS [48], LS-DYNA [49], Abaqus [50], Pam-Crash [51] и т.п. Эти программы представляют собой удобную среду для проведения численных расчётов и позволяют получать самые различные данные о состоянии конструкции транспортных средств, пассажирах, ускорениях и деформациях.

Методы компьютерного моделирования позволяют учесть недостатки других методов и провести за ограниченное время большое количество имитационных экспериментов [52].

1.3 Обзор исследований в области безопасности пассажирского железнодорожного транспорта при аварийных ситуациях

Стандарты безопасности для условий крушения пассажирских транспортных средств, распространяющихся на железных дорогах РФ и стран СНГ, а также европейских железных дорогах, включают требования по обеспечению устойчивости и прочности несущих конструкций кузовов транспортных средств к ударным нагрузкам, возникающих в аварийных ситуациях, а также обеспечение безопасности пассажиров поезда и членов поездных бригад. Стандарты условно можно разделить на две группы. К первой группе относятся стандарты проектирования, которые включают в себя основные конструктивные требования. Ко второй группе относятся эксплуатационные стандарты, которые регламентируют нормативные значения предельные значения внешних факторов и вероятность нанесения травм пассажиров в реальных аварийных ситуациях[53].

Теоретические исследования, направленные на оценивание безопасности кузовных конструкций пассажирских транспортных средств при аварийных ситуациях, имеют три направления.

Первое направление заключается в моделировании сценариев аварийных ситуаций. При этом осуществляется твердотельное или гибридное моделирование конструкции кузова транспортного средства, связи между элементами которой задаются посредством упруго-диссипативных и шарнирных элементов. Решение подобного рода задач осуществляется посредством промышленных программных комплексов, таких как LS-DYNA [49], ANSYS, Nastran, MSC.Adams [54], SolidWorks Motion [55], SIMPACK [56], MEDINA [57], «Универсальный механизм» [58]. Отличительной особенностью перечисленных программных комплексов является возможность генерировать дифференциальные уравнения движения объектов в пространстве и моделирование динамических процессов с визуализацией получаемых результатов.

В России исследованиями аварийных ситуаций пассажирского подвижного состава занимаются в научных организациях и университетах, таких как: ВНИКТИ, ВНИИЖТ, ТИВ, БГТУ, ПГУПС, ДИИТ, РУТ (МИИТ), УрГУПС и др.

Вторым направлением теоретических исследований в области безопасности пассажирского подвижного состава железных дорог является оценка динамической нагруженности кузовов вагонов в аварийных ситуациях. При этом предоставляется возможность решать следующие задачи: статическая задача, квазистатическая с использованием программных комплексов MSC.Nastran, Femap, Ansys, COSMOSWorks и нелинейная динамическая задача с использованием программных продуктов MSC.Dytran, NX, LS-DYNA.

При проведении подобного рода исследований применяется метод конечных элементов, который позволяет учитывать особенности конструкции транспортного средства, нелинейных свойств материала, возможность пластического деформирования элементов конструкции.

Указанным выше вопросам посвящен ряд отечественных исследований отраженных в трудах ученых: Петрова Г.И., Хусидова В.В., Хохлова А.А. [13] – РУТ (МИИТ), Мямлина С.В. [21] – ДИИТ, Погорелова Д.Ю. [7], Антипина Д.Я. – БГТУ [59], Орловой А.М. [57], Бороненко Ю.П. [60] – ПГУПС, Павлюкова А.Э. [19], Бачурина Н.С [61] – УрГУПС и др.

Динамическая нагруженность пассажирского подвижного состава в условиях крушений поездов с использованием метода конечных элементов (МКЭ) отражена в трудах Кобищанова В.В., Антипина Д.Я. [62], Серпика И.Н. [63], Лозбинева В.П. [64], Лозбинева Ф.Ю. [65]. Множество работ в области прогнозирования прочности конструкций подвижного состава с использованием программных комплексов конечноэлементного моделирования выполнены в МИИТе – Котуранов В.Н. [9], Филиппов В.Н. [11], Овечников М.Н. [66] и др., в ПГУПСе – Бороненко Ю.П., Третьяков А.В. [16], Битюцкий А. А. [67] и др., в УрГУПСе – Лапшин В.Ф. [18], Смольянинов А.В. [17], Ивашова Т.В. [68] и др., в ДИИТе – Бубнов В.М., Мямлин С.В. [69] и др.

В указанных работах рассматривается способность несущей конструкции кузовов пассажирских вагонов противостоять пластическим деформациям, вызванными высокими напряжениями при аварийных ситуациях, связанных с крушением поездов.

Третьим направлением теоретических исследований является оценка травмирования пассажиров транспортных средств при аварийных ситуациях.

Значительный вклад в исследования, направленные на повышение безопасности пассажиров в условиях аварийных ситуаций и крушений подвижного состава внесли ученые Юхневский А.А. [26], Беляев В.И., Ступин Д.Л., Кочнов А.Д. [27,70], Кобищанов В.В. Антипин Д.Я. [71], Булычев М.А., Шорохов С.Г. [72-73].

1.4 Обзор исследований, направленных на повышение безопасности транспортных средств при их опрокидываниях

На сегодняшний день обеспечением безопасности пассажиров транспортных средств при аварийных опрокидываниях занимаются в лабораториях, испытательных центрах и полигонах всего мира.

Исследованиям безопасности при аварийных опрокидываниях автотранспортных легковых средств посвящены работы: M. Linstromberg, G. Scholpp, Ol. Scherf – Германия [74], Yv. Lund – США [75].

В работе [76] решались задачи исследования факторов, которые играют значительную роль при аварийном опрокидывании и описывают поведение конструкций транспортных средств. В работе рассматривается возможность применения оптимизированных систем защиты автомобилей от опрокидывания, учитывается кинематика движения манекенов водителя и пассажира, выявлены критические моменты при опрокидывании.

Работы [77-78] посвящены созданию методики определения пассивной безопасности кузовов легковых и грузовых автомобилей в условиях опрокидывания на основе результатов виртуального моделирования натуральных испытаний и расчетам предельного состояния несущих конструкций с применением уточненных зависимостей.

Теоретическим исследованиям, направленным на обеспечение пассивной безопасности автотранспортных средств для перевозки пассажиров, посвящены работы российских и зарубежных ученых:

Ломакин В.В. в своей работе [79] отметил основные конструктивные особенности современных автомобилей, которые оказывают существенное влияние на их безопасность. Также в работе уделено внимание обеспечению безопасности автомобилей на основе нормативной документации, приводятся основные расчетные критерии определения несущей способности элементов конструкции транспортных средств. Орлов Н.М., Багичев С.А., Тумасов Е.В., Вашурин А. С. [80-83] – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, в работах которых проведено

компьютерное моделирование отдельных образцов несущих элементов и их соединений в кузовах транспортных средств в соответствии с правилами проведения испытаний транспортных средств. Даны рекомендации о проведении натурного опрокидывания отдельных секций кузовов. Подробно рассматривается процесс вращения автобуса, который происходит при ударе автобуса о земляное полотно. Сделаны выводы о влиянии опрокидывания на деформацию несущей конструкции автобуса.

В работах S.D. Pankaj, A. Chawla, D. Mohan, S.R. Pawar, Ch. Pathak, V. Belsare, M. Kulkarni – Индия [84–87] разработаны конечноэлементные модели пассажирских автобусов, рассмотрено аварийное опрокидывание и деформация крыши автобуса с использованием широко используемого специализированного программного обеспечения для виртуального моделирования опрокидывания автотранспортных средств. Определялась зона безопасности - «останочное пространство» для пассажиров. Также в работах описана кинематика манекена и возможное травмирование пассажиров при опрокидывании в различных их положениях. Проводился анализ математической модели опрокидывания автотранспортного средства как в груженом, так и в порожнем состоянии на твердую поверхность в соответствии с правилами [88]. В работе [84] описано 4 схемы опрокидывания транспортного средства. Выявлено, что полная энергия транспортного средства постоянна. Кинетическая энергия падает, а после переходит во внутреннюю энергию. При добавлении массы пассажира и массы багажа центр тяжести смещается вверх, и энергия, приложенная к системе, увеличивается на 37%. В схеме транспортного средства с массой пассажиров и массой багажа приводит к увеличению угловой скорости перед ударом на 5%. Выведен параметр повреждения пассажиров при опрокидывании транспортного средства, включающий критерии травмирования:

$$RIP = 0,3\left(\frac{HIC}{1000}\right) + 0,25\left(\frac{TTI}{85}\right) + 0,25\left(\frac{VC}{1}\right) + 0,2\left(\frac{PSF}{6000}\right), \quad 1.2$$

где *HIC* – *Head Injury Criterion* – критерий повреждения головы; *TTI* – *Thoracic Trauma Index* - индекс травмы грудной клетки; *VC* – *Viscous Criterion* – критерий вязкости; *PSF* – *Pubic Symphysis Force* – нагрузка на лонное сочленение.

В работе [84] описывается методика моделирования испытания опрокидывания автобуса в промышленном пакете анализа систем безопасности MADYMO для исследования кинематики пассажиров с использованием моделей манекенов EuroSID, а также воздействие конструктивных особенностей автобуса на пассажиров.

В работе G. Belingardi [89] – Италия, с использованием программного пакета для анализа систем безопасности пассажиров транспортных отраслях, выполнена оценка сопротивления конструкции и рисков травмирования пассажиров автобусов с учетом массы пассажиров.

В работе D.A. Micu, M.D. Iozsa [90-91] – Румыния, выполнено компьютерное моделирование испытания на опрокидывание секции несущей конструкции пассажирского автобуса в условиях маятникового испытания. Получены данные о пластической деформации элементов конструкции, диаграмма напряженно-деформируемого состояния.

Работы L. Prochowski, K. Zielonka [92] – Польша и K. T.Gursel, S.Gursesli, M. Kartanoğlu, Ö. Küçük, C. Baykasoglu, E. Sunbuloglu, S. E. Bozdog [93-95] – Турция, посвящены компьютерному моделированию аварийных ситуаций с опрокидыванием автобусов в соответствии с [88].

В работе С.-С. Liang, G.-N. Le [96] – Тайвань, представлена методика для проектирования несущей конструкции автобусов, которая позволит снизить травмирование пассажиров при аварийном опрокидывании автобуса. Разработан прототип автобуса с оптимизированными параметрами, соответствующий требованиям стандарта.

1.5 Обзор правил и нормативных документов по обеспечению безопасности пассажирских транспортных средств

Аварийные ситуации с опрокидыванием пассажирских вагонов наносят большой урон не только пассажирам и членам поездных бригад, но и самой конструкции подвижного состава и инфраструктуре железной дороги. Большое

внимание всегда уделялось прочности несущей конструкции подвижного состава, а учет нагрузок, действующих при авариях и катастрофах на пассажиров, являлось задачей второстепенной. Последствия крупных крушений на железнодорожном транспорте в последние годы показывает острую необходимость выдвигания на первый план решения задач определения нагрузок на пассажиров при авариях [97].

В настоящее время не существует четких требований, предъявляемых к проведению испытаний на опрокидывание пассажирских вагонов в условиях аварийных ситуаций.

Национальное управление безопасностью движения на дорогах в США выпускает Федеральный стандарт безопасности автотранспортных средств, которым должны соответствовать производители пассажирских наземных транспортных средств. В настоящее время федеральным правилом применимым к опрокидыванию автотранспортных средств является FMVSS 220 и FMVSS 216 [98-99]. FMVSS 220 – защита транспортных средств от опрокидывания. FMVSS 216 – обязательное требование для транспортных средств, описывающее сопротивление элементов крыши пассажирских транспортных средств [99].

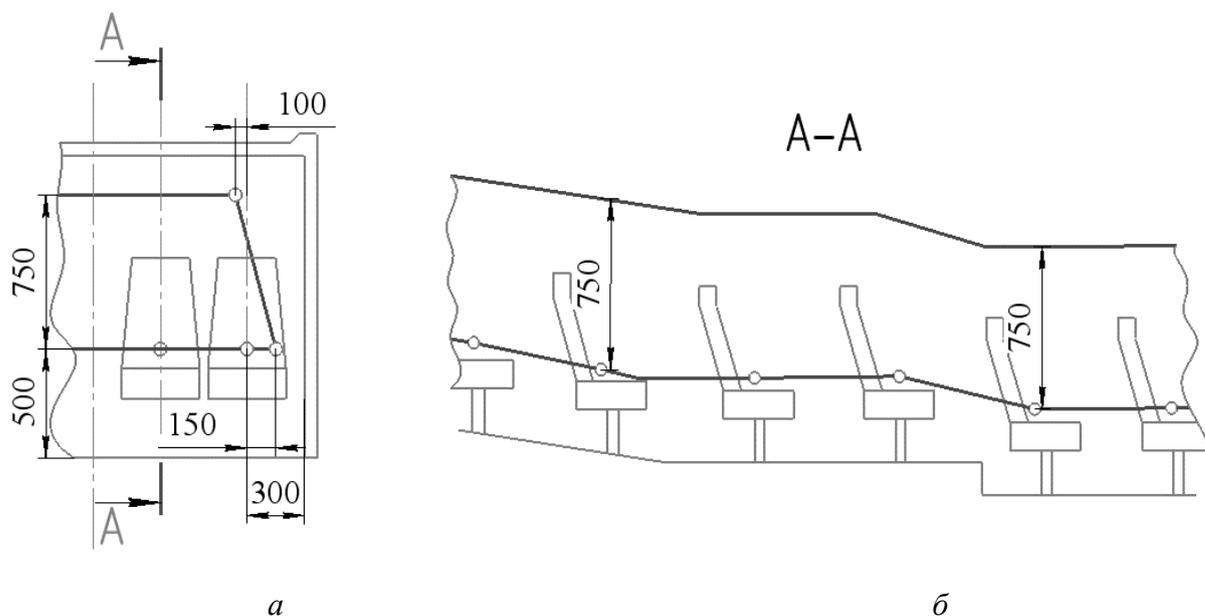
При испытаниях в соответствии со стандартом FMVSS 216 крыша транспортного средства нагружается квазистатическими усилиями и определяются значения сопротивления элементов несущей конструкции. Такие испытания не включают силы и скорости, возникающие в условиях реальной аварии, поэтому приложенные усилия являются значительно заниженным в сравнении с реальными, возникающими усилиями в аварийной ситуации с опрокидыванием кузова.

Государственный стандарт Российской Федерации [88], касающиеся официального утверждения крупногабаритных пассажирских транспортных средств в отношении прочности верхней части конструкции, регулируют сопротивляемость к деформациям конструкций транспортных средств в условиях опрокидывания на боковую стену. Правила регламентируют объем пассажирского салона, зоны безопасности – «остаточное пространство», образуемое путем перемещения поперечной вертикальной плоскости сечения кузова транспортного средства. Это контролирует обеспечение безопасности пассажиров транспортных средств в аварийных ситуациях, связанных с опрокидыванием транспортного средства. Государственный стандарт [88] распространяются на одноэтажные

пассажирские транспортные средства вместимостью более 16 сидячих или стоячих пассажиров, исключая водителя и членов экипажа [88].

Целью этого положения является обеспечение устойчивости конструкции кузова транспортного средства, таким образом, чтобы остаточный объем пассажирского салона (остаточное пространство) (рисунок 1.8), полностью экипированного и загруженного пассажирского салона, оставался невредимым после аварийного опрокидывания. При этом ни один элемент транспортного средства, который находится за пределами остаточного пространства в начальный момент опрокидывания не должен заходить в остаточное пространство, и так же ни один элемент, который находится внутри остаточного пространства не должен выступать за пределы указанного пространства и за пределы деформированной конструкции кузова после завершения опрокидывания. Пределы остаточного пространства в пассажирском салоне определяются созданием вертикальной поперечной плоскости внутри транспортного средства [88].

При проведении испытаний с опрокидыванием транспортных средств в соответствии с [88] выбирается боковая сторона транспортного средства, которая является более опасной по отношению к асимметричному остаточному пространству. Это связано с конструктивными особенностями транспортных средств и вариантами размещения оборудования.



а – поперечное сечение, б – продольное сечение
Рисунок 1.8 – Остаточное пространство

В соответствии с формулой, указанной в [88], за счет скорости вращения энергия прикладывается ко всем частям транспортного средства:

$$E = 0,75M \cdot g \cdot h, \quad 1.3$$

где M – масса кузова автобуса без нагрузки, g – ускорение свободного падения, h – расстояние по вертикали между центром тяжести транспортного средства в положении свободного падения и центром тяжести транспортного средства, которое кинематически поворачивается до положения контакта с землей. Рассматриваются четыре различных сценария для исследования динамического состояния конструкции транспортного средства:

1 модель транспортного средства, смоделирована без учета конструкции пассажирских кресел, массы пассажиров и массы багажа, в соответствии с [88];

2 модель транспортного средства смоделирована с учетом конструкции пассажирских кресел. При этом сценарии проводится анализ поведения конструкции кресел при аварийной ситуации;

3 транспортное средство моделируется с конструкцией пассажирских кресел и массой пассажиров;

4 транспортное средство моделируется с пассажирскими креслами, учитывает массу пассажира на кресле, а также массу багажа [100].

В настоящее время существует различное множество документов, правил и инструкций по экстренной эвакуации пассажиров из транспортных средств при возникновении аварийных ситуаций и крушениях на транспорте. Значительную роль при решении задачи по обеспечению безопасности пассажиров играют конструктивные решения, позволяющие ускорить эвакуацию, в том числе и травмированных пассажиров.

FRA [101], требует, чтобы пассажирские железнодорожные вагоны соответствовали обширным предписаниям: требованиям к конструкции аварийных выходов, их количество, тип, расположение, идентификация и их работа, а также тип, расположение, работа и продолжительность аварийного освещения. Национальное управление безопасности дорожного движения США (*NHTSA*)

[102- 103], а также требует, чтобы пассажирские наземные транспортные средства соответствовали конкретным требованиям к аварийным выходам в зависимости от типа и размера транспортного средства [104]. Общий принцип, независимо от типа транспортного средства общественного транспорта, заключается в том, что наличие четко обозначенных аварийных выходов, которыми легко пользоваться, позволит пассажирам во время аварийной ситуации эффективно и действенно эвакуироваться в безопасное место [105].

Кроме того, правила FRA содержат минимальные требования для надлежащего обучения персонала крупногабаритных пассажирских транспортных средств процедурам эвакуации пассажиров во время чрезвычайных ситуаций. Однако, в требованиях не устанавливают максимальное время экстренной эвакуации пассажиров из транспортного средства.

1.6 Антропометрические измерительные устройства, используемые для оценки безопасности транспортных средств

Антропометрические измерительные устройства являются механической заменой человека, предназначенной для оценки потенциальной защиты пассажиров при моделировании или воспроизведении аварийных ситуаций на транспорте [106].

В настоящее время существует различное множество антропометрических устройств для выявления безопасности конструкций транспортных средств в различных аварийных ситуациях, которые называются манекенами. Антропометрические манекены получили достаточно широкое применение в таких областях исследования как: аэрокосмонавтика [107-108], авиация [109], автомобильный [110] и железнодорожный [111] транспорт. Разработка антропометрических манекенов началась в середине прошлого столетия и не завершается по сей день. Наиболее успешные в применении типы антропометрических манекенов приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Антропометрические манекены, используемые для краш-тестов пассажирских транспортных средств

№ п/п	Год выпуска	Наименование	Особенности	Недостатки
1	2	3	4	5
1	1949	Sierra Sam 95-процентильный мужчина (лобовый удар)	Геометрические и весовые характеристики подобны человеческому телу. Суставы выполнены в виде шарнирных соединений. Высокая прочность.	Жесткость элементов манекена не соответствует жесткости частей человеческого тела. Ограниченное оснащение.
2	1966	VIP Series, 5-процентильная женщина, 50-процентильный мужчина, 95-процентильный мужчина (лобовый удар)	Геометрические и весовые характеристики подобны человеческому телу. Суставы выполнены в виде шарнирных соединений. Шея выполнена из резиновых элементов. Может использоваться для измерения ускорения головы и грудного отдела, а также нагрузки на бедренную кость в аварийных ситуациях.	Жесткость элементов манекена не соответствует жесткости человеческого тела. Ограниченное оснащение. Отсутствует возможность многократного использования.
3	1967	Sierra Stan, 50-процентильный мужчина (лобовый удар)	Геометрические и весовые характеристики подобны человеческому телу. Суставы выполнены в виде шарнирных соединений. Сегментированная структура шеи. Грудная клетка изготовлена из пластических элементов. Манекен предназначен для измерения ускорения головы, грудного отдела, позвоночника, а также нагрузок, действующих на бедренную кость в аварийных ситуациях.	Жесткость элементов манекена не соответствует жесткости человеческого тела. Ограниченное оснащение.
4	1968	Sophisticated Sam, 50-процентильный мужчина (лобовый удар)	Элементы ключиц, плечевых, лучевых, локтевых, бедренных, большеберцовых, малоберцовых, коленных костей поддаются деформациям в соответствии с реальными костными тканями человеческого тела.	Ограниченное оснащение.
5	1970	Sierra Susie 5-процентильная женщина	Геометрические и весовые характеристики подобны человеческому телу. Суставы выполнены в виде шарнирных соединений. Сегментированная структура шеи. Элементы грудной клетки выполнены из пластических элементов. Манекен предназначен для измерения ускорения головы и грудного отдела позвоночника, а также нагрузки на бедренную кость.	Жесткость элементов манекена не соответствует жесткости человеческого тела. Ограниченное оснащение. Для регистрации силы изгиба шеи манекен нуждается в доработке.

1	2	3	4	5
6	1972	GM Hybrid II 50-перцентильный мужчина (лобовый удар)	Применены элементы от VIP Series 50- перцентильный мужчина и Sierra Stan. Геометрическая форма, весовые характеристики тела манекена и диапазон движений некоторых суставов подобны человеческому телу. Высокие показатели надежности. Возможность многократного использования.	Жесткость элементов манекена не соответствует жесткости человеческого тела. Ограниченное оснащение.
7	1976	GM Hybrid III 50-перцентильный мужчина (лобовый и задний удары)	Разработан по контракту NHTSA. Геометрическая форма, весовые характеристики соответствуют человеческому телу. Достоверные сведения выявлены от нагрузки головы, шеи, грудной клетки, элементов коленных суставов. Широкое оснащение. Поза в положении сидя подобна позе человеческого тела. Высокие показатели надежности. Возможность многократного использования.	Не подходит для исследований бокового удара.
8	1979	NHTSA / SID 50-перцентильный мужчина (боковой удар)	Модифицированный Hybrid II с конструкцией грудного отдела для нагрузок, испытываемых при боковом ударе.	Отсутствуют элементы плеч и рук. Ограниченное оснащение. Не рекомендован ISO для испытаний на боковой удар.
9	1987	Hybrid III 5-перцентильная женщины, 95- перцентильный мужчина и 6-летний ребенок (лобовый и задний удар)	Разработаны на основе манекена 50- перцентильного мужчины Hybrid III и имеют такой же уровень соответствия, верификации и полноты измерений.	Не применим к испытаниям на боковой удар
10	1989	EuroSID-1 50-перцентильный мужчина (боковой удар)	Модифицированный (шея, грудь, живот, таз) манекен Hybrid III для испытаний на боковой удар.	Конструкция плеча блокирует прогиб элементов ребер. Ограниченное оснащение.
11	1989	BioSID 50-перцентильный мужчина (боковой удар)	Модифицированный манекен Hybrid III, для испытаний на боковой удар. Тазовая часть модифицированной конструкции манекена EUROSID-1. Обширное оснащение регистрирующими приборами.	Возможность проведения испытаний только на боковой удар. Расхождение результатов испытаний.
12	1990	Crabi 6-, 12-, и 18- месячный ребенок	Предназначен для оценки взаимодействия подушки безопасности с детскими удерживающими устройствами. Модифицированный шейный отдел позвоночника.	Требуется доработка головной части манекена.

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5
13	1998	SID - Н III 50-перцентильный мужчина (боковой удар)	Голова и шея манекена подобна модели Hybrid III 50-перцентильный мужчина. Предназначен для испытания при боковом ударе о столб в соответствии с регламентом NHTSA.	Не имеет элементы плеч и рук. Ограниченное оснащение. Отсутствуют рекомендации ISO для испытаний на боковой удар.
14	1999	SID II 5-перцентильная женщины (боковой удар)	Геометрические характеристики подобны манекену BIOSID. Высокая точность измерений. Широкое оснащение.	Не предназначен для испытаний на лобовой удар.

Манекены под номерами 1-6 (таблица 1.1) в настоящее время не применяются в испытаниях на безопасность транспортных средств и являются устаревшими моделями. Манекены 8 и 13 нашли широкое применение в исследовательских центрах США и Австралии. Манекены 7 и 10 используются научными центрами Европейских стран, Японии и многими другими странами мира. Манекены 9, 11, 12 и 14 (таблица 1.1) используются научными организациями и лабораториями ведущих стран мира для проведения краш-тестов и оценки безопасности транспортных средств в аварийных ситуациях. Таким образом, в настоящее время для исследований безопасности транспортных средств используются манекены различной конфигурации.

Из большого количества манекенов можно выделить несколько типов актуальных в настоящее время и отличающиеся друг от друга геометрическими параметрами и характеристиками:

SID, *EuroSID* и *BioSID* используется для оценки травмирования человека в транспортных средствах и учитывает воздействие на грудную клетку, позвоночник и внутренние органы при боковых столкновениях [111]. *SID* имеет уникальную структуру грудной клетки, которая включает демпфирующие устройства, соединяющие стальные ребра с позвоночником. Основным недостатком подобного манекена является отсутствие возможности измерений нагрузок на шейный отдел позвоночника, плечо и брюшную полость. Элементы плеч и рук у манекена не предусмотрены [112].

BioRID (Rear Impact Dummy) предназначен для оценки травмирования шейного отдела позвоночника при ударе в заднюю часть транспортного средства. Используется производителями для разработки эффективных подголовников кресел транспортных средств [113].

Thor [114] имеет отличительное от других антропометрических манекенов количество датчиков на лицевой части, а также подробные позвоночные отделы и тазовую часть. В настоящее время производство манекена *Thor* прекращено.

Семейство манекенов *Hybrid*, характеристика которых выражается в процентилях. Используются 5-, 50-, 95-процентильные манекены, которые включают манекены женщин и мужчин различного возраста и телосложения. 5- процентильный манекен означает, что только 5 % популяции взрослых людей меньше, чем данный манекен [115]. Таким образом, 50-процентильный манекен *Hybrid III 50th Percentile Male* соответствует «среднестатистическому» взрослому мужчине и является самым распространенным манекеном для испытаний конструкции транспортных средств на безопасность [116].

Crabi [117] – манекен, описывающий ребенка возраста 6, 12, 18 месяцев, предназначенный для оценки травмирования детей подушками безопасности и безопасности удерживающих устройств транспортных средств.

Антропометрические манекены подобного рода позволяют с высокой точностью определить возможную степень травмирования людей в аварийных ситуациях на транспорте.

Большой вклад в развитие исследований безопасности транспортных средств на основе применения антропометрических манекенов внесли: Petrović Z. [118] – Сербия, Patel D. [119] – Индия, Henderson B. [120] – Великобритания, Perez O. [109] – Испания, Tabiei Al. Lawrence Ch., Fasanella Ed., Kan C.-D., Marzougui D., Bedewi N.E. [107, 121] – США, Jaśkiewicz M. [122] – Польша, Linder A, Svensson M, Viano D [123] – Швеция, Кобищанов В.В., Антипин Д.Я., Шорохов С.Г., Булычев М.А., Бобров М.В. [8,124] – БГТУ, Беляев В.И., Черкашин Ю.М., Ступин Д.Л., Кочнов А.Д., Койчев Ю.Н. [125-126] – ВНИИЖТ, Юхневский А.А., Полестеров А.А., Мейстер А.О. [26] – ТИВ и другие отечественные и зарубежные ученые.

1.7 Описание универсальных критериев травмирования в аварийных ситуациях на транспорте

В мировой практике оценивать степень травмирования пассажиров транспортных средств принято с использованием расчетных показателей универсальных критериев травмирования, которые разработаны для оценки взаимодействия антропометрических манекенов с элементами конструкции транспортного средства в условиях аварийных ситуаций, при которых пассажиры, члены поездных бригад или водители имеют риски угрозы жизни и здоровья.

Указанные показатели являются результатом серии натурных экспериментов с использованием антропометрических комплексов, где измеряемые параметры и последствия травмирования наблюдаются в наиболее значимых соотношениях между нагрузками и получаемыми травмами, которые находятся с применением статистических методов [127].

Критерии травмирования разрабатываются на основе всестороннего анализа манекена с определенными параметрами и признаками, например, манекен взрослого мужчины или женщины, ребенка различного возраста. Значения допускаемых уровней травмирования для манекенов с различными параметрами получаются при масштабировании исходного.

Нормативная документация Национальной администрации по безопасности дорожного движения (*NHTSA*) [128] рекомендует к определению значений критериев в условиях аварийных ситуаций: критерия травмирования головы, критерий травмирования шейного отдела позвоночника, критерий травмирования грудной клетки, критерий травмирования бедра.

HIC (Head Injury Criterion) – критерий травмирования головы, значение которого определяется стандартизованным максимальным интегральным значением ускорения головы. Временной интервал при этом принимается равным:

- неограниченному значению для *HIC*;
- максимум 36 мс – *HIC36*;
- максимум 15 мс – *HIC15*.

Определения значения критерия травмирования головы производится по выражению:

$$HIC = \max_{t_1, t_2} \left\{ \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a \cdot dt \right]^{2,5} t_2 - t_1 \right\}, \quad 1.4$$

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2},$$

где a – результирующее ускорение центра тяжести головы в единицах ускорения свободного падения g ; t_1, t_2 – точки на оси времени, ограничивающие длительность действия перегрузки, в пределах которых HIC достигает своего максимума; dt – шаг интегрирования не более $1,25 \cdot 10^{-4}$ с.

$HIC(d)$ (*Performance Criterion*) – приведенный критерий травмирования головы, значение которого представляет собой взвешенное стандартизированное максимальное интегральное значение ускорения головы и рассчитывается на основании значения $HIC36$:

$$HIC(d) = 0,75446 \cdot HIC36 + 166,4 \quad 1.5$$

HCD (*Head Contact Duration*) – время контакта головы. Значение HCD представляет собой стандартизованное максимальное интегральное значение ускорения головы в течение времени контакта головы. Интервалы контакта определяются по результирующей силе контакта (рассчитывают по усилию, действующему на верхний датчик, расположенный на шее, ускорению головы и ее массе). Значение HCD является максимумом значений HIC для всех интервалов контакта. Максимально допустимый предел критерия травмирования головы для манекена мужчины не превышает 1000 единиц [129].

Критерий повреждения шейного отдела позвоночника N_{ij} включает критические максимальные значения для четырех возможных режимов нагружения шеи: сжатие/растяжение в сочетании со сгибающим/разгибающим изгибающим моментом. Значение критерия определяется как сумма отношений нормированных значений нагрузок и моментов и рассчитывается по формуле:

$$Nij = \frac{F_z}{F_{кр}} + \frac{M_y}{M_{кр}}, \quad 1.6$$

где F_z – осевое сжимающее/растягивающее усилие, приложенное к узлу соединения головы и шеи; $F_{кр}$ – критическое значение осевого усилия, используемое для нормирования; M_y – изгибающий момент при растяжении/сжатии относительно боковой оси, расположенной в узле соединения головы и шеи; $M_{кр}$ – критическое значение изгибающего момента, используемое для нормирования.

Значения критерия травмирования шеи индивидуальны для каждого манекена. Так для манекена *Hybrid III* 50-перцентильный мужчина критические значения, основанные на экспериментальных данных, составляют: $F_z = 4170$ (- 4000) Н; $F_{кр} = 6806$ (-6160) Н; $M_{кр} = 310$ (-135) Нм. [127].

Критерий травмирования грудной клетки основанный на комбинированном индексе грудного отдела манекена. Применяется в качестве критерия травмирования при внешних воздействиях на антропометрический манекен и выражается по формуле:

$$CTI = \frac{A_{max}}{A_{кр}} + \frac{D_{max}}{D_{кр}}, \quad 1.7$$

где A_{max} – максимальное ускорение в течение 3 мс на спинной мозг; $A_{кр}$ – критическое ускорение, используемое для нормирования, равное 85 g в течение 3 мс; D_{max} – максимальная деформация грудной клетки; $D_{кр}$ – деформация, используемая для нормирования равная 102 мм.

CTI является оценкой воздействия результирующего ускорения на спину манекена и отклонение грудной клетки.

Критерий травмирования грудной клетки определяет ряд ограничений:

- максимальное ускорение грудной клетки – до 60g;
- максимальная деформация – 86 мм;
- максимальное значение CTI – не более 2.

В данной работе критерий травмирования грудной клетки отражается как максимальная деформация грудного отдела. Принято обозначение для критерия травмирования грудного отдела манекена – $CTI(d)$.

Критерий травмирования бедра FFC определяется на основе сжимающей нагрузки, выраженной в кН, передаваемой по оси к каждому бедру манекена, а также продолжительностью сжимающего усилия в мс.

Расчет значений универсальных критериев травмирования включает ускорения, растягивающие и сжимающие осевые усилия, изгибающие моменты, действующие на элементы манекена. При этом для каждого критерия на основе анализа последствий аварий установлены нормированные значения [127].

1.8 Постановка цели и задач исследования

Анализ мирового опыта исследований безопасности пассажирского подвижного состава показал, что опрокидывание пассажирских вагонов происходит реже, чем другие типы аварийных ситуаций. Однако, вероятность серьезного травмирования пассажиров при опрокидывании, в сравнении с другими авариями, выше, поскольку при опрокидывании вагона пассажиры находятся дальше от оси поворота, чем в других авариях, следовательно, пассажиры подвергаются большему риску травмирования.

В соответствии с этим, целью диссертационной работы является разработка и научное обоснование технических решений, направленных на повышение безопасности пассажирских вагонов при опрокидывании.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи.

- 1 Создание методики определения безопасности пассажирских вагонов при опрокидывании.
- 2 Разработка и верификация компьютерной модели опрокидывания пассажирского вагона.
- 3 Оценка динамической нагруженности кузова пассажирского вагона при опрокидывании.

4 Разработка и верификация компьютерной модели антропометрического манекена для определения степени травмирования пассажиров при опрокидывании вагона.

5 Определение конструктивных особенностей подвижного состава, влияющих на степень травмирования пассажиров железнодорожного транспорта.

6 Выработка технических решений, снижающих вероятность и тяжесть травмирования пассажиров в аварийных ситуациях, в виде системы, ограничивающей перемещение ручной клади при опрокидывании вагона, и элементов с пониженной жесткостью, располагающихся на боковых стенах и кромке стола купе вагона.

7 Оценка эффективности разработанных технических решений, направленных на повышение безопасности пассажирских вагонов.

2 ОБОСНОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ОПРОКИДЫВАНИЯ ВАГОНА

2.1 Описание объекта исследования

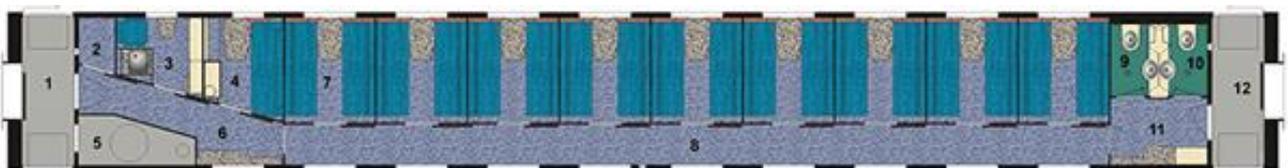
В качестве объекта исследования принята конструкция пассажирского купейного вагона модели 61-4440 (рисунок 2.1) отечественного производства ОАО «Тверской вагоностроительный завод» [130].



Рисунок 2.1 – Пассажирский вагон модель 61-4440

Вагон подобного типа предназначен для перевозки пассажиров и обслуживающего персонала вагона на участках железных дорог колеи 1520 мм. Основные технические характеристики вагона приведены в таблице 2.1 [131].

Планировка вагона модели 61-4440 представлена на рисунке 2.2.



1 – тамбур тормозного конца вагона, 2 – кладовая, 3 – служебное отделение, 4 – купе проводника, 5 – котельное отделение, 6 – коридор тормозного конца вагона, 7 – пассажирское купе, 8 – большой коридор, 9 – туалет I, 10 – туалет II, 11 – коридор нетормозного конца вагона, 12 – тамбур нетормозного конца вагона

Рисунок 2.2 – Внутренняя планировка вагона модели 61-4440

Кузов вагона изготавливается с использованием коррозионностойких сталей, что позволяет увеличить нормативный срок их эксплуатации до 40 лет. Кроме того, на 1000 мм увеличена длина вагонов: это позволяет делать вагоны более

эргономичными, сделает пребывание в вагонах более комфортным и облегчит условия труда проводников.

Внутренняя отделка новых вагонов выполняется из термоформуемого пластика. Это позволяет достичь более высокой точности при монтаже, делает поверхность более качественной, а также позволяет применять широкую гамму цветофактурных решений. В вагонах устанавливаются современные спальные места, которые трансформируются в диваны со спинками. Увеличено расстояние между ярусами полок [132].

Таблица 2.1 – Технические характеристики пассажирского вагона модели 61-4440 производства ОАО «Тверской вагоностроительный завод»

Наименование	Значение
Масса тары вагона	
- из углеродистых сталей	59,0 т
- из коррозионно-инертных сталей	58,0 т
Длина вагона по осям сцепления автосцепок	(25500±20) мм
База вагона	17000 мм
Ширина кузова наружная без гофр	3104 (+3; -7) мм
Высота горизонтальной оси автосцепки вагона от уровня головок рельсов под весом тары вагона	не менее 1040 мм и не более 1080 мм
База тележки	2400 или 2500 мм
Габарит по ГОСТ 9238-83	1-ВМ
Количество спальных мест для пассажиров	36
Количество спальных мест для проводника	1
Количество мест для сидения проводника	1
Конструкционная скорость	160 км/ч
Плавность хода	не более 2,8 для тележек безлопечной конструкции и не более 3,0 для двухосных тележек
Средний коэффициент теплопередачи ограждений кузова	не более 0,95 Вт/(м ² ·К)
Длина тормозного пути с полной загрузкой	не более 1450 м
Минимальный радиус кривой, проходимой одиночным вагоном	80 м
Минимальный радиус кривой, проходимой вагоном в сцепе с однотипным:	
- круговой, сопрягаемой с прямым участком пути	120 м
- S-образной кривой без вставки	170 м
Назначенный срок службы до списания кузова вагона	40 лет

Кузов вагона представляет собой цельнометаллическую несущую конструкцию типа замкнутой оболочки с оконными и дверными проемами, с плоско-гофрированной обшивкой наружных боковых стен и плоской обшивкой

торцевых стен. Рама кузова вагона имеет хребтовую балку переменного сечения, включающую двутавр и два швеллера в консольных частях [133].

Для изготовления несущих элементов каркаса кузова, стен, пола и крыши применяется коррозионно-инертная сталь EN 10088-2-X6CrNiTi18-10. Остальные элементы узлов выполнены из нержавеющей хромоникелевых сталей [134] 08X18H10T и 12X18H10T по ГОСТ 5582, из конструкционной углеродистой стали по ГОСТ 1050 и ГОСТ 380, а также низколегированной стали по ГОСТ 19281.

Вагон модели 61-4440 оснащен автосцепным устройством, размещенным на раме вагона. Автосцепное устройство включает в себя поглощающий аппарат типа Р-5П, автосцепку СА-3, клин тягового хомута, центрирующее устройство и расцепной привод.

Вагон оборудован переходными площадками баллонного типа и переходным мостиком. На концевых балках рамы вагона размещены буферные комплекты, расстояние между которыми составляет 1782 мм. Площадка ограждена баллонами, представляющими собой резиновые пластины, свернутые в трубу. Баллоны крепятся на торцевой стене вагона. У сцепленных вагонов зазоры между баллонами отсутствуют. Тележки вагона моделей 68-4095 и 68-4096 безлюлечного типа, оснащенные дисковыми тормозами и имеющих конструкционную скоростью 160 км/ч.

2.2 Разработка методики определения безопасности пассажирского вагона при опрокидывании

Проблемам безопасности, несущей способности и прочности транспортных средств уделяется большое внимание. Опубликованные за последние десятилетия результаты научных исследований предоставляют возможность получить достаточно полную картину основных принципов и методов проектирования, испытаний и совершенствования конструкций пассажирского железнодорожного транспорта.

В связи со значительными сложностями при проведении натуральных испытаний на безопасность пассажирского железнодорожного транспорта в настоящее время основным методом исследования динамики пассажирских вагонов является математическое моделирование динамических процессов, реализуемое посредством компьютерных моделей. Такое моделирование позволяет получать адекватные результаты, качественно и количественно близкие к результатам натуральных испытаний (в рамках допустимых погрешностей). Проектирование современных видов подвижного состава предполагает использование программ двумерного и трехмерного проектирования – CAD-систем. Для имитации основных физических процессов и проведения инженерного анализа поставленных задач применяются CAE-системы [135]. В качестве основного метода для решения указанных задач в промышленных программных комплексах применяется метод конечных элементов [136].

Главной задачей для получения достоверных результатов компьютерного моделирования сложных инженерных задач является информация о нелинейности взаимодействующих материалов в конструкции подвижного состава [137]. Это накладывает ряд ограничений на возможности промышленных программных комплексов, связанных с численной ошибкой при большом количестве итераций, а также условной жесткостью контактного взаимодействия между элементами. В связи с этим возникает погрешность в величине кинетической энергии взаимодействия между телами. Это влияет на результаты виртуальных экспериментов при условии достаточной сходимости расчетных значений с натурными испытаниями.

Таким образом, разрабатываемые компьютерные модели должны учитывать изменение нагрузок во времени, действующих на рассматриваемую конструкцию транспортного средства, контактные взаимодействия между элементами конструкции, физическую нелинейность материалов, инерционные и геометрические характеристики. Возможность создания подобных моделей реализуется программными комплексами с нелинейными постановками задач,

которые позволяют наиболее точно оценивать безопасность кузовных конструкций в любых аварийных ситуациях при статическом и динамическом нагружении с учетом физической и геометрической изменчивости характеристик конструкций [138].

Для выявления поведения несущей конструкции пассажирского вагона кузов вагона необходимо подвергнуть испытаниям в динамической постановке. Для решения задачи опрокидывания пассажирского вагона на бок существует возможность провести испытания в соответствии с [86]. Учет нелинейности для динамических задач приводит к получению разрешающей системы уравнений, которая содержит нелинейные члены относительно определяемых основных неизвестных [138].

В основе решения любой задачи, в том числе нелинейной, лежит определенный алгоритм интегрирования. Для решения задач, связанных с расчетной оценкой пассивной безопасности кузовных конструкций в условиях их ударного нагружения, наиболее рациональным является применение явной схемы интегрирования [139] (рисунок 2.3), основанной на методе центральных разностей.

Расчет высоконелинейных динамических моделей требует больших временных затрат и подразумевает использование суперкомпьютеров.

Дискретизированные уравнения движения для явной формулировки конечноэлементного анализа можно записать как:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f^{(ext)}, \quad 2.1$$

$$C\dot{x} + Kx = f^{(int)}, \quad 2.2$$

$$M\ddot{x} = f^{(ext)} - f^{(int)}, \quad 2.3$$

где M – диагональная матрица инерции конструкции, \ddot{x} – вектор узлового ускорения, $f^{(ext)}$ – вектор внешней силы, $f^{(int)}$ – вектор внутренней узловой силы.



Рисунок 2.3 – Блок-схема явного метода интегрирования

Интегрирование уравнений по времени осуществляется методом центральной разности:

$$\ddot{x}^{(n)} = M^{-1} (f^{(ext)(n)} - f^{(int)(n)}), \quad 2.4$$

$$\dot{x}^{(n+1)} = \dot{x}^{(n)} + \dot{x}^{(n+1)/2} \Delta t^{(n+1)/2}, \quad 2.5$$

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} + \dot{x}^{(n+1)/2} \Delta t^{(n+1)/2}. \quad 2.6$$

Исходя из вышеизложенного, для определения безопасности пассажирских вагонов, разработана методика поэтапного моделирования опрокидывания пассажирского вагона. Разработанная методика (рисунок 2.4) включает в себя следующие этапы:

1 на первом этапе разрабатывается трехмерная модель кузова вагона, детально описывающую металлоконструкцию вагона, интерьер салона вагона

и вагонное оборудование. Проводится исследование кинематики движения по прямому горизонтальному участку пути, сход с рельс и опрокидывание пассажирского вагона. Определяются инерционные параметры движения пассажирского вагона в момент опрокидывания.

2 второй этап методики включает формирование модели опрокидывания пассажирского вагона. Для этого разрабатываются подсистемы «тележка» и «автосцепное устройство». Определяются контактные связи между подсистемами и разработанной на первом этапе методики кузова вагона. Для создания поверхности для опрокидывания вагона разрабатывается модель «насыпь» в соответствии с нормативной документацией [140]. Задаются начальные и граничные условия движения и опрокидывания пассажирского вагона. В результате моделирования движения вагона проводится оценка динамической нагруженности несущей конструкции. Верификация разработанной модели проводится путем сопоставления полученных динамических показателей с результатами натурных ходовых испытаний вагона.

3 на третьем этапе методики определяются деформации и зоны разрушения конструкции кузова вагона. На данном этапе проводится разработка конечноэлементной модели кузова вагона, которая позволяет исследовать влияние характеристик податливости кузова, межвагонных соединений на поведение системы. При этом жесткость кузова определяется по результатам квазистатических расчетов на модели вагона. Модель вагона является пластинчатой, состоит из конечных элементов, которые учитывают мембранные, сдвиговые, поперечные и изгибные силовые факторы. Производится расчет несущей конструкции кузова пассажирского вагона по методу конечных элементов, с помощью которого определяются эквивалентные напряжения в конструкции. Оцениваются упругопластические деформации кузова вагона при опрокидывании.

4 четвертый этап методики определения безопасности пассажирского вагона включает разработку модели антропометрического манекена по геометрическим и инерционным данным натурального образца. Проводится

верификация разработанной модели манекена. Определяются контактные взаимодействия между моделью антропометрического манекена и элементами купе вагона. Антропометрическая модель манекена включается в разработанную на модель пассажирского вагона и выполняется моделирование аварийного опрокидывания. По полученным данным о контактных взаимодействиях модели манекена с элементами интерьера купе рассчитываются универсальные критерии травмирования для отдельных элементов модели манекена.



Рисунок 2.4 – Блок-схема методики определения безопасности пассажирских вагонов при опрокидывании

5 на завершающем этапе проводится анализ результатов и делается заключение о безопасности пассажирского вагона.

Предложенная методика позволяет снизить временные и финансовые затраты на проектирование пассажирского подвижного состава, проведение большого количества численных экспериментов для возможных сценариев аварийных ситуаций, за счет современных программных комплексов твердотельного моделирования и конечноэлементного анализа, а также оценить безопасность конструкции пассажирского вагона.

2.3 Разработка компьютерной модели кузова пассажирского вагона

2.3.1 Разработка твердотельной модели пассажирского вагона

Для исследования влияния конструктивных особенностей кузова вагона на безопасность пассажиров разработана трехмерная динамическая компьютерная модель вагона в среде программного комплекса моделирования динамики систем тел «Универсальный механизм» [58].

С помощью модуля ввода данных программного комплекса сформирована твердотельная динамическая модель пассажирского вагона на основе исходных данных, которые описывают геометрические, инерционные и силовые характеристики [141]. Динамическая модель вагона представлена совокупностью подсистем двух уровней. Подсистема первого уровня включает подсистему «пассажирский вагон», включающий подсистему второго уровня «сцепное устройство СА-3», служащее для соединения между собой с помощью контактных элементов нескольких подсистем «пассажирский вагон» и подсистема «тележка».

Затем в модуле симуляции *UM Simulation*, с помощью полученных автоматической генерацией уравнений движения, на основе созданной динамической модели, проводилось моделирование движения вагона по прямому горизонтальному участку пути.

Для расчетной схеме вагон описан твердыми телами с реальными инерционными и геометрическими характеристиками, соединенных между собой контактными и упруго-диссипативными силовыми элементами, и описывающими

пространственные колебания пассажирского вагона. Кузов вагона имеет шесть степеней свободы и свойства, соответствующие полностью экипированному вагону с учетом расположения тяжеловесного оборудования [142].

В модели пассажирского вагона контакт кузова с тележкой смоделирован с помощью входящего в стандартный набор программного модуля *UM Input* и представлен в виде контактного элемента «точка – плоскость». Такой контактный элемент моделирует взаимодействие двух тел, при котором на одном теле располагается набор точек, а на другом плоскость контакта [58].

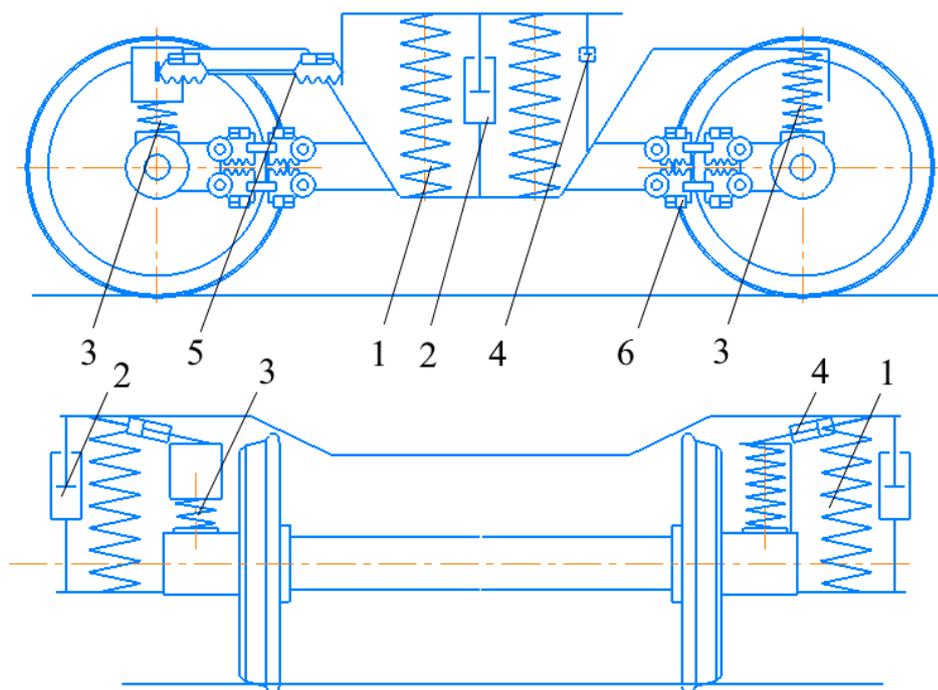
В программном комплексе смоделированы линейные силовые элементы в шкворневых узлах пассажирского вагона для ограничения горизонтальных смещений кузова вагона в поперечной и продольной плоскостях относительно наддресорной балки тележки вагона. В качестве исходных данных в программном комплексе вводятся значения усилий, жесткостные характеристики и координаты точек соединения элементов друг к другу.

Верхнее строение пути описано моделью с упруго-диссипативными характеристиками, соответствующими характеристикам рельсов типа Р65 длиной 25 м, уложенным на железобетонные шпалы, в летний период времени [143].

Модель подсистемы «тележка» является динамической и представлена совокупностью абсолютно твердых тел, соединенных шарнирами и силовыми элементами. Колесная пара представлена системой твердых тел взаимодействующих с буксовым узлом с помощью вращательных шарниров и контактных элементов.

Тележки пассажирского вагона смоделированы в виде совокупности абсолютно твердых тел, связанных между собой силовыми элементами и шарнирами. Структурная схема тележки пассажирского вагона представлена на рисунке 2.5. Профиль катания колеса выполнен в соответствии с [144] и не имеет износа по кругу катания.

Все элементы тележки имеют геометрические и инерционные характеристики идентичные характеристикам реальных элементов тележки. Каждый элемент модели тележки обладает шестью степенями свободы.



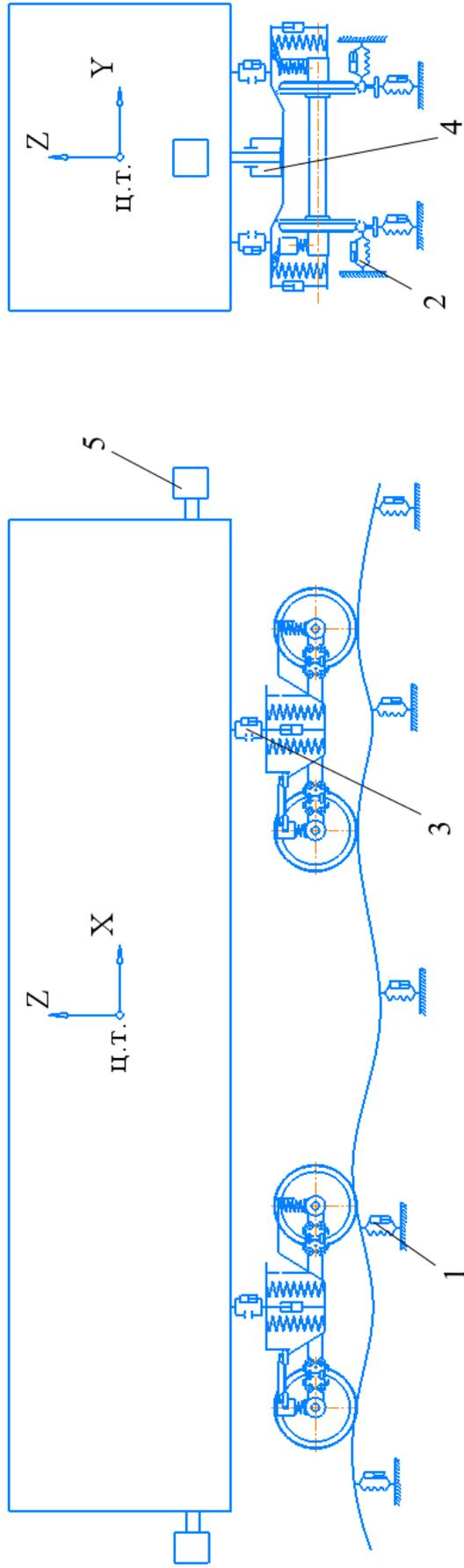
1 – линейный силовой элемент, моделирующий упругие элементы центральной ступени подвешивания; 2 – диссипативный линейный биполярный силовой элемент, моделирующий гаситель вертикальных колебаний центральной ступени подвешивания; 3 – линейный силовой элемент, моделирующий упругие элементы буксового подвешивания; 4 – диссипативный линейный биполярный силовой элемент, моделирующий горизонтальный гаситель колебаний центральной ступени подвешивания; 5 – упруго-диссипативные элементы, моделирующие резинометаллические блоки продольного поводка центральной ступени подвешивания; 6 – упруго-диссипативный нелинейный биполярный силовой элемент, моделирующий упруго-диссипативные свойства резинометаллических блоков буксового поводка

Рисунок 2.5 – Структурная схема динамической модели подсистемы «тележка»

В тележке вагона линейными силовыми элементами описаны пружины центрального рессорного подвешивания, соединяющие раму тележки с надрессорным брусом. Обобщенными линейными силовыми элементами моделируются пружины, которые связывают раму с буксовыми узлами.

Диссипативными линейными биполярными силовыми элементами в модели тележки описаны вертикальные и горизонтальные гасители колебаний. С помощью упруго-диссипативных линейных биполярных силовых элементов [145] моделируются резинометаллические блоки для крепления поводка к кронштейнам надрессорного бруса и рамы тележки. С использованием нелинейных биполярных упруго-силовых элементов моделируется взаимодействие поводков с кронштейнами рамы и буксового узла тележки.

Связь модели кузова с моделью тележки (рисунок 2.6) осуществляется через



1 – упруго-диссипативный элемент со свойствами рельсового полотна в вертикальной плоскости; 2 – упруго-диссипативный элемент со свойствами рельсового полотна в горизонтальной плоскости; 3 – силовой контактный элемент опирания кузова на скользуны; 4 – силовой линейный элемент, моделирующий ограничение горизонтальных перемещений кузова относительно надрессорного бруса тележки в пятниковом узле; 5 – подсистема «автосцепное устройство»

Рисунок 2.6 – Структурная схема динамической модели вагона

замковый шкворень, который в динамической модели пассажирского вагона описывается силовыми линейными элементами, ограничивающими горизонтальные перемещения кузова относительно надрессорного бруса тележки в пятниковых узлах. Силовым элементом соединяются точки, принадлежащие двум разным телам. При смещении положения точек относительно друг друга в силовом элементе возникают усилия:

$$F = F_0 - C_i \times d_i - C_j \times d_j, \quad 2.7$$

где F – сила, возникающая в элементе; F_0 – стационарное значение силы; C_i , d_i – жесткость элемента и относительное смещение точки в направлении вектора i ; C_j , d_j – угловая жесткость элемента и относительный поворот второго тела относительно вектора j .

С помощью специального набора программного комплекса контактных элементов типа «точка–плоскость» описывается опирание кузова на тележки через скользуны [145].

Модель автосцепного устройства пассажирского вагона представлена совокупностью абсолютно твердых тел. В модель автосцепки включены вращательные шарниры, которые связывают маятниковые подвески с ударной розеткой и центрирующей балочкой, и вращательные шарниры, которые связывают корпус автосцепного устройства с хомутом. Также в модель включены контактные элементы типа «точка-плоскость», описывающие контактные взаимодействия между упорной плитой и корпусом автосцепного устройства; нажимной плитой автосцепки и передним упором рамы кузова; хвостовиком автосцепки и ударной розеткой; поглощающим аппаратом и хомутом автосцепки. Также между корпусом поглощающего аппарата и упорной плитой смоделирован упругий нелинейный биполярный элемент и диссипативный силовой элемент. Эти элементы моделируют упруго-диссипативные свойства, возникающие при контакте указанных элементов.

Для моделирования сцепки вагонов между твердыми телами автосцепных устройств вводятся контактные силовые элементы типа «точка-плоскость».

В модели автосцепного устройства кузова вагона введены соответствующие ограничения поворота элементов относительно друг друга.

2.3.2 Разработка конечноэлементной модели кузова пассажирского вагона

Для описания движения пассажирского вагона и его состояния при аварийном опрокидывании на бок в нелинейном динамическом анализе широко применяется метод конечных элементов, который формируется на основе уравнений механики сплошных сред [146]. Расчет конструкций с помощью метода конечных элементов сводится к решению краевых задач для системы уравнений, включающих [147]:

- уравнения равновесия:

$$[\Phi]^T \{\sigma\} = \{G_v\}, \quad 2.8$$

где $\{G_v\} = \{X(x, y, z), Y(x, y, z), Z(x, y, z)\}$ - вектор-функция объемных сил; $[\Phi]$ – матрица дифференциальных операторов:

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad 2.9$$

- геометрические уравнения (Коши)

$$\{\varepsilon\} = [\Phi]\{u\}, \quad 2.10$$

- определяющие физические уравнения

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}, \quad 2.11$$

$[D]$ – матрица механических характеристик материала размером 6 x 6, для упругого изотропного материала:

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1+2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix}, \quad 2.12$$

где E – модуль упругости материала, ν - коэффициент Пуассона.

Совместное решение этих уравнений дает разрешающие уравнения в виде:

$$[\Phi]^T [D] [\Phi] \{u\} = \{G_v\}. \quad 2.13$$

Уравнения должны быть дополнены кинематическими и статическими граничными условиями.

Для оценки напряженно-деформированного состояния несущей конструкции кузова вагона в аварийных ситуациях в программном комплексе трехмерного проектирования *Siemens NX Advanced Simulation* [148] на основе пространственной твердотельной модели разработана детализированная пластинчатая конечноэлементная модель кузова пассажирского вагона (рисунок 2.7).

Модель кузова сформированы из трех- и четырехузловых пластинчатых изотропных конечных элементов со средним размером от 10 до 100 мм. Создание конечноэлементной сетки выполнено с использованием автоматического генератора сеток промышленного программного комплекса на основе разработанных поверхностных моделей элементов конструкции кузова вагона. Конечные элементы расположены по срединным поверхностям, соответствующих элементов конструкции кузова.

Расчетная модель кузова пассажирского вагона состоит из 146000 конечных элементов, объединенных в 137000 узлах, общее число степеней свободы расчетной схемы составило 816000 [149].

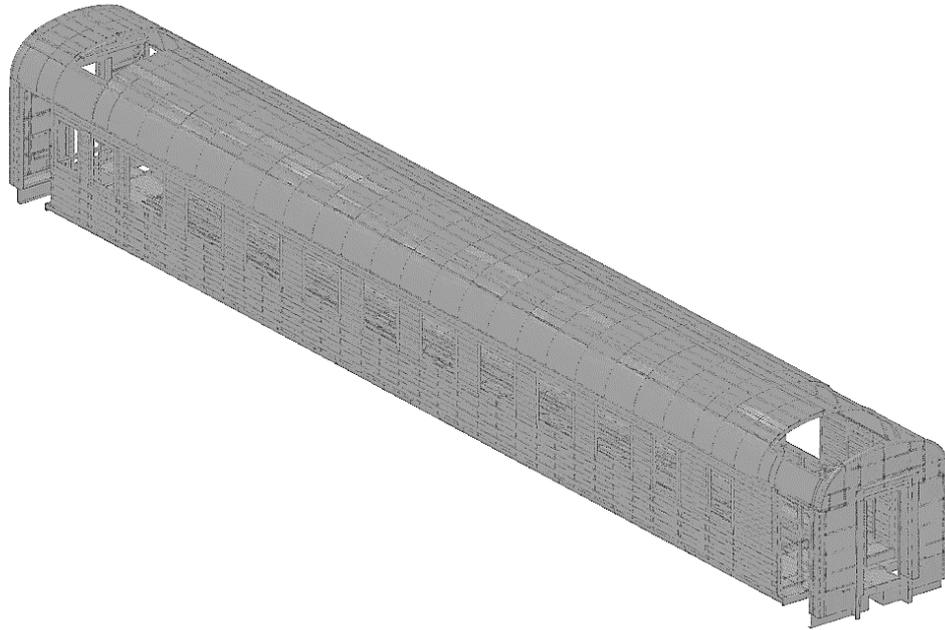


Рисунок 2.7 – Конечноэлементная модель кузова пассажирского вагона 61-4440

Расчетная модель кузова вагона имеет пять ограничений:

- перемещение в вертикальном направлении в зоне установки скользунов;
- перемещение в продольном направлении в одном из пятников;
- перемещение в поперечном направлении;
- поворот относительно продольной оси вагона в пятниках;
- поворот относительно вертикальной оси вагона в пятниках.

Для точного исследования напряженно-деформированного состояния пассажирского вагона разработанная модель кузова пассажирского вагона дополнена элементами, описывающими системы жизнеобеспечения пассажиров в вагоне: системы водоснабжения и кондиционирования воздуха, низковольтные и высоковольтные ящики, аккумуляторный бокс, преобразователь, фекальный бак и котельное отделение. Определение координат центра тяжести систем жизнеобеспечения пассажирского вагона выполнено в соответствии с [150].

2.3.3 Модель материала для конечноэлементной модели кузова вагона

Модель упругопластического материала описывает изотропные тела, которые при нагружении работают упруго, пока не выполняется условие текучести, а при дальнейшем нагружении такого материала в нем развиваются не только упругие, но и пластические деформации. Переход материала из упругого состояния в пластическое состояние происходит в момент, когда эквивалентные напряжения достигают напряжения текучести:

$$\sigma_{\text{экв}} \geq \sigma_T, \quad 2.14$$

где $\sigma_{\text{экв}}$ – эквивалентные напряжения; σ_T – напряжение текучести.

Для описания модели материала рассматривались две модели, которые наиболее точно описывают динамические процессы деформации, при которых конструкционные стали деформируются при различных скоростях.

Упрощенная модель Джонсона-Кука:

$$\sigma_T = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + c \ln \dot{\varepsilon}^*), \quad 2.15$$

где A, B, c, n – параметры модели; ε_p – эквивалентная пластическая деформация;

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}, \quad 2.16$$

где $\dot{\varepsilon}_0$ – пороговое значение скорости пластической деформации; $\dot{\varepsilon}_p$ – мгновенная скорость пластической деформации.

Связь между динамическими напряжениями и скоростями деформации конкретного материала дает модель Купера-Саймондса:

$$\frac{\sigma_\delta}{\sigma_T} = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{P}}, \quad 2.17$$

где σ_δ – динамическое напряжение; σ_m – статический предел текучести; $\dot{\varepsilon}$ – эквивалентная скорость деформации; D, P – константы, специфические для типа материала, равные соответственно 40,4 и 5,0.

Конечным элементам модели кузова вагона, которые моделируют металлоконструкцию кузова, присваивается материал, в котором зависимость уровня напряжений от величины деформаций описывается представленной на рисунке 2.8 кривой растяжения стального образца.

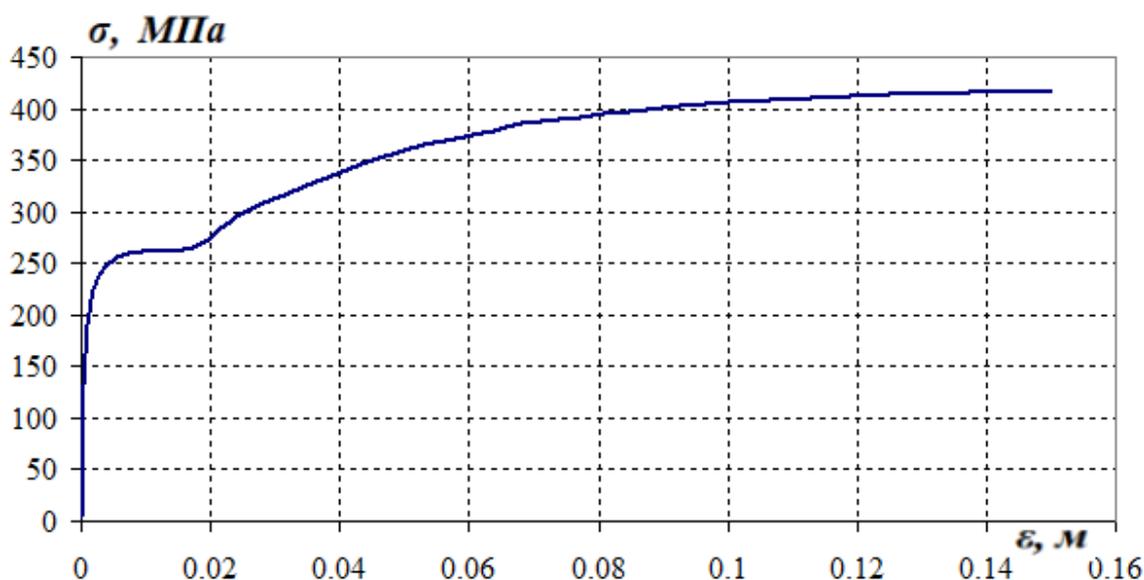


Рисунок 2.8 – Зависимость напряжений от деформации в модели материала

На каждой итерации напряжения определяются для текущей величины деформации ε интерполированием значений таблицы напряжения – деформация:

$$\sigma = \left[(\sigma_i - \sigma_{i-1}) (\varepsilon - \varepsilon_{i-1}) / (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}) \right] + \sigma_{i-1}, \quad 2.18$$

где σ_i и ε_i – значения ячеек таблицы напряжения – деформация.

2.3.4 Верификация конечноэлементной модели пассажирского вагона

Адекватность разработанной конечноэлементной модели кузова вагона проводилась путем сопоставления полученных результатов компьютерного моделирования с результатами, полученными в ходе статистических натурных стендовых испытаний АО НО «Тверской институт вагоностроения», описывающих аналогичные условия испытания кузова вагона [151].

Нагружение расчетной модели осуществлялось в соответствии с испытаниями и рекомендациями нормативной документации [152].

Для расчета использованы три варианта нагружения: продольная сжимающая равная 2,5 МН и растягивающая нагрузка равная 1,5 МН и вертикальная нагрузка от веса брутто кузова вагона [153]. Приложение продольных нагрузок осуществлялось в хребтовой балке, в местах расположения задних и передних упоров автосцепки. Сопоставление проводилось по значениям нормальных напряжений в поперечном сечении кузова по ближнему к среднему сечению кузова оконному проему.

Верификация разработанных моделей выполнена в три этапа. На первом этапе выполнено сопоставление инерциальных характеристик, полученных с использованием разработанных моделей с данными реальных конструкций кузовов подвижного состава. Максимальное расхождение составило 9%.

На втором этапе сопоставлялись нормальные напряжения, полученные расчетным путем, с результатами натурных стендовых испытаний. Максимальное расхождение для разработанных моделей составило 16%.

На третьем этапе сопоставлялись нормальные напряжения, полученные при моделировании с данными натурных испытаний на соударения подвижного состава с препятствием. Следует отметить, что максимальное расхождение результатов не превысило 18%.

На рисунках 2.9-2.11 отражены результаты расчетов в виде эпюр распределения нормальных напряжений в поперечном сечении кузова пассажирского вагона. В скобках для сравнения указаны значения напряжений, полученные в результате натурных испытаний.

Верификация модели вагона в динамической постановке проведена путем сопоставления полученных результатов компьютерного моделирования с результатами ходовых динамических испытаний, которые выполнены при движении вагона по прямым и криволинейным участкам пути в диапазоне скоростей

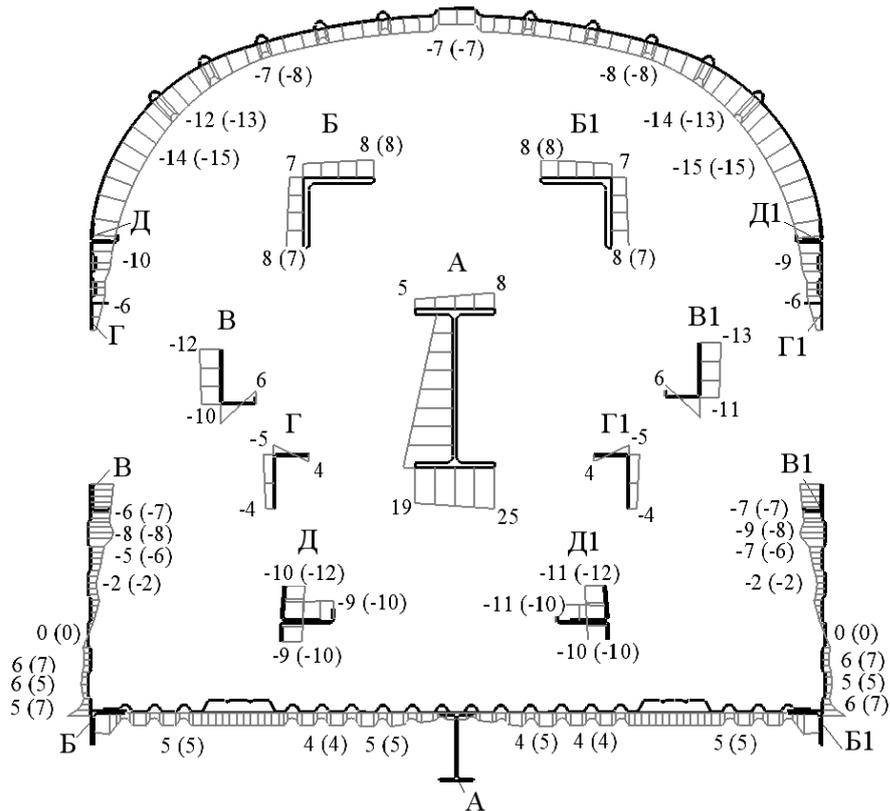


Рисунок 2.9 – Эпюры нормальных напряжений в среднем сечении кузова пассажирского вагона от действия вертикальной нагрузки, МПа

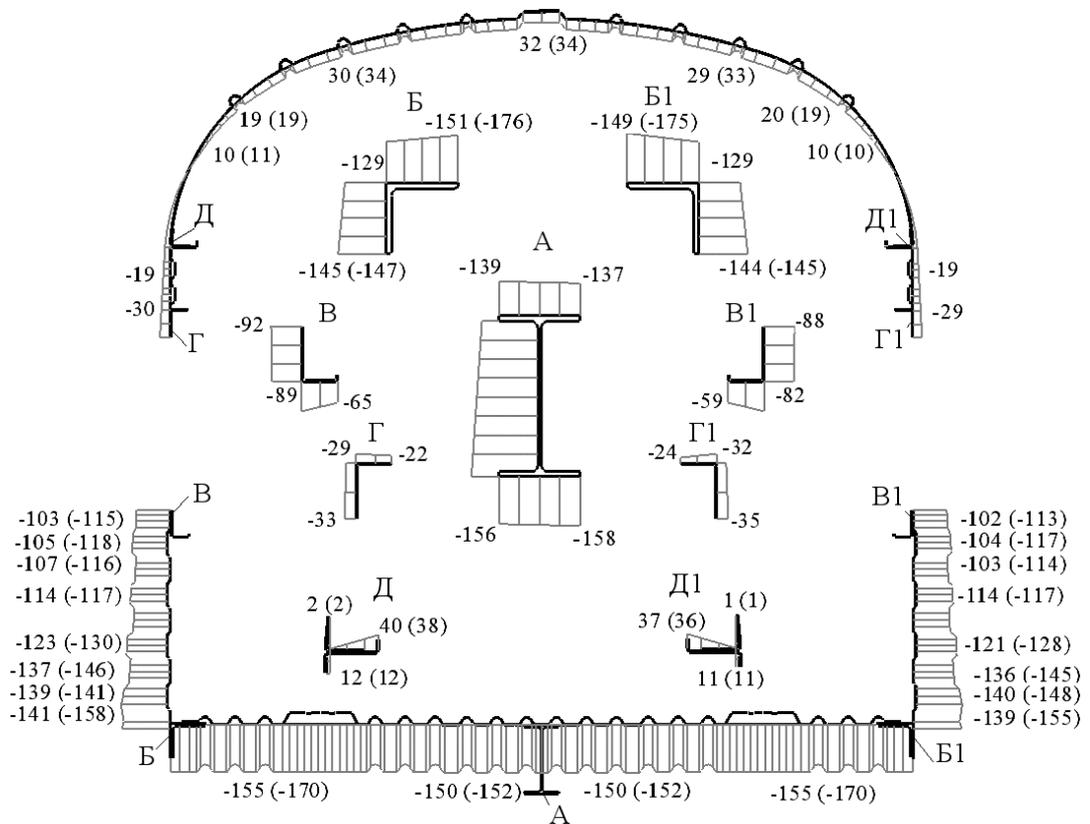


Рисунок 2.10 – Эпюры нормальных напряжений в среднем сечении кузова пассажирского вагона от действия сжимающей нагрузки 2,5 МН, МПа

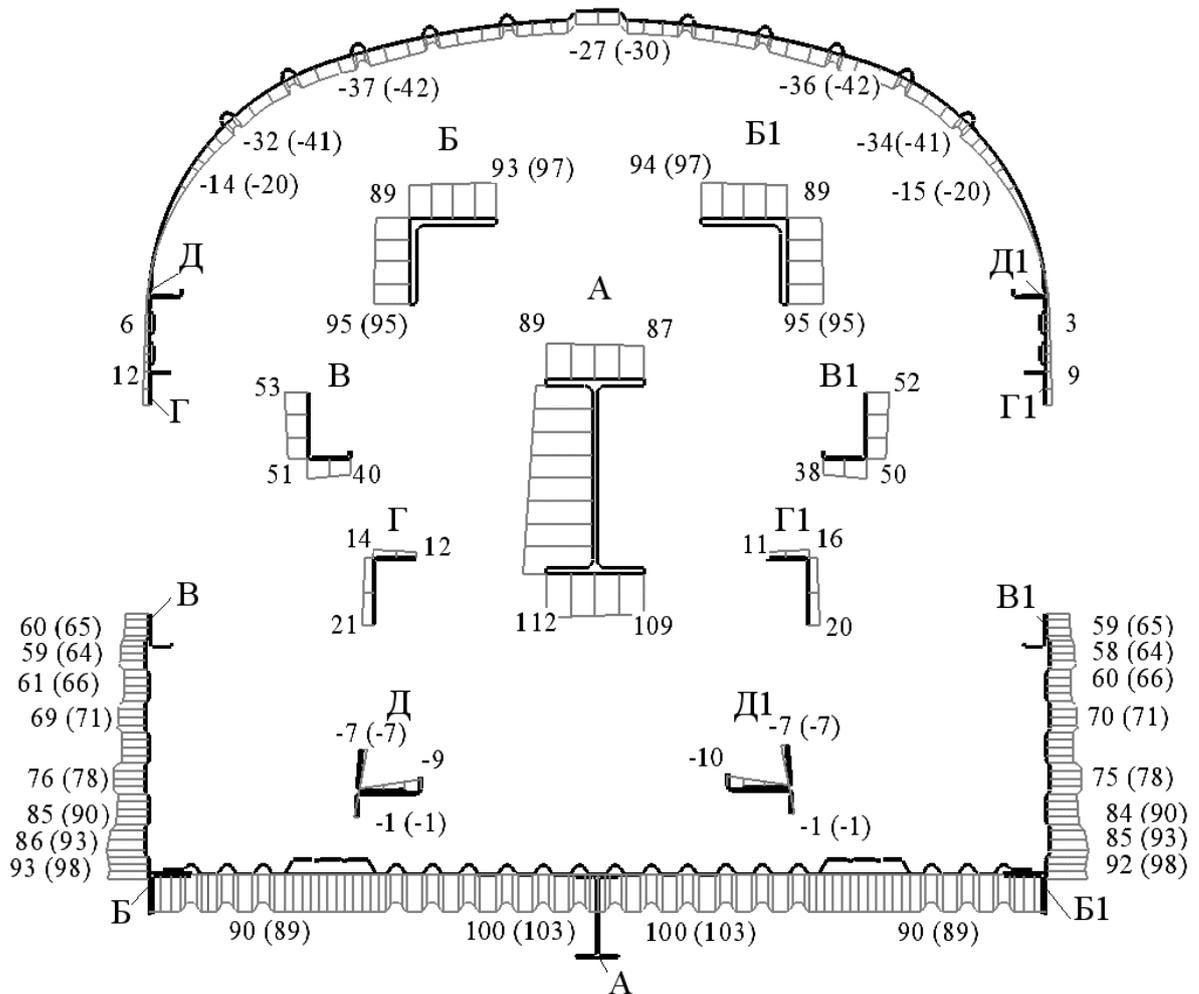
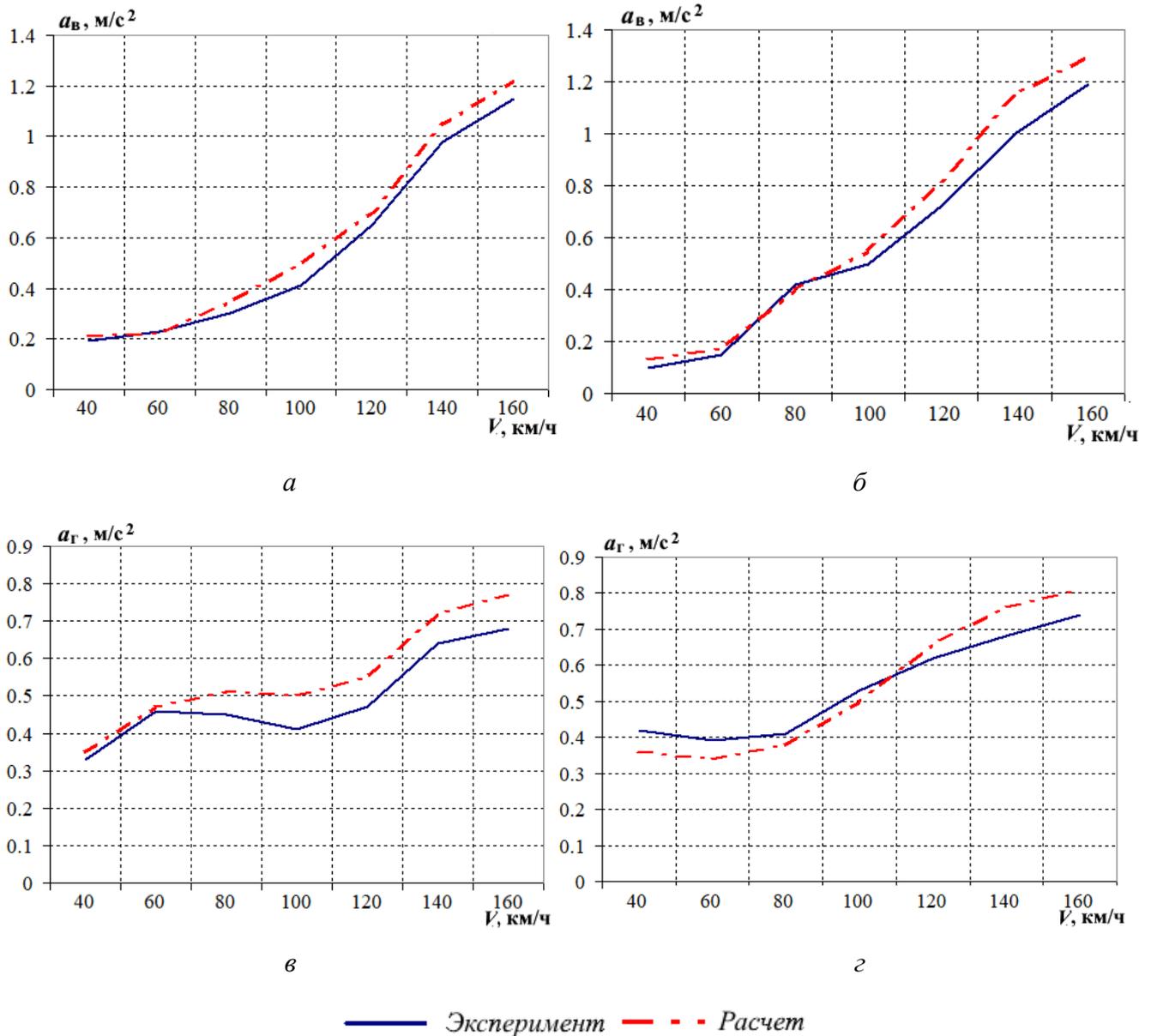


Рисунок 2.11 – Эпюра нормальных напряжений в среднем сечении кузова пассажирского вагона от действия растягивающей нагрузки 1,5 МН, МПа

40 – 160 км/ч по участку пути Санкт-Петербург – Малая Вишера – Санкт-Петербург.

Графики зависимостей вертикальных и горизонтальных ускорений кузова по срединному сечению, сопоставленные с результатами натурных испытаний, представлены на рисунке 2.12. По полученным картинам наблюдается достаточная сходимость результатов полученных в ходе компьютерного моделирования с результатами испытаний. Расхождение значений составляет не более 19%.

Для оценки напряженно-деформируемого состояния конечноэлементной модели кузова вагона пассажирский вагон помещается на платформу, которой задается поворот на угол, при котором модель вагона под собственной силой тяжести выйдет из положения равновесия и начнет падать на поверхность для опрокидывания (рисунок 2.12).

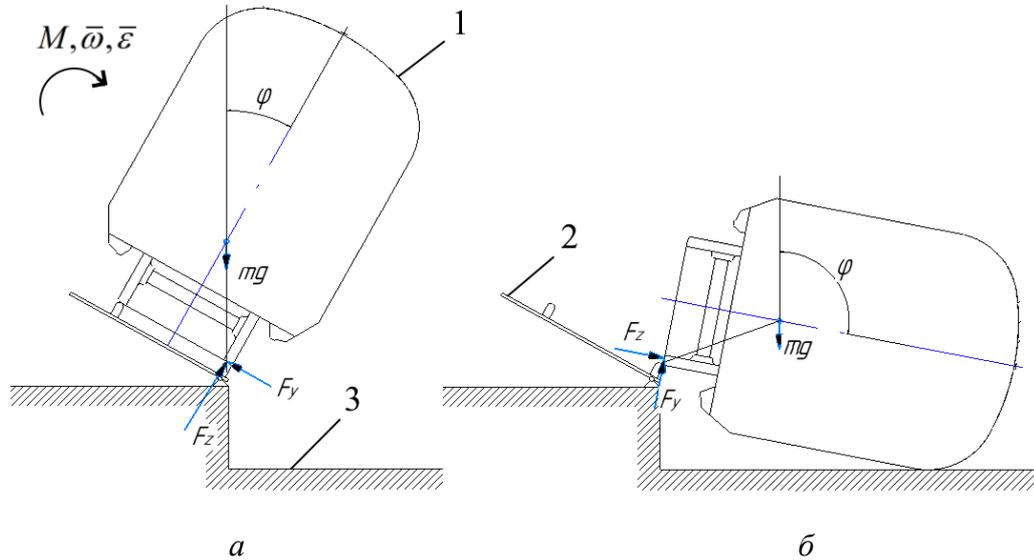


а – вертикальные ускорения на прямом участке; *б* – вертикальные ускорения на криволинейном участке; *в* – горизонтальные ускорения на прямом участке; *г* – горизонтальные ускорения на криволинейном участке

Рисунок 2.12 – Зависимость ускорений кузова от скорости движения вагона

Для оценки напряженно-деформируемого состояния конечноэлементной модели кузова вагона пассажирский вагон помещается на платформу, которой задается поворот на угол φ , при котором модель вагона под собственной силой тяжести выйдет из положения равновесия и начнет падать на поверхность для опрокидывания (рисунок 2.13). Поверхность, на которую происходит опрокидывание модели вагона, задается абсолютно твердым телом и расположена на расстоянии в соответствии с [88]. Между кузовом вагона и поверхностью заданы

специальные контактные элементы. Предполагаемые зоны наибольших деформаций предварительно разбивались на более мелкие конечные элементы.



a – начальное положение вагона; *б* – конечное положение вагона;
 1 – пассажирский вагон; 2 – поворотная платформа; 3 – поверхность для опрокидывания
Рисунок 2.13 – Схема опрокидывания пассажирского вагона в условиях, соответствующих [88]

При проведении моделирования регистрируется скорость, с которой модель вагона падает на поверхность, силы возникающие при контактом взаимодействии кузова вагона и поверхности, на которую опрокидывается вагон, и деформации узлов соединения элементов несущей конструкции кузова вагона.

В результате моделирования получены зависимости усилий, возникающие в кузове при опрокидывании, и деформации кузова вагона от времени моделирования (рисунок 2.14 - 2.15). Выявлены максимальные напряжения, возникающие в элементах несущей конструкции кузова пассажирского вагона при опрокидывании на плоскую горизонтальную поверхность.

В результате моделирования опрокидывания кузова вагона в соответствии с [88] получено деформируемое состояние, представленное на рисунке 2.16 а. Определены границы пространства, которое должно сохраняться в салоне вагона, необходимое для безопасного нахождения пассажиров, после опрокидывания вагона (рисунок 2.16 б).

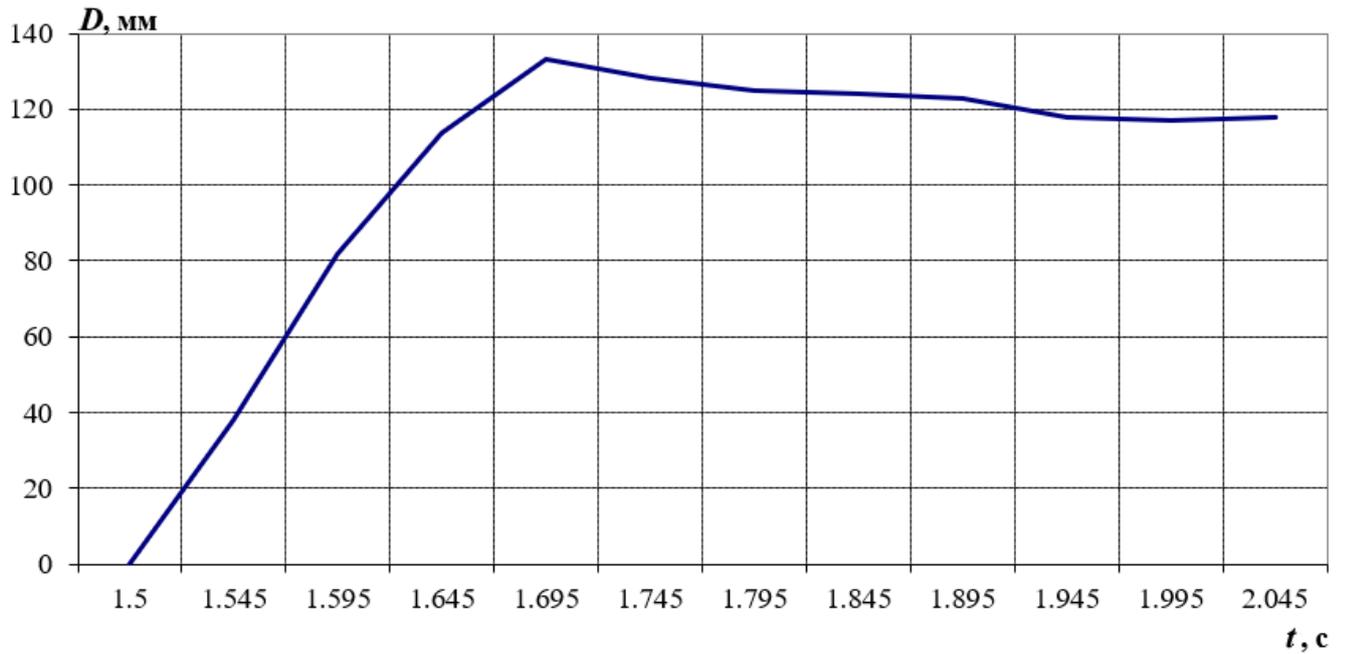


Рисунок 2.14 – График зависимости деформации несущей конструкции кузова вагона от времени моделирования опрокидывания

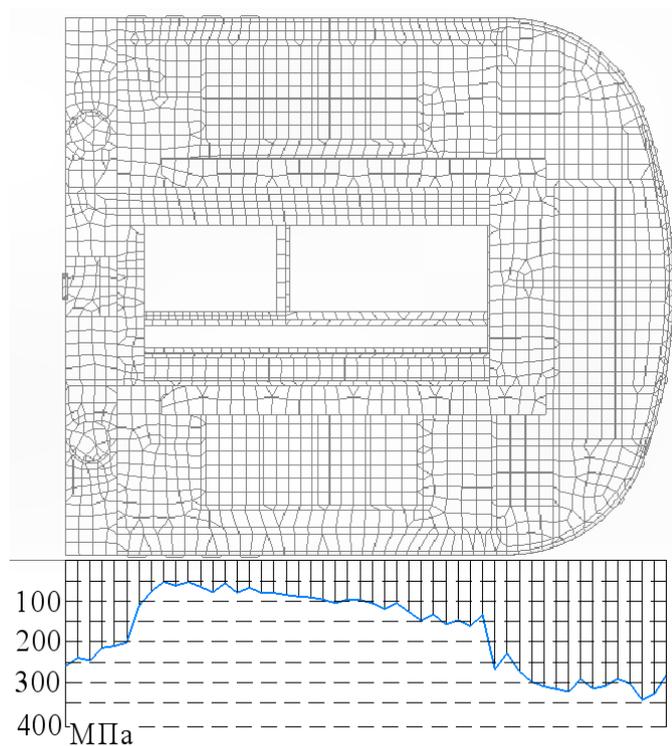
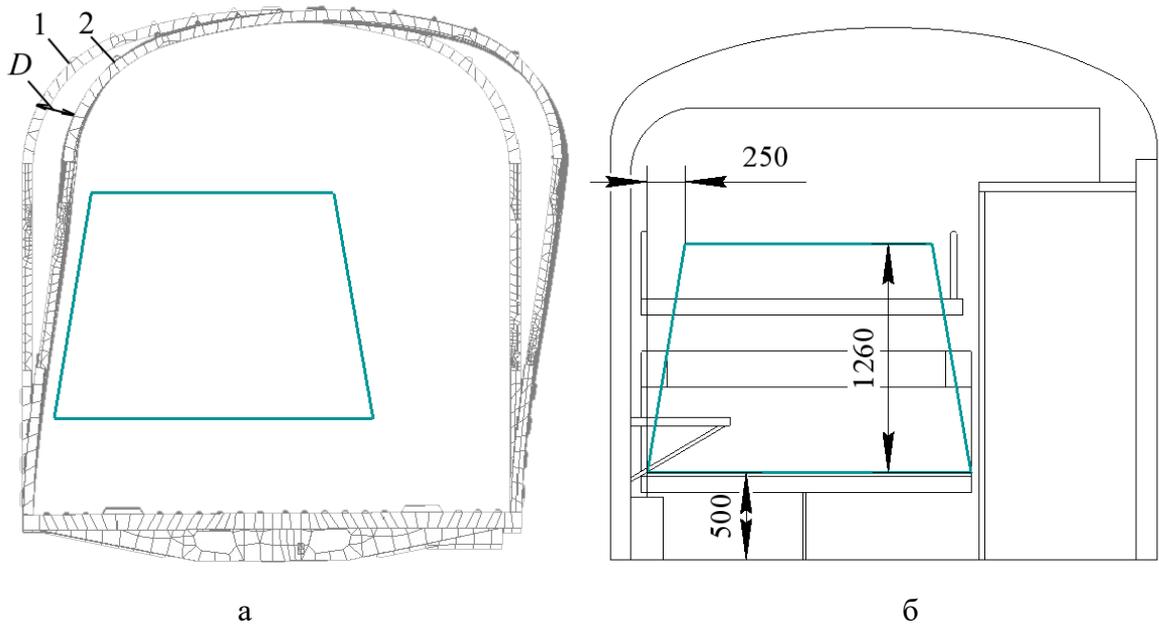


Рисунок 2.15 – Максимальные напряжения, действующие на кузов вагона при опрокидывании

Моделирование опрокидывания конечноэлементной модели кузова вагона показало, что ни одна из сместившихся частей кузова не нарушает объемы пространства.



а – деформируемое состояние кузова вагона: 1 – кузов без деформации, 2 – кузов в деформируемом состоянии после опрокидывания; б – размеры остаточного пространства в салоне вагона

Рисунок 2.16 – Остаточное пространство кузова вагона

Проведение испытаний с конечноэлементной упругопластической моделью с использованием явного метода интегрирования подразумевает большие затраты времени на моделирование и использование суперкомпьютера. Поэтому моделирование опрокидывания вагона на поверхность целесообразно представлять как отдельные этапы:

Первый этап – поворот от исходного положения вагона на рельсах до момента начала его падения. Данный этап можно заменить поворотом модели вагона на опорной площадке на угол φ , который характерен нестабильным положением вагона на площадке и началом падения вагона (рисунок 2.13 а).

Второй этап характеризуется падением модели вагона и рассматривается до момента, когда кузов начинает взаимодействовать с горизонтальной площадкой, на которую происходит опрокидывание. Во время расчета кузов считается абсолютно жестким телом. При таком условии появляется возможность увеличить шаг интегрирования по времени, что позволяет сократить общее время расчета [154].

Третий этап начинается с момента касания кузова горизонтальной площадки и продолжается до окончания деформирования модели. На данном этапе следует рассчитывать модель кузова как упругопластическую. Для определения момента перехода от абсолютно твердой модели на деформируемую необходимо провести предварительный расчет с жесткой моделью, при котором отслеживаются условия, возникающие при взаимодействии кузова с поверхностью опрокидывания. Определяемые условия выступают как исходные данные решаемой задачи, с использованием которых проводится расчет упругопластической модели.

2.4 Разработка моделей аварийного опрокидывания пассажирского вагона

Оценка безопасности пассажирского железнодорожного транспорта проводится на основе результатов анализа движения вагонов при крушениях поездов со сходом состава или части вагонов с рельс и последующим опрокидыванием вагонов. Прогнозирование явлений, возникающих в соединениях элементов конструкций вагонов при аварийном опрокидывании, является трудоемкой задачей. В связи с этим возникает необходимость разработки компьютерных моделей аварийного опрокидывания пассажирского вагона на бок.

В настоящее время в отечественных стандартах и литературе недостаточно информации и четких требований, предъявляемых к испытаниям на опрокидывание пассажирского железнодорожного транспорта, которые необходимы для выявления динамических показателей нагружения кузова пассажирского вагона при аварийном опрокидывании.

Проведя анализ аварийных ситуаций с опрокидыванием пассажирского железнодорожного транспорта, можно сформировать основные сценарии аварий:

– опрокидывание, произошедшее в результате схода транспортного средства с дорожной колеи на высокой скорости в связи с потерей управления транспортным средством поездной бригады;

– опрокидывание транспортного средства в связи с дефектом или дефектами дорожной колеи на установленных движением скоростях;

– опрокидывание транспортного средства в связи с вмешательством третьих лиц, в том числе террористических действий на транспорте при различных скоростях движения.

Ограничиваясь международным опытом проведения испытаний на опрокидывание крупногабаритных пассажирских наземных транспортных средств, можно выделить шесть основных сценариев опрокидывания для железнодорожного пассажирского вагона:

1 одиночно стоящий пассажирский вагон опрокидывается на плоскую поверхность (рисунок 2.17), описывающую верхнее строение пути без возвышения, без учета скорости движения вагона;

2 одиночный вагон опрокидывается на плоскую поверхность с учетом скорости в момент опрокидывания;

3 одиночный вагон опрокидывается на наклонную поверхность (рисунок 2.18), описывающую насыпь железнодорожного полотна в соответствии с [139] без учета скорости движения вагона в момент опрокидывания;

4 одиночный вагон опрокидывается на наклонную поверхность, описывающую насыпь железнодорожного полотна в соответствии с [140] с учетом скорости движения вагона в момент опрокидывания;

5 сцеп из трех пассажирских вагонов опрокидывается на плоскую поверхность (рисунок 2.19) с учетом скорости движения состава в момент опрокидывания;

6 сцеп из трех пассажирских вагонов опрокидывается на наклонную поверхность (рисунок 2.20), описывающую насыпь железнодорожного полотна в соответствии с [140] с учетом скорости движения состава в момент опрокидывания. Схема опрокидывания вагона на плоскую и наклонную поверхности представлена на рисунке 2.21.

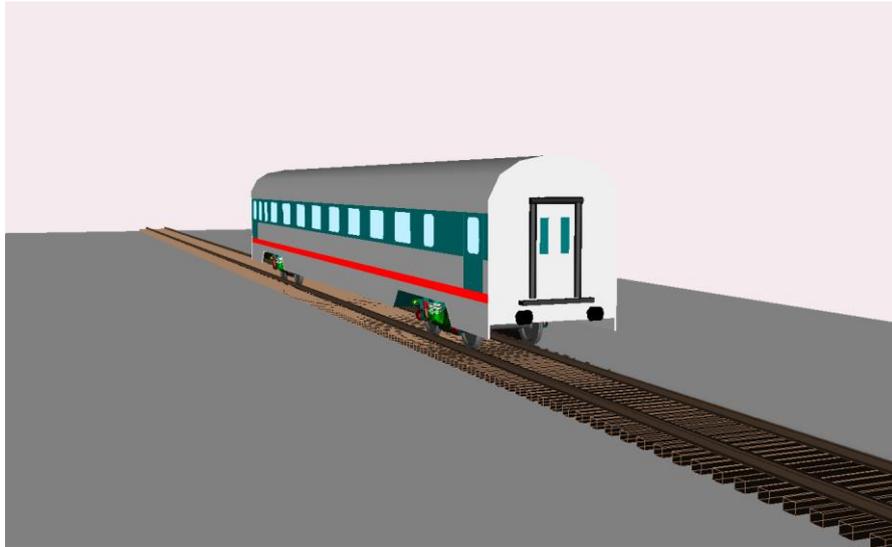


Рисунок 2.17 – Модель пассажирского вагона в условиях сценария 1 и 2

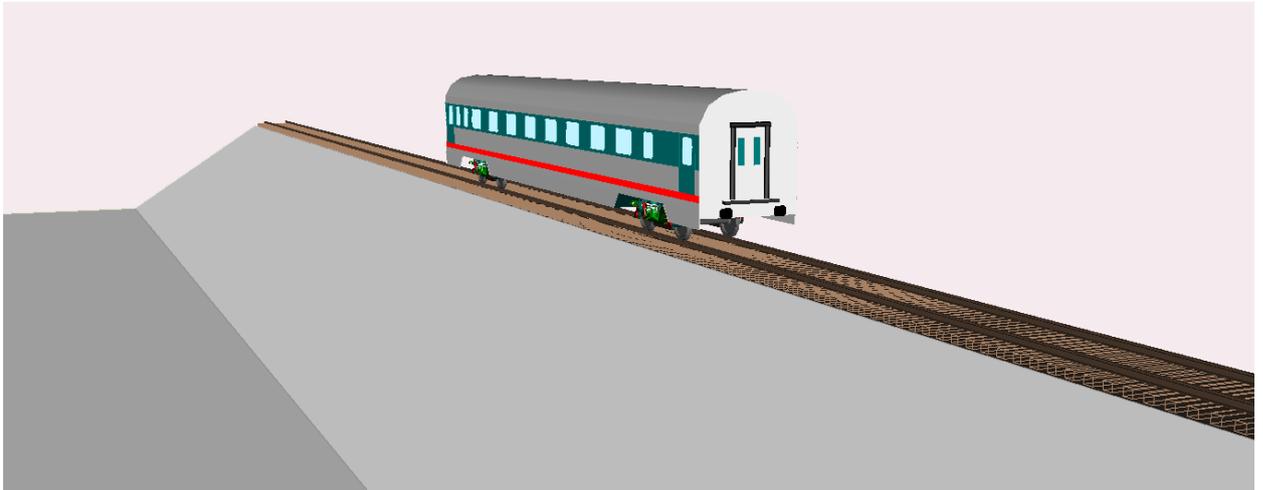


Рисунок 2.18 – Модель пассажирского вагона в условиях сценария 3 и 4

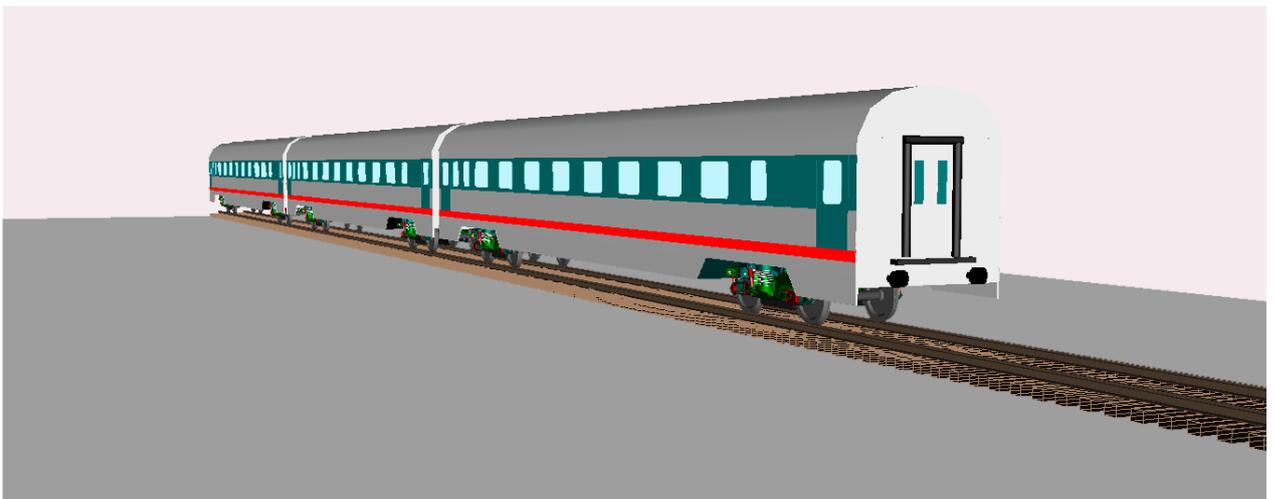


Рисунок 2.19 – Модель сцепа из трех пассажирских вагонов в условиях сценария 5

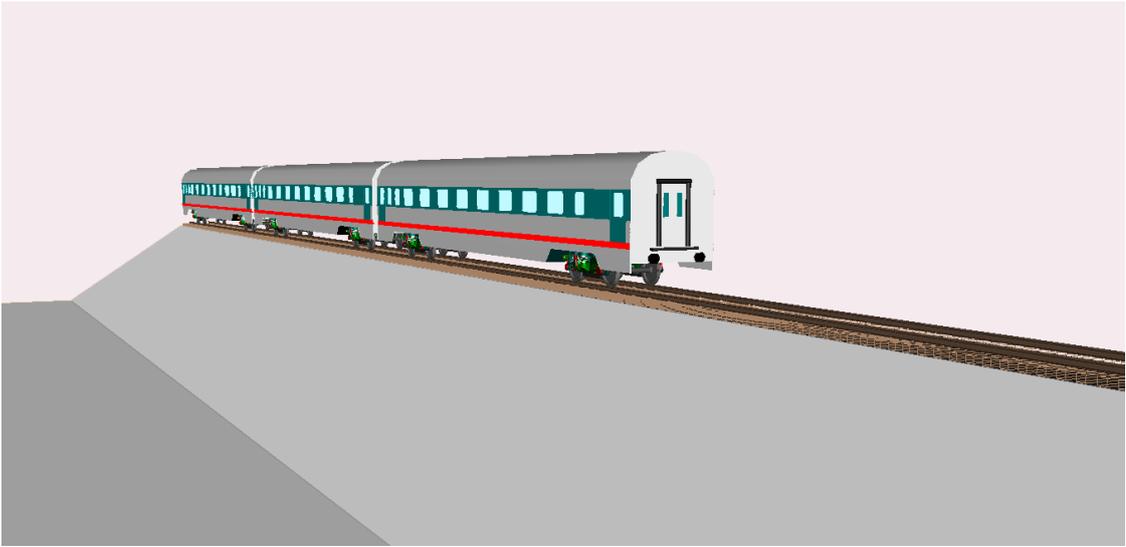
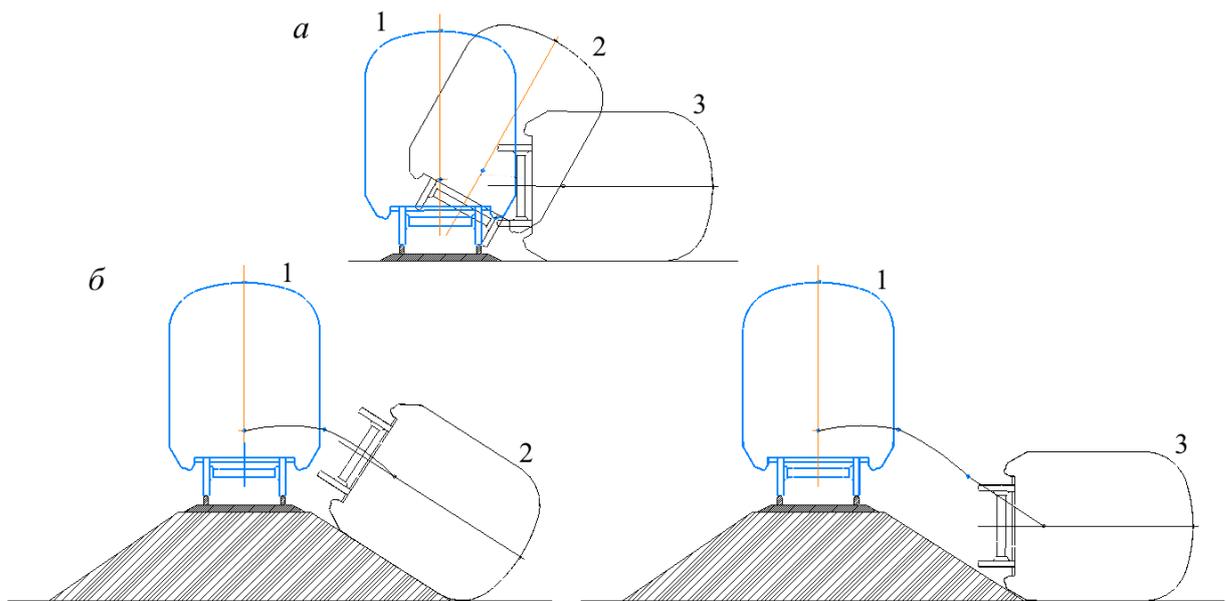


Рисунок 2.20 – Модель сцепа из трех пассажирских вагонов в условиях сценария б



*а – на плоскую горизонтальную поверхность; б – на наклонную поверхность;
1 – начальное положение; 2 – промежуточное положение вагона; 3 – конечное положение
вагона при опрокидывании*

Рисунок 2.21 – Схема опрокидывания пассажирского вагона

Моделирование аварийной ситуации проводится для опрокидывания вагона на обе стороны: боковую сторону, у которой располагаются купе вагона – сторона 1, сторону, у которой располагается проходом вагона – сторона 2.

Моделирование движения вагонов выполняется посредством модуля программного комплекса *UM Simulation*, в котором осуществляется

интегрирование полученных уравнений движения. Уравнение движения описывается системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} m\ddot{x} = \sum_{i=1}^n F_{xi} \\ m\ddot{y} = \sum_{i=1}^n F_{yi} \\ m\ddot{z} = \sum_{i=1}^n F_{zi} \\ I_x \dot{\omega}_{x'} + I_z \omega_y \omega_{z'} - I_y \omega_y \omega_{z'} = \sum_{j=1}^k M_{x'j} \\ I_y \dot{\omega}_{y'} + I_z \omega_x \omega_{z'} - I_x \omega_x \omega_{z'} = \sum_{j=1}^k M_{y'j} \\ I_z \dot{\omega}_{z'} + I_y \omega_x \omega_{y'} - I_x \omega_x \omega_{y'} = \sum_{j=1}^k M_{z'j} \end{array} \right. \quad 2.19$$

где m – масса пассажирского вагона; I_i – момент инерции кузова пассажирского вагона относительно центра масс системы xuz кузова; F_{ii} , M_{ij} – внешние силы и моменты действующие на кузов; $\omega_{i'}$ – проекции вектора угловой скорости вагона в системе координат кузова.

Движение одиночного вагона и сцепа вагонов моделируется при помощи специальных сил, описывающих тяговое усилие, которое прикладывалось к первому автосцепному устройству первого вагона в сцепе. Величина тягового усилия принималась в соответствии с реальной тяговой характеристикой электровоза ЧС-7 [152].

2.5 Разработка модели антропометрического манекена для оценки безопасности пассажирского вагона

2.5.1 Описание натурального антропометрического манекена

Для оценки безопасности транспортных средств в мировой практике используются проблемно-ориентированные антропометрические манекены [155]

различных конфигураций: *Side Impact Dummy* [113], *Rear Impact Dummy* [101], *THOR* [114], манекены семейства *Hybrid* [106] и др.

Антропометрические манекены позволяют выполнить анализ уровней динамических воздействий на составляющие их элементы: линейные и угловые перемещения, скорости и ускорения, контактные ударные усилия, возникающие при аварийных ситуациях на транспорте [153].

При разработке модели антропометрического манекена применены следующие допущения:

– геометрические параметры и масса составных элементов модели манекена повторяют соответствующие параметры частей реальной физической модели манекена;

– элементы модели соединены между собой посредством кинематических и силовых элементов.

Комплексный анализ, используемых для решения задач области воздействия усилий на пассажиров транспортных средств при аварийных ситуациях, позволил сделать вывод о перспективности использования моделей антропометрических измерительных комплексов, применяемых для моделирования аварий по различным сценариям.

Большое количество антропометрических манекенов ориентирована на оценку воздействия экстремальных условий аварийных ситуаций на пассажиров транспортных средств. Некоторая часть измерительных комплексов ориентирована на узкоспециализированные аварийные сценарии и адаптирована под них. Такие манекены имеют множество ограничений и способны воспринимать воздействия лишь в нескольких направлениях. Как правило, подобные антропометрические манекены приспособлены к применению для испытаний на конкретных видах транспорта.

При создании манекенов учитываются антропометрические характеристики людей различного пола, возраста, веса и т.д. С учетом имеющихся данных для определения геометрических и весовых параметров элементов манекенов используются зависимости масс-инерционных характеристик от перечисленных

выше признаков. Советскими учеными установлена зависимость массы частей тела человека от его роста и веса:

$$m_x = B_0 + B_1 \cdot m + B_2 \cdot H, \quad 2.20$$

где m_x – масса одного из сегментов тела, кг; m – масса всего тела, кг; H – длина тела, см; B_0 , B_1 , B_2 – коэффициенты регрессионного уравнения, они различны для разных частей тела [156].

Важным фактором в выборе типа антропометрического манекена является степень обоснованности получаемых результатов. Значительный опыт натурных исследований с применением антропометрических измерительных комплексов и полученные результаты, которые подвергаются верификации различными методами (сопоставление результатов с данными аналитических исследований, сравнение полученных результатов с результатами, полученными при реконструкции натурных испытаний и экспериментов) [157].

С развитием компьютерных технологий и наращиванием вычислительных мощностей появляется возможность использования виртуальных моделей пассажиров транспортных средств для оценки безопасности последних в условиях аварийных ситуаций. Создание математических моделей антропометрических измерительных комплексов в настоящее время дает возможность многократного проведения экспериментов, позволяет сократить материальные затраты и ускорить процесс анализа безопасности транспортного средства, а также в короткие сроки изменять конфигурацию комплекса или его элементов с целью проведения многофакторных исследований. Использование компьютерных моделей манекенов имеет неоспоримое преимущество в сравнении с традиционными методами исследования (натурными исследованиями).

В мировой практике нашли свое применение антропометрические модели манекенов, представленные абсолютно твердыми телами. Такие модели не требуют значительных вычислительных мощностей компьютеров и позволяют решать задачи оценки безопасности пассажиров транспортных средств с применением пользовательских вычислительных машин.

Проведя анализ существующих измерительных комплексов, выявлен наиболее подходящий для решения поставленных задач в данной работе с учетом вышеизложенных ограничений, комплекс, в который включен антропометрический манекен семейства *Hybrid III 50th Percentile Male*. Манекен подобного типа является универсальным, учитывает наибольшее количество факторов внешнего воздействия и отличается полнотой объема данных, отражающих результаты проведенных исследований. Указанный манекен соответствует «среднестатистическому» взрослому мужчине и является наиболее распространенным манекеном для испытаний транспортных средств на безопасность в условиях аварийных ситуаций.

2.5.2 Характеристики антропометрического манекена *Hybrid III 50th Percentile Male*

Натурный манекен *Hybrid III 50th Percentile Male*, разработанный в 1976 году, применялся для фронтальных краш-тестов, проводимых Исследовательским институтом безопасности дорожного движения Соединенных Штатов Америки.

Манекен предназначен для измерений ускорений и сил в аварийных ситуациях и имеет рост 172 см и вес 78,4 кг. Разработка манекена *Hybrid III* направлена на имитацию реакции человеческого тела для условий лобового столкновения [106]. Манекен используется в мировой практике для тестирования удерживающих систем в сценариях дорожно-транспортных происшествий, а также может использоваться для тестирования инвалидных колясок и других средств. Манекен *Hybrid III* предлагает стабильные результаты и множество измерительных возможностей.

Основу манекена составляет каркас, выполненный из стальных стержней, имитирующих скелет человека. Голова манекена состоит из алюминиевой оболочки, которая покрыта винилом, имитирующим кожный покров человека. Внутри головы расположены три датчика, которые измеряют угловое смещение

головы, силу удара и ускорение, которому подвергается голова при столкновении с препятствием. Внутри головы вставляется 1300 граммовый блок для имитации веса головного мозга.

Шея состоит из ассиметричных сегментов, которые крепятся к алюминиевым дискам, имитирующим шейные позвонки человека. Верхняя пластина шейного отдела позвоночника соединяется с головой манекена с помощью шарнирного соединения повторяющим атлантозатылочный сустав. Такая конструкция позволяет имитировать реакцию шеи человека на изгибающий момент в четырех направлениях («кивок» вперед-назад и боковой изгиб шеи) [106].

Грудной отдел антропометрического манекена *Hybrid III 50th Percentile Male* состоит из шести ребер, изготовленных из пружинной стали, закрепленных одним концом с жестким позвоночником, другим – с кожным элементом спереди грудины. К внутренней поверхности каждого ребра манекена присоединен амортизирующий материал для рассеивания энергии подобно грудной клетки человека. Поясничный отдел позвоночника представляет собой изогнутый цилиндрический элемент из полиуретана, внутри которого проходят стальные тросы, которые закрепляются к крайним пластинам позвоночника. Изогнутость поясничного отдела позволяет придать манекену сидячую позу [106]. Таз антропометрического манекена выполнен из алюминиевого сплава, покрытого кожей манекена – винилом.

Бедренная часть и голень манекена выполнены в виде стальных стержней, покрытых винилом. Между «кожей» манекена и «скелетом» для имитации мышц человека добавлена полиуретановая пена. В коленных суставах манекена под винилом вставлены резиновые прокладки. Голень манекена соединена со стопой посредством шаровой опоры. Такой же элемент крепления используется в соединении бедренной части с тазовым отделом манекена [106].

Шарнирные соединения антропометрического манекена представляют суставные части человеческого тела. Суставы симитированы с помощью стальных деталей и пластмассовые втулок.

Динамические модели и антропометрические манекены, применяемые для изучения нагруженности пассажиров в аварийных ситуациях, должны быть эквивалентными телу человека по ряду основных показателей [158]:

- по геометрическим параметрам;
- по распределению масс частей человеческого тела, включая значения этих масс и соответствующих им моментов инерции, а также расположение центров масс рассматриваемых частей тела;
- по видам соединений отдельных элементов;
- по упругодемпфирующим характеристикам.

На этапе теоретического моделирования и создания манекенов человеческое тело рассматривают в качестве механической системы тел, соединенных упругодемпфирующими связями. Структура механической модели человека во многом определяет результаты моделирования, поэтому ее выбирают с учетом экспериментальных данных в виде частотных характеристик, а также антропометрических и биомеханических параметров человеческого тела [158].

Упругодемпфирующие связи, включенные в манекен, описывают поведение вязкоупругого материала согласно [159]. Поведение вязкоупругого материала подобно условной механической системы, состоящей из двух параллельно соединенных звеньев разной природы. Упругое звено определяет поведение при медленном статическом нагружении, когда демпфер вязкоупругого звена не сопротивляется деформации и не воспринимает напряжения. В случае конечной скорости деформации работают оба звена системы, причем сопротивление демпфера зависит от скорости деформации. При очень быстром динамическом (мгновенном) нагружении демпфер «запирается», в нем не происходит деформации и напряжение распределяется между упругими элементами двух звеньев. В этом случае реакция системы является упругой, однако жесткость повышается по сравнению с медленным упругим деформированием [160].

Наиболее точно подобное явление описывают модели Максвелла и Кельвина. Общая деформация модели Максвелла под влиянием сдвиговых напряжений равна сумме его упругой деформации и деформации течения, т.е.:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \varepsilon_E + \varepsilon_\eta \\ \dot{\varepsilon} &= \dot{\varepsilon}_E + \dot{\varepsilon}_\eta\end{aligned}\quad 2.21$$

где ε_E и ε_η - соответственно деформация упругого и вязкого тела.

Дифференциальное уравнение, описывающее трехэлементную модель Кельвина:

$$\dot{\sigma} + \frac{E_1 + E_2}{\eta} \sigma = \frac{E_1 E_2}{\eta} \varepsilon + E_1 \dot{\varepsilon}, \quad 2.22$$

где η - вязкость; E_1 и E_2 - модуль упругости для соответствующих элементов.

Таким образом, математическую модель антропометрического манекена можно представить в виде схемы (рисунок 2.22). Модель манекена состоит из абсолютно твердых элементов, описывающих элементы манекена *Hybrid III 50th Percentile Male*, соединяющие их шарнирные элементы, имитирующие суставы человека, упругодемпфирующие связи между шейными позвонками, а также между элементами ребер и грудной клеткой.

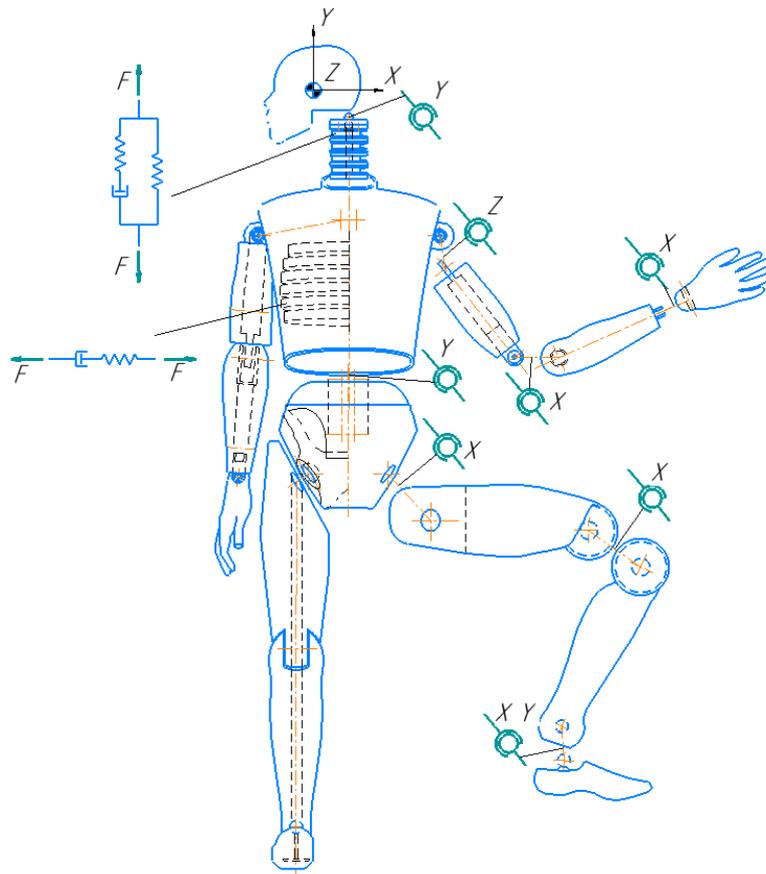


Рисунок 2.22 – Схема механической модели антропометрического манекена

Для возможности сгибания-разгибания элементов бедер относительно тазового элемента манекена в разрабатываемую математическую модель внесено изменение геометрических характеристик тазового отдела. Элементы бедер удлинены для соединения с тазовым элементом посредством тазобедренного шарнира, а тазовый элемент усечен. Таким образом, принятые изменения позволят имитировать кинематику движения бедренных элементов подобно человеческому телу. Модель манекена испытывает нагрузки, представленные в таблице 2.2.

Таблица 2.2 –Направления действия нагрузок на элементы манекена по осям координат

Элемент манекена	Ускорения	Сила	Моменты	Перемещения
Голова	X, Y, Z	-	-	-
Шея	-	X, Y, Z	X, Y, Z	-
Грудная клетка	X, Y, Z	X, Y, Z	X, Y, Z	X
Поясничный отдел позвоночника	-	X, Z	Y	
Плечо	-	X, Y	X, Y	-
Таз	X, Y, Z	X	-	-
Бедро	-	X, Y, Z	X, Y, Z	X
Колено	-	Z	-	-
Стопа	-	X, Y, Z	X, Y	-

2.5.3 Разработка компьютерной модели антропометрического манекена

Для разработки модели антропометрического манекена необходимо учитывать следующее:

- модель должна в точности повторять натурный антропометрический манекен, а именно учитывать геометрические, весовые и инерционные характеристики;

- ограничения поворота элементов модели относительно друг друга;

- систематическую нумерацию деталей, узлов и элементов для упрощения и позиционирования модели;

- доступность включения модели антропометрического манекена в модель пассажирского вагона.

Для создания модели манекена, которая в точности могла бы повторять кинематические свойства физического манекена и его элементов, важным аспектом является детальное воспроизведение геометрических характеристик натурального манекена.

На основе данных антропометрического манекена в среде программного комплекса моделирования динамики систем тел «Универсальный механизм» разработана динамическая модель антропометрического манекена. Модель представляет собой совокупность абсолютно твердых тел с реальными весовыми и геометрическими характеристиками, связанными между собой вращательными шарнирами с заданными упруго-диссипативными характеристиками, подобно суставам человеческого тела. Детальная разработка модели манекена позволяет изучить каждый элемент манекена и дает представление о характеристиках и функциях каждой части по отдельности и манекена в целом.

Контактные взаимодействия между элементами модели манекена заданы как пары соприкасающихся поверхностей, не позволяющие проникновение частей друг в друга.

Модель антропометрического манекена (рисунок 2.23) для исследования безопасности пассажиров, находящихся в вагоне, имеет основные узлы: голова, шея, туловище, таз, рука, нога.

Голова модели манекена описывается абсолютно твердым телом. Она включает в себя соединительный элемент с шейным отделом позвоночника, моделирующим атлантозатылочный сустав.

Модель шеи состоит из четырех типов элементов: соединительного кронштейна с головой манекена, диски шеи, элементы имитирующие межпозвонковые соединения, крепление шейного отдела позвоночника.

Туловище модели манекена включает в себя ребра и наружную обшивку, между которыми задаются специальные элементы, имитирующие упругодемпфирующую связь.

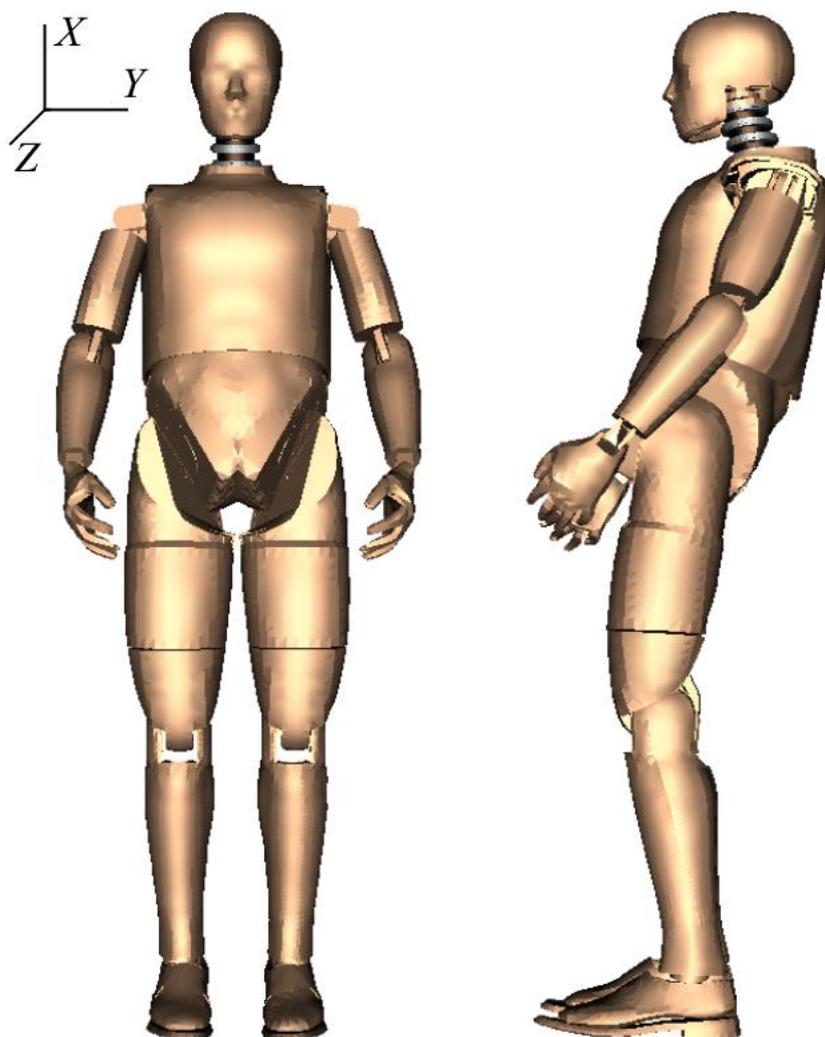


Рисунок 2.23 – Общий вид модели антропометрического манекена, разработанной в программном комплексе «Универсальный механизм»

Тазовая часть модели манекена состоит из поясничного отдела позвоночника, опоры, брюшной полости, наружной обшивки. Поясничный отдел соединен с грудным отделом посредством вращательного шарнира, имеющего вращательную степень свободы относительно оси Y . Опора для поясничного отдела представлена жестким блоком и жестко закреплена к тазу. Брюшная полость модели манекена соединяется с обшивкой посредством упругодемпфирующего соединения.

Руки модели манекена состоят из плечевого элемента, предплечья и кисти. Плечевой элемент манекена соединен с туловищем с помощью шарнирного соединения, имеющего вращательную степень свободы относительно оси Z . Кисть манекена моделируется абсолютно твердым телом и имеет соединение

с предплечьем посредством шарнира с вращательной степенью свободы относительно оси X .

Ноги модели манекена состоят из бедренных частей, голеней и ступней. Бедренная часть соединена с тазовой с помощью шарнирного соединения с вращательной степенью свободы относительно оси X . Также бедро имеет шарнирное соединение с голенью модели манекена с вращательной степенью свободы относительно той же оси. Голень модели манекена представлена абсолютно твердым телом. Голень имеет шарнирное соединение со стопой модели, с вращательной степенью свободы относительно оси Y .

Для описания кинематики движения частей тела человека в модели манекена введены ограничения поворота (таблица 2.3) его составных элементов в соответствии с реальными возможностями суставов человека, а также учтена возможность контактного взаимодействия элементов манекена между собой при помощи набора специальных контактных элементов, позволяющих ограничить проникновение частей манекена друг в друга при их взаимном перемещении [137].

Таблица 2.3 – Характеристики модели антропометрического манекена

Наименование элемента манекена	Весовые характеристики, кг	Ограничения поворота в шарнирных соединениях, град.		
		X	Y	Z
Голова	4,54	0	± 75	0
Шея	1,54	+70 -60	± 75	± 30
Туловище	17,19	0	± 20	0
Таз	23,04	+90 -20	± 20	± 20
Плечо	2,00	± 95	± 50	± 90
Предплечье	1,7	+145	0	0
Кисть	0,57	± 85	± 60	0
Бедро	5,99	+50 -120	± 80	± 30
Голень	4,29	+140	0	0
Стопа	1,16	± 40	± 20	0

2.6. Верификация модели антропометрического манекена

Для подтверждения адекватности разработанной модели антропометрического манекена проведен сравнительный анализ материалов исследований Федеральной администрации железных дорог США [161]

с результатами моделирования. Испытания проводились в соответствии со стандартом Американской ассоциации общественного транспорта [162].

Основной особенностью, приведенной в работе [163], является исследование безопасности пассажиров поезда с местами для сидения, с расположением кресел лицом к друг другу.

В испытательный стенд, состоящий из двух рядов парных кресел, жестко закрепленных на платформе и располагающихся на расстоянии 1450 мм, размещаются манекены.

Максимальное значение ускорения равно $8g$ прикладывается к платформе с креслами с кратковременным воздействием не более 250 мс.

Предложенный испытательный стенд и манекены оснащены необходимым оборудованием для регистрации нагрузок, ускорений и деформаций элементов при ударе пневматического пресса в кресло и дальнейшей передачи и обработки сигналов на ЭВМ.

Для моделирования условий испытаний предложена расчетная схема состоящая из твердотельной модели платформы, с жестко закрепленными на ней двумя рядами пассажирских кресел, которые также являются твердыми телами (рисунок 2.24).

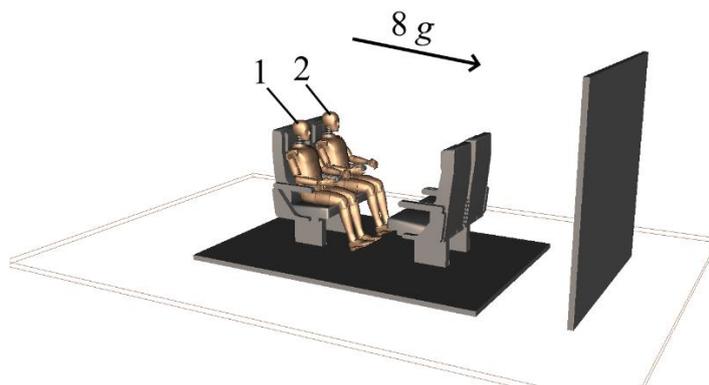


Рисунок 2.24 – Расчетная схема в соответствии с требованиями Федеральным управлением железных дорог США

Кресла жестко зафиксированы на платформе. В креслах, по направлению движения платформы, располагаются разработанные твердотельные модели антропометрического манекена. Максимальное ускорение, которое задается платформе, составляет $8g$. В расчетную схему включены силовые контактные

элементы, которые обеспечивают упруго-диссипативные характеристики моделей кресел и антропометрических манекенов. Параметры жесткости кресел приняты в соответствии с [163]. Нормированные значения критериев травмирования для антропометрических манекенов различных типов приведены в таблице 2.4.

Посредством математического моделирования получены временные зависимости динамических усилий, воздействующих на элементы манекена.

Таблица 2.4 – Критические значения критериев травмирования

Рекомендованный критерий	Тип манекена					
	<i>Hybrid III</i> 95 процентильный мужчина	<i>Hybrid III</i> 50 процентильный мужчина	<i>Hybrid III</i> 5 процентильная женщина	<i>Hybrid III</i> 6- летний ребенок	<i>Hybrid III</i> 3- летний ребенок	<i>CRABI</i> 1- летний ребенок
Критерий травмирования головы <i>HIC</i> (36мс)	1000	1000	1000	1000	900	660
Критерий травмирования шеи <i>Nij</i>	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Растяжение/сжатие, Н	5440	3600	3370	2800	2120	1465
Изгибающий момент (сжатие), Н·м	415	310	155	93	68	43
Изгибающий момент (растяжение), Н·м	166	125	62	39	27	17
Критерий травмирования грудной клетки <i>STI</i>						
<i>STI(a)</i> Ускорение грудного отдела, g	85	85	85	85	70	55
<i>STI(d)</i> Деформация грудного отдела, мм	125	102	83	63	57	49
Критерий травмирования бедра <i>FFC</i> Нагрузка на бедро, кН	12,7	10,0	6,8	-	-	-

На основании полученных данных рассчитаны критерии травмирования головы, шеи, грудного отдела и бедра. При верификации сопоставлялись величины критериев, полученные экспериментальным путем, описанным в [164] и расчетным путем. Результаты сопоставления представлены в таблице 2.5

Таблица 2.5 – Сопоставление значений критериев травмирования при моделировании и натуральных испытаниях

Критерий травмирования	Значение критерия			
	испытания		моделирование	
	манекен №1	манекен №2	манекен №1	манекен №2
<i>HIC</i> (36 мс)	265,7	104,1	311,4	125
N_{ij}	1,47	1,32	1,63	1,26
Растяжение, Н	4640	1112	5024	1365
Сжатие, Н	-3780	-1507	-4112	-1810
Изгибающий момент (растяжение), Н·м	86	220	95	232
Изгибающий момент (сжатие), Н·м	-50	-34	-61	-39
<i>STI</i> (3 мс), g	18,2	14,2	19,5	16,7
<i>FFC</i> (левое бедро), кН	7,1	3,5	7,8	4
<i>FFC</i> (правое бедро), кН	7,2	1,65	8,1	1,9

Анализ полученных результатов показывает, что значения полученных критериев травмирования качественно и количественно близки, разница значений не превышает 22,7 %. По результатам сопоставления можно сделать вывод об адекватности разработанной модели антропометрического манекена.

Выводы по разделу 2

1 Сформулированы основные принципы создания методики определения безопасности пассажирских вагонов при опрокидывании. Разработанная методика базируется на применении программных комплексов, моделирования динамики систем тел и реализующих метод конечных элементов с использованием явной схемы интегрирования, основанной на методе центральных разностей.

2 Разработаны компьютерные модели кузова пассажирского купейного вагона 61-4440: твердотельная и пластинчатая конечноэлементная модели кузова вагона. Модель вагона дополнена моделями тележки и автосцепного устройства.

3 Разработаны компьютерные модели опрокидывания пассажирского вагона, включающие шесть сценариев опрокидывания.

4 Разработана твердотельная модель антропометрического манекена, представляющая собой совокупностью абсолютно твердых тел, соединенных между собой вращательными шарнирами с соответствующими упругодемпфирующими характеристиками и ограничениями поворота. Для определения деформации элементов в модель манекена включены реологические модели материалов, описывающие вязкоупругие свойства биологических сред человека.

5 Проведена верификация разработанных компьютерных моделей, которая показала незначительное расхождение результатов компьютерного моделирования с результатами натурных стендовых испытаний как для кузова вагона, так и для модели манекена.

Принятые допущения и ограничения.

1 Опрокидывание вагона на насыпь рассматривается на прямом горизонтальном участке пути.

2 Скорость движения подвижного состава при опрокидывании пассажирского вагона принималась равной 60 км/ч.

3 Малые скорости движения в 10 – 15 км/ч принимались равными нулю.

4 Взаимодействие между моделями манекенов при моделировании опрокидывания пассажирского вагона не учитывалось.

5 Массы тяжеловесного оборудования распределены по конечным элементам модели кузова.

6 Разрушение элементов интерьера купе вагона не учитывалось.

7 Модель насыпи рассматривалась как сплошное тело. Деформация грунта не учитывалась.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ ПРИ ОПРОКИДЫВАНИИ

3.1 Применение разработанной методики для моделирования опрокидывания пассажирского вагона

Для оценки безопасности пассажирского вагона для пассажиров, находящихся в салоне вагона при аварии с опрокидыванием, в разработанной трехмерной детализированной модели пассажирского вагона размещена модель антропометрического манекена. Положение манекена задано в соответствии с возможными положениями пассажира в салоне купейного вагона. Для моделирования опрокидывания вагона определено 12 положений пассажира в купе вагона:

- 1 – сидит у окна по ходу движения вагона;
- 2 – сидит у окна проема против хода движения вагона;
- 3 – сидит у двери купе по ходу движения вагона;
- 4 – сидит у двери купе против хода движения вагона;
- 5 – лежит на верхней полке по ходу движения вагона головой к окну;
- 6 – лежит на верхней полке против хода движения вагона головой к окну;
- 7 – лежит на нижней полке по ходу движения вагона головой к окну;
- 8 – лежит на нижней полке против хода движения вагона головой к окну;
- 9 – лежит на верхней полке по ходу движения вагона головой к двери купе;
- 10 – лежит на верхней полке против хода движения вагона головой к двери;
- 11 – лежит на нижней полке по ходу движения вагона головой к двери купе;
- 12 – лежит на нижней полке против хода движения вагона головой к двери.

Рассматриваемые положения для модели манекена в купе вагона показаны на рисунке 3.1.

Для моделирования аварийной ситуации и выявления кинематики движения антропометрического манекена при опрокидывании для каждого разработанного

сценария, описанного в главе 2, проведен ряд виртуальных экспериментов, в соответствии с которыми модели антропометрического манекена поочередно задавалось возможное положение пассажира в купе вагона. Общее количество проведенных экспериментов, с учетом опрокидывания вагона на обе боковые стороны, по разработанным сценариям составило 144.

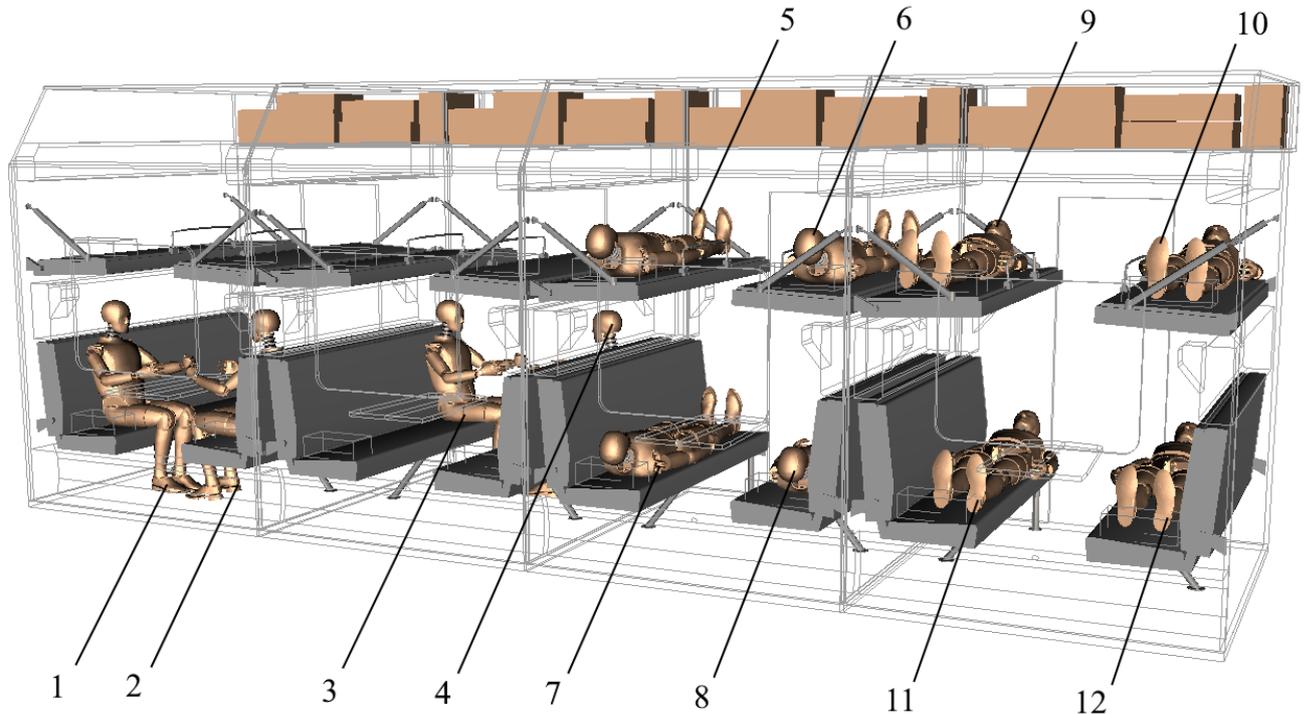


Рисунок 3.1 – Положения модели антропометрического манекена в купе пассажирского вагона

В соответствии со сценарием опрокидывания пассажирского вагона на плоскую поверхность с малой скоростью движения (сценарий 1), проведено опрокидывание вагона. Общее время опрокидывания вагона для указанного сценария составило 4 секунды. Кинематика движения модели манекена, расположенного на позиции 3 при опрокидывании вагона на боковую сторону 1 по сценарию 1 представлена на рисунке 3.2. В приложении А приведена кинематика движения манекена для положений 6 и 7 при опрокидывании вагона с малыми скоростями движения на плоскую поверхность.

Для рассматриваемого сценария опрокидывания вагона анализ полученных картин моделирования выявил зоны контактных взаимодействий модели антропометрического манекена с элементами салона купе вагона. Так голова

модели манекена, для положений 1 – 8 взаимодействует с боковой стеной купе вагона. Для положений модели манекена на верхних полках купе (положения манекена 5, 6, 9, 10) наблюдается взаимодействие грудного отдела и бедер манекена с ручной кладью, которая при опрокидывании падает со штатных мест ее расположения.

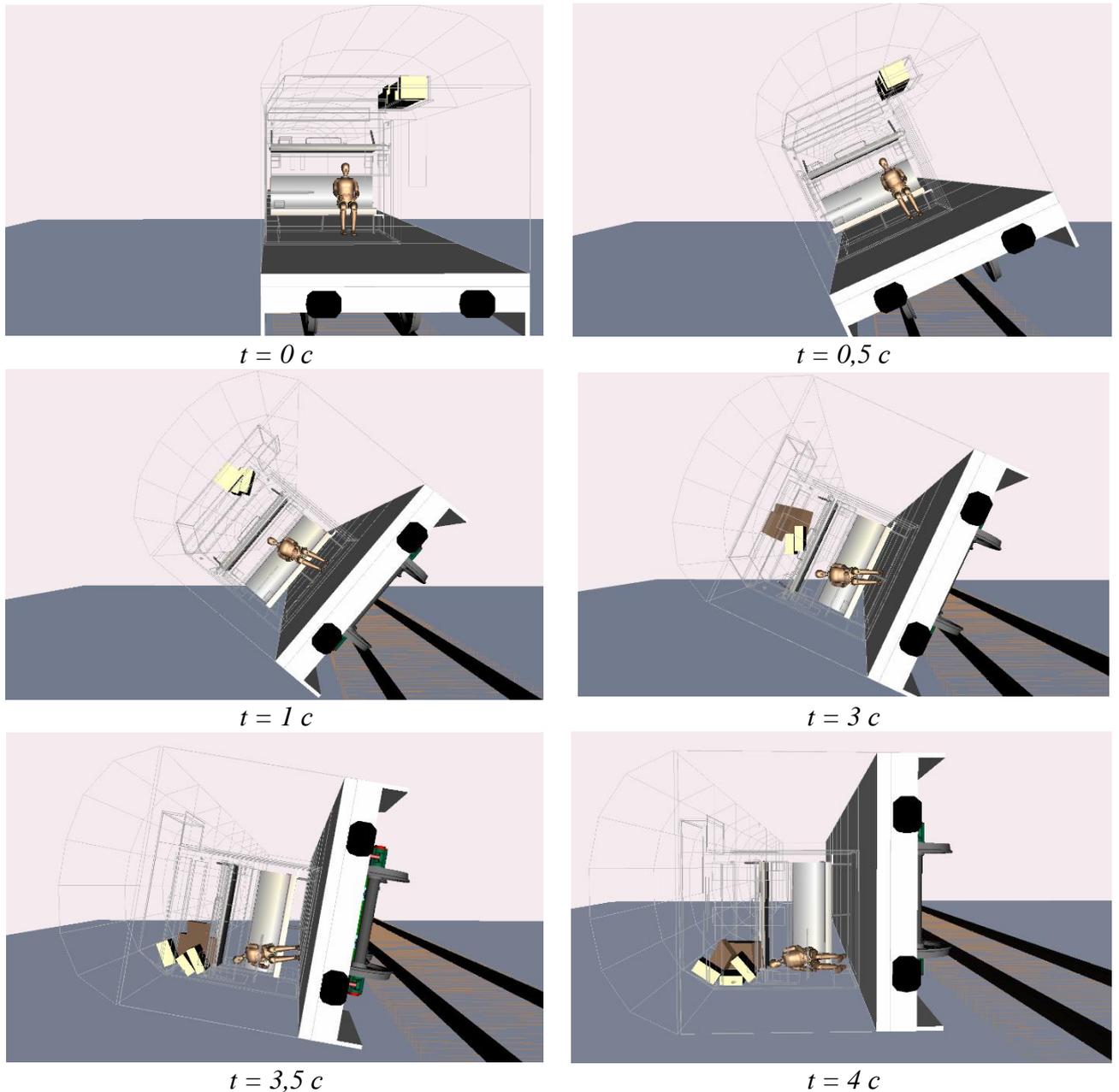


Рисунок 3.2 – Кинематика движения манекена при опрокидывании вагона по сценарию 1 для положения манекена 3

При опрокидывании вагона на противоположную сторону вагона отмечено контактное взаимодействие между головой, грудью и бедренными элементами

манекена с потолком купе для положений манекена 5, 6, 9 и 10. Выявлены контактные взаимодействия головы модели манекена с боковой стеной купе для положений 1 – 4, 9, 10, 11 и 12. Для положений манекена 7 и 8 наблюдаются контактные взаимодействия головы манекена, грудного отдела и бедер с нижней поверхностью верхней полки купе.

В соответствии со сценарием опрокидывания вагона на наклонную поверхность с малыми скоростями движения для модели манекена также задано 12 возможных положений пассажира в купе вагона. Кинематика движения манекена при опрокидывании пассажирского вагона на насыпь железнодорожного полотна по сценарию опрокидывания 3 для положения манекена 7 представлена на рисунке 3.3. В приложении Б приведена кинематика движения для манекенов в положении 3 и 6 при опрокидывании вагона на боковую сторону 1.

Для указанного сценария выявлены контактные взаимодействия модели манекена с элементами интерьера купе вагона и моделями ручной клади, а именно: при опрокидывании вагона на боковую сторону 1 наблюдается контактное взаимодействие головы манекена с боковой стеной для манекена в положениях 1 – 8, с поверхностью потолка купе и ручной кладью, падающей с багажных полок – для положений манекена 9 и 10, с нижней поверхностью верхней полки купе – для положений манекена 11 и 12. Контактные взаимодействия грудного отдела с ручной кладью отмечены для манекенов 5, 6, 9 и 10, с поверхностями потолка и нижней поверхностью верхней полки купе для манекенов в положениях 9 – 12. Выявлены контактные взаимодействия бедренных элементов манекена с падающей ручной кладью для положений манекена 5, 6, 9 и 10.

При опрокидывании вагона на боковую сторону 2 отмечены контактные взаимодействия головы модели манекена с боковыми стенами купе для положений манекена 1 – 4, 9 – 12, с поверхностью потолка – для манекенов в положениях 5 и 6, с нижней поверхностью верхней полки купе – для манекенов 7 и 8. Выявлены контактные взаимодействия грудного отдела с поверхностью потолка

для манекенов 5, 6, 9 и 10, с нижней поверхностью верхней полки купе
для манекенов 7, 8, 11 и 12.

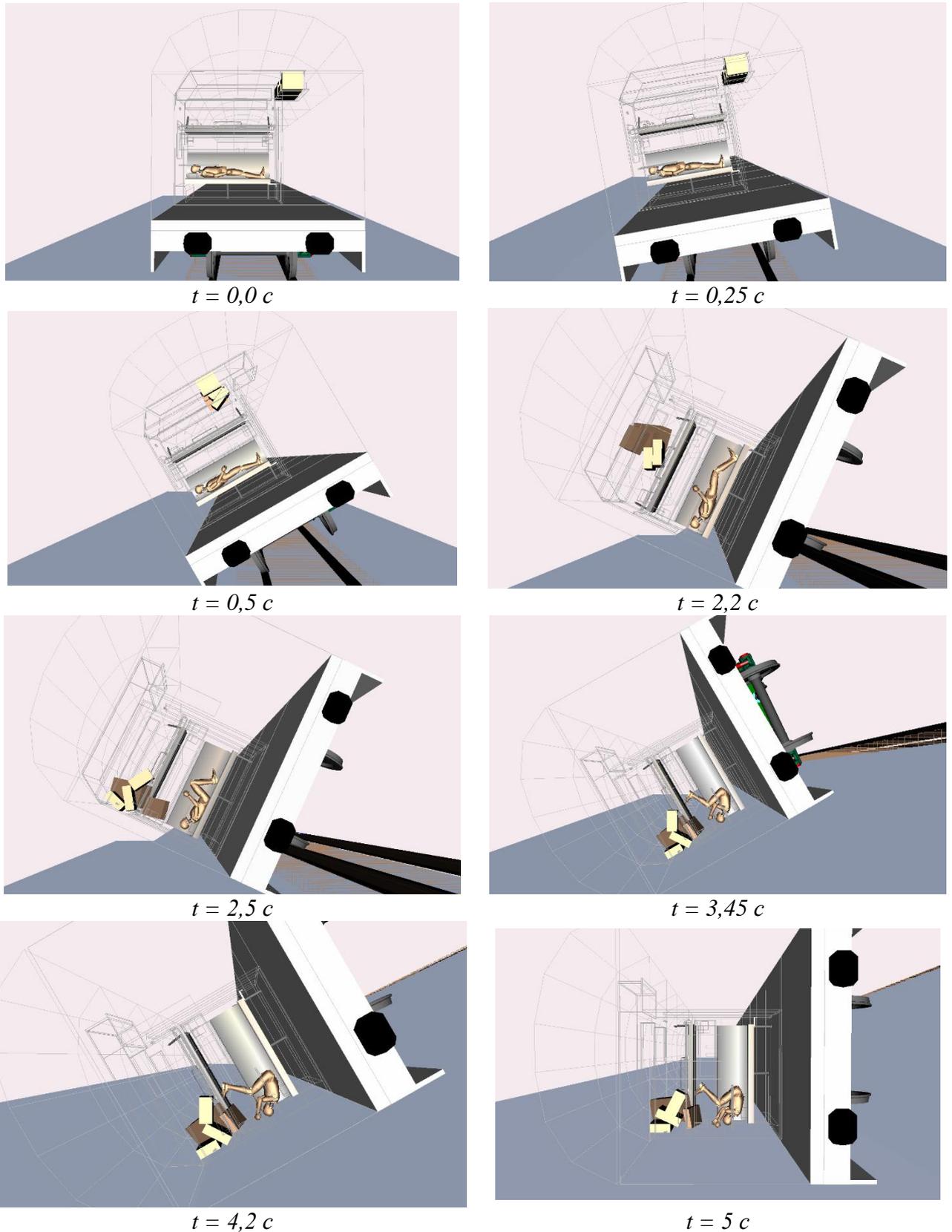


Рисунок 3.3 – Кинематика движения манекена при опрокидывании вагона по сценарию 3 для положения манекена 7

Контактные взаимодействия бедра модели манекена с поверхностью потолка отмечены для манекенов, располагающихся на верхних полках купе, с нижней поверхностью верхней полки – для манекенов 7, 8, 11 и 12. Контактных взаимодействий манекена с элементами, описывающими ручную кладь при опрокидывании вагона на боковую сторону 2 не наблюдается.

Кинематика движения модели манекена в положении 6 при опрокидывании вагона в соответствии со сценарием 2 представлена на рисунке 3.4. Скорость в момент начала опрокидывания пассажирского вагона принималась равной 60 км/ч. Опрокидывание пассажирского вагона осуществляется в момент времени $t = 1$ с.

При опрокидывании вагона на боковую сторону 1 по сценарию 2 наблюдаются контактные взаимодействия элементов манекена с поверхностями купе и ручной кладью качественно близкие к контактным взаимодействиям, полученными при моделировании опрокидывания по сценарию 1.

При моделировании опрокидывания по сценарию 2 выявлены дополнительные контактные воздействия между элементами манекена и интерьером купе вагона. А именно, для манекенов 1, 3 и 11 отмечены контакты грудного отдела модели манекена со столом купе, что происходит в связи с движением манекена по инерции движения вагона в момент опрокидывания, при скорости движения, соответствующей сценарию опрокидывания. Также отмечено контактное взаимодействие бедер манекена с боковыми поверхностями (кромками) стола купе. В приложении В сведена кинематика движения модели манекена для положений манекена 3, 7 и 8.

Кинематика движения модели манекена при опрокидывании вагона по сценарию 4 сведена в приложении Г. Для моделирования опрокидывания пассажирского вагона по указанному сценарию наблюдаются схожие контактные взаимодействия элементов модели манекена с элементами интерьера купе вагона и с моделями ручной клади, которая падает с багажных полок при наклоне кузова вагона.

Проведя моделирование аварийных сценариев 5 и 6, при которых сцеп из трех вагонов на скорости движения сходит с рельс и опрокидывается на насыпь, выявлено незначительное отличие кинематики движения манекена в сравнении со сценариями 2 и 4, при которых одиночный вагон опрокидывается на плоскую и наклонную поверхности с учетом скорости движения вагона.

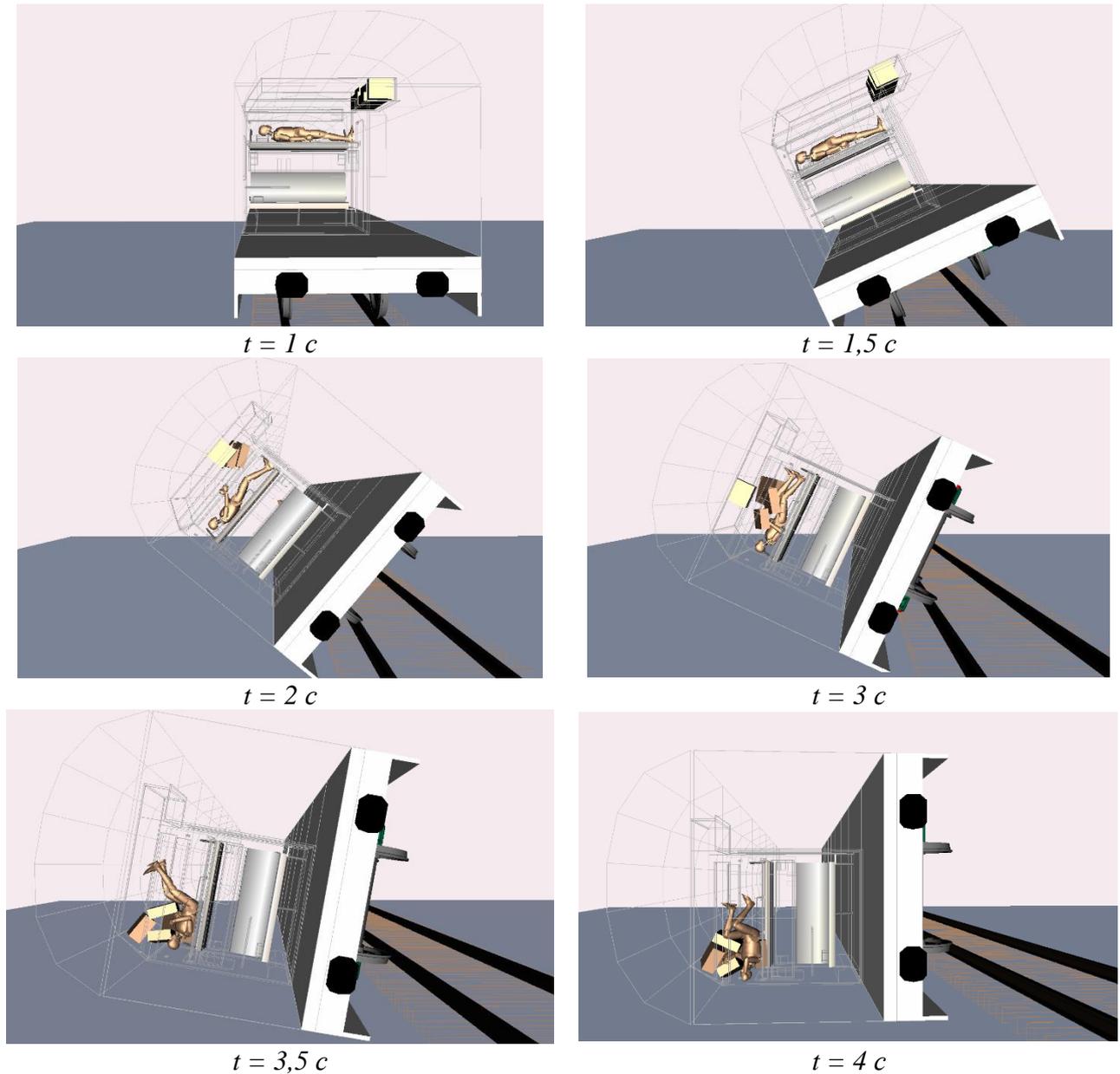


Рисунок 3.4 – Кинематика движения манекена при опрокидывании вагона по сценарию 2, положение манекена б

Анализируя данные, полученные в ходе моделирования, выявлены зоны, с которыми наблюдается частое взаимодействие элементов манекена с элементами

интерьера купе вагона, такие как боковые стены купе, кромка стола, поверхность потолка и нижняя поверхность верхней полки купе. Также отмечено частое взаимодействие моделей ручной клади на модель манекена при ее падении со штатных мест размещения.

По результатам математического моделирования получены графики динамических воздействий на элементы манекена: ускорения головы модели манекена, силы и изгибающие моменты, действующие на шейный отдел позвоночника модели манекена, сжимающие усилия, действующие на бедренные элементы манекена и деформацию грудного отдела для каждого положения модели манекена по рассматриваемым сценариям опрокидывания вагона. В качестве примера на рисунке 3.5 приведены графики динамических воздействий на элементы манекена в положении 3, полученные в результате моделирования опрокидывания вагона на боковую сторону 1 по сценарию 1.

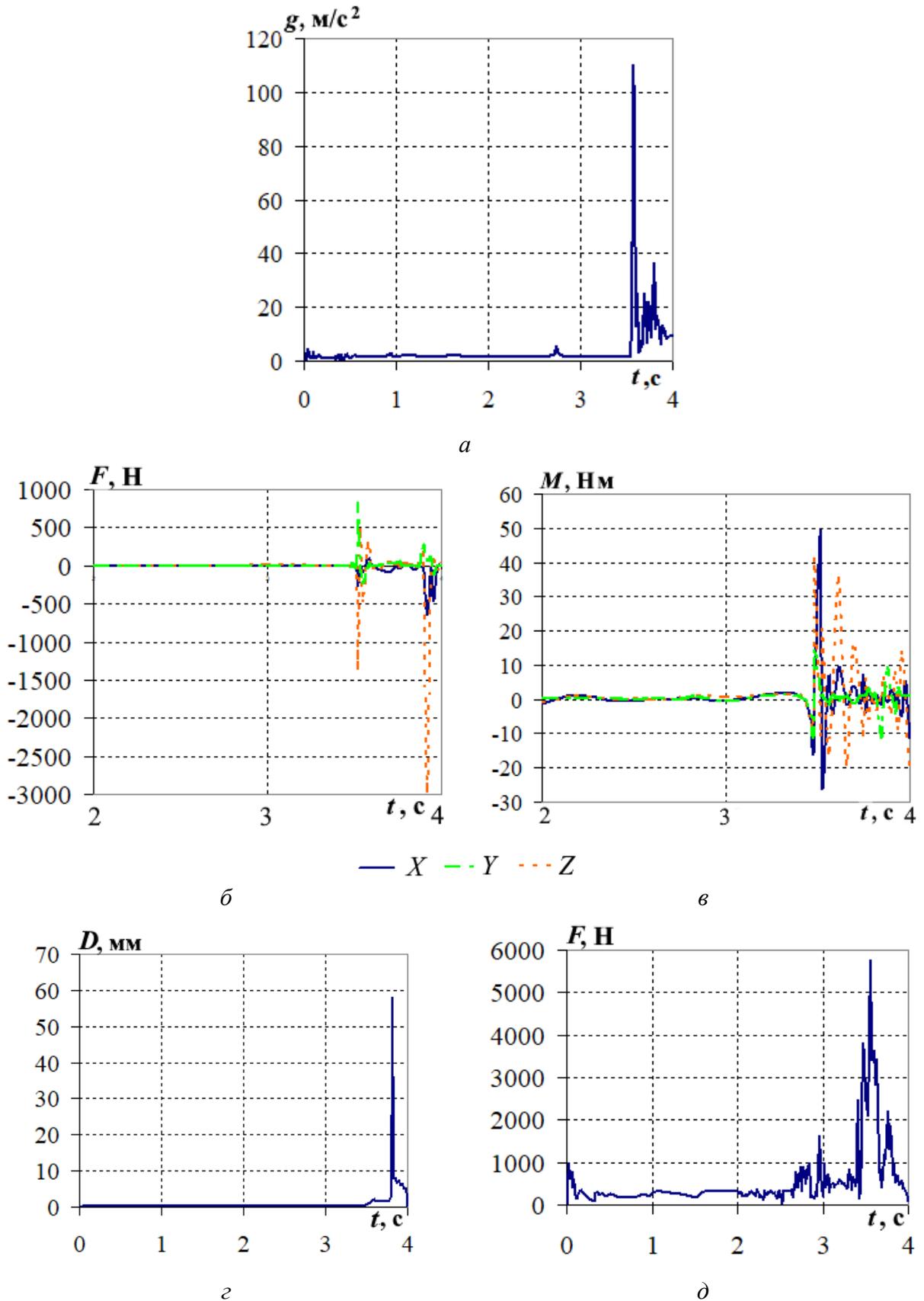
В приложении Д сведены зависимости динамических воздействий, полученные в результате моделирования опрокидывания вагона по сценарию 1, для положений манекена 5, 6 и 7, и в приложении Е – по сценарию 3 для положений манекена 3, 5, 6 и 7.

В приложении Ж, И сведены графики динамических воздействий на модель манекена при опрокидывании вагона на боковую сторону 2 для положений модели манекена 3, 5, 6 и 7 по сценариям 1 и 3.

3.2 Определение критериев травмирования

Методика расчета критерия *НИС* построена без учета биомеханической структуры головы человека как многокомпонентной вязкоупругой системы и не соответствует общепринятым в механике и биомеханике методикам анализа задач подобного рода.

Критерий *НИС* является нормированным уровнем замедления головы для динамических испытаний ($60g$ в течение 3 мс). При этом количественная оценка для экспериментально полученных кривых ускорений осуществляется методами численного интегрирования. Аналитически могут быть определены значения



а – ускорение головы модели манекена; *б* – сила, действующая на шею манекена; *в* – момент, действующий на шею манекена; *г* – деформация грудного отдела; *д* – сила, действующая на бедро модели манекена

Рисунок 3.5 – Динамические воздействия на элементы модели манекена при опрокидывании вагона по сценарию 1 на боковую сторону 1

индексов лишь для простых импульсов (например, с синусоидальным, трапецевидным, треугольным и другими законами изменения ускорений по времени).

Критерий травмирования головы определяется выражением:

$$HIC = \max_{t_1, t_2} \left\{ \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a \cdot dt \right]^{2,5} t_2 - t_1 \right\}, \quad 3.1$$

где t_1 и t_2 — значение времени, соответствующие начальному и конечному моментам ударного воздействия на голову манекена, с; определяется временной интервал, при котором HIC достигает своего наибольшего значения; a — результирующее замедление центра тяжести головы манекена, являющееся геометрической суммой трех составляющих замедления центра тяжести головы манекена:

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}. \quad 3.2$$

В общем случае расчетное определение критерия НИС сводится к решению задачи максимизации функции двух переменных.

Для аналитического определения критерия травмирования принимают подынтегральную функцию $a \cdot dt$ в качестве простого непрерывного ударного импульса, которая аппроксимируется синусоидальной кривой с одним экстремальным значением. Простой ударный импульс определяется аналитической функцией и характеризуется двумя независимыми параметрами: периодом воздействия по времени и амплитудой.

Формулу 3.1 рассматривается как дифференцируемая функция двух независимых переменных $f(t_1, t_2)$. Функция имеет экстремум в точке на отрезке $[t_1, t_2]$ если первые частные производные в этой точке равны нулю. Чтобы критическая точка оказалась экстремальной, необходимо исследовать поведение второй производной в окрестности этой точки. Первые частные производные относительно t_1 и t_2 :

$$\frac{\partial f}{\partial t_1} = 1,5(t_2 - t_1)^{-2,5} \left(\int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right)^{2,5} + 2,5(t_2 - t_1)^{-1,5} \left(\int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right)^{1,5} \frac{\partial}{\partial t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt. \quad 3.3$$

$$\frac{\partial f}{\partial t_2} = -1,5(t_2 - t_1)^{-2,5} \left(\int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right)^{2,5} + 2,5(t_2 - t_1)^{-1,5} \left(\int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right)^{1,5} \frac{\partial}{\partial t_2} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt. \quad 3.4$$

В выражения 3.3 и 3.4 вводятся производные от интеграла по переменному верхнему/нижнему пределу. Согласно теореме Ньютона — Лейбница, соответствующее значение производной равно значению подынтегральной функции на этом пределе. Отсюда имеем:

$$\frac{\partial}{\partial t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt = - \frac{\partial}{\partial t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt = -a(t_1). \quad 3.5$$

$$\frac{\partial}{\partial t_2} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt = a(t_2). \quad 3.6$$

Упрощая выражения 3.3 и 3.4 и приравнявая их нулю, получим

$$1,5 \int_{t_1}^{\bar{t}_2} a(t) dt - 2,5(\bar{t}_2 - \bar{t}_1) a(\bar{t}_1) = 0. \quad 3.7$$

$$1,5 \int_{t_1}^{\bar{t}_2} a(t) dt - 2,5(\bar{t}_2 - \bar{t}_1) a(\bar{t}_2) = 0. \quad 3.8$$

Система уравнений 3.7, 3.8 с двумя неизвестными t_1 и t_2 теоретически может быть решена, если известно аналитическое выражение подынтегральной функции $a(t)$, и ее первообразная функция позволит разрешить уравнения относительно неизвестных t_1 и t_2 , не прибегая к численным методам.

Даже не имея конечного решения, из уравнений 3.7, 3.8 могут быть получены полезные результаты. Так, вычитая 3.7 из 3.8, имеем в критической точке (t_1, t_2) :

$$2,5(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)(a(\bar{t}_2) - a(\bar{t}_1)) = 0 \quad 3.9$$

Для нетривиального решения $t_2 \neq t_1$ в критической точке выполняется условие:

$$a(\bar{t}_1) = a(\bar{t}_2) \quad 3.10$$

Равенство 3.10 показывает, что временной интервал, внутри которого критерий *НІС* достигает экстремального значения, располагается в окрестности вершины, границы этого интервала лежат на восходящей и нисходящей ветвях кривой замедления $a(t)$, причем замедления на концах интервала равны. Уравнения 3.7 и 3.8 можно представить в виде:

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{\bar{t}_2} a(t) dt = \frac{5}{3} a(\bar{t}_1). \quad 3.11$$

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{\bar{t}_2} a(t) dt = \frac{5}{3} a(\bar{t}_2). \quad 3.12$$

В данном случае t_1 и t_2 являются найденными пределами интегрирования. Второй важный практический результат, который может быть получен — среднее значение ускорения в пределах интегрирования $t_1 < t < t_2$ равно значению ускорения в точке t_1 (или t_2), умноженному на $5/3$.

Методика определения критерия травмирования шейного отдела позвоночника манекена, грудного отдела, бедра описаны в главе 1 и определяются по формулам 1.6 и 1.7.

Критерий травмирования грудного отдела модели манекена определяется как максимальная деформация груди модели манекена.

По полученным данным математического моделирования опрокидывания вагона по разработанным сценариям проведен расчет значений критериев травмирования, для рассматриваемых положений модели манекена. Полученные значения рассчитанных критериев травмирования для положений модели манекена сведены в таблицы 3.1 и 3.2.

Анализируя результаты, можно сделать вывод, что полученные критерии травмирования для сценариев опрокидывания пассажирского вагона на плоскую поверхность и наклонную поверхность имеют максимальное расхождение значений на 46 %, которое наблюдается для критерия травмирования шейного отдела позвоночника.

Таблица 3.1 – Значения универсальных критериев травмирования для модели манекена при опрокидывании вагона на сторону 1

Положение манекена в купе	Расчетное значение критериев травмирования							
	Одиночный вагон при скорости движения вагона 0 км/ч							
	Опрокидывание на плоскую поверхность				Опрокидывание на наклонную поверхность			
	<i>HIC</i>	<i>Nij</i>	<i>CTI</i> , мм	<i>FFC</i> , кН	<i>HIC</i>	<i>Nij</i>	<i>CTI(d)</i> , мм	<i>FFC</i> , кН
1	365	0,11	14	2,13	428	0,16	17	2,55
2	367	0,13	13	2,14	421	0,19	16	2,57
3	613	0,77	59	5,68	692	1,01	67	7,02
4	617	0,78	63	5,75	695	1,03	68	7,11
5	402	1,02	86	8,92	441	1,18	89	9,05
6	399	1,08	84	8,65	435	1,21	87	8,97
7	410	1,05	36	7,54	446	1,11	43	8,85
8	412	1,1	34	7,48	450	1,19	42	8,81
9	674	0,64	80	8,10	695	0,95	83	8,82
10	681	0,65	85	8,13	701	0,92	82	8,90
11	510	1,04	42	6,95	519	1,06	45	7,46
12	526	1,04	40	6,94	530	1,06	43	7,42
	Одиночный вагон при скорости движения вагона 60 км/ч							
1	407	0,23	66	2,54	439	0,27	65	2,94
2	422	0,25	18	2,18	474	0,35	19	2,78
3	689	0,95	72	7,48	711	1,13	73	7,59
4	731	0,81	60	5,81	785	1,03	65	7,15
5	448	1,18	89	9,03	526	1,28	90	9,01
6	384	1,12	92	9,1	499	1,26	92	9,2
7	426	1,09	41	7,62	485	1,18	44	8,98
8	437	1,15	39	7,54	488	1,21	43	8,12
9	710	0,82	85	8,72	722	0,88	89	8,76
10	715	0,84	89	8,75	724	0,90	91	8,71
11	586	1,12	45	7,24	590	1,11	71	7,69
12	591	1,13	54	7,07	584	1,12	49	7,71
	Опрокидывание сцепы из трех вагонов при скорости движения 60 км/ч							
1	435	0,25	71	2,72	470	0,29	70	3,15
2	452	0,27	19	2,33	507	0,37	20	2,97
3	737	1,02	77	8,00	761	1,21	78	8,12
4	782	0,87	64	6,22	840	1,10	70	7,65
5	479	1,26	95	9,66	563	1,37	96	9,64
6	411	1,20	98	9,74	534	1,35	98	9,84
7	456	1,17	44	8,15	519	1,26	47	9,61
8	468	1,23	42	8,07	522	1,29	46	8,69
9	726	0,89	88	8,89	742	0,91	90	8,95
10	721	0,90	92	8,81	745	0,93	93	8,92
11	590	1,07	77	7,02	600	1,07	79	7,21
12	586	1,07	57	6,95	586	1,08	50	7,27
Допускаемое значение	1000	1,4	102	10	1000	1,4	102	10

Таблица 3.2 – Значения универсальных критериев травмирования для модели манекена при опрокидывании вагона на сторону 2

Положение манекена в купе	Расчетное значение критериев травмирования							
	Одиночный вагон при скорости движения вагона 0 км/ч							
	Опрокидывание на плоскую поверхность				Опрокидывание на наклонную поверхность			
	<i>HIC</i>	<i>Nij</i>	<i>STI</i> , мм	<i>FFC</i> , кН	<i>HIC</i>	<i>Nij</i>	<i>STI(d)</i> , мм	<i>FFC</i> , кН
1	623	0,74	66	5,82	699	0,98	69	7,01
2	638	0,78	64	5,69	695	0,96	68	7,05
3	381	0,12	15	2,8	440	0,14	17	2,79
4	382	0,13	14	2,79	442	0,17	19	2,81
5	485	1,06	66	5,72	489	1,11	54	5,35
6	480	1,08	66	5,75	490	1,12	52	5,38
7	496	1,08	41	7,18	501	1,10	49	6,88
8	494	1,09	42	7,20	499	1,08	50	6,87
9	448	0,96	62	5,89	476	0,95	68	5,91
10	453	0,98	64	5,84	471	0,99	66	5,93
11	412	1,04	38	7,68	440	1,09	45	8,68
12	414	1,05	39	7,72	445	1,08	43	8,74
	Одиночный вагон при скорости движения вагона 60 км/ч							
1	687	0,98	78	7,56	709	1,07	74	7,51
2	738	0,85	61	5,77	742	1,03	67	7,20
3	401	0,25	22	2,61	440	0,36	34	2,91
4	419	0,25	20	2,22	469	0,34	19	2,86
5	552	1,06	50	7,06	575	1,08	52	6,98
6	559	1,07	52	7,09	568	1,07	49	7,02
7	598	1,09	41	7,15	584	1,18	44	7,28
8	589	1,15	39	7,19	590	1,21	43	7,32
9	485	1,07	44	7,32	477	0,99	46	7,34
10	480	1,05	48	7,38	479	1,02	51	7,41
11	485	1,09	42	7,56	486	1,11	44	8,21
12	465	1,09	40	7,50	473	1,15	43	8,19
	Опрокидывание сцепы из трех вагонов при скорости движения 60 км/ч							
1	737	1,02	77	8	761	1,21	78	8,12
2	782	0,87	64	6,22	840	1,1	70	7,65
3	435	0,25	22	2,72	470	0,29	22	3,15
4	452	0,27	19	2,33	507	0,37	20	2,97
5	565	1,03	59	7,10	592	1,07	62	7,15
6	561	1,06	58	7,15	585	1,05	60	7,13
7	596	1,09	50	7,19	602	1,12	52	7,22
8	601	1,11	49	7,25	608	1,15	50	7,25
9	499	1,07	51	7,84	507	1,09	51	7,96
10	465	1,04	49	7,91	510	1,08	51	7,93
11	456	1,17	44	8,15	519	1,26	47	9,61
12	468	1,23	42	8,07	522	1,29	46	8,69
Допускаемое значение	1000	1,4	102	10	1000	1,4	102	10

Сравнение результатов моделирования опрокидывания вагона с учетом скорости движения состава и моделирования опрокидывания с малыми скоростями движения показывает различие значений критериев травмирования не более 30 %.

При достижении критерия травмирования головы в 1000 единиц вероятность переломов костей черепа составляет 48-50 %. При значении критерия травмирования шейного отдела позвоночника 1,4 единицы вероятность травм с летальным исходом составляет 22 %. Значения деформации грудного отдела в 102 мм может свидетельствовать о переломах ребер и тяжелых травмах внутренних органов пассажиров с вероятностью в 91 %. При значении критерия травмирования бедренных элементов манекена близкого к 10 кН вероятность получения тяжелых травм бедер пассажиров составляет 35 %.

Анализ численных значений критериев травмирования показывает, что в реальных условиях опрокидывания вагона пассажиры могут получать травмы тяжелой и средней степени тяжести.

3.3 Разработка технических решений, направленных на повышение безопасности вагонов при опрокидывании

Для повышения безопасности вагонов и снижения уровня травмирования пассажиров железнодорожного транспорта при аварийных ситуациях, связанных со сходом подвижного состава с рельс и опрокидыванием вагонов на насыпь железнодорожного полотна, в работе предлагается разработка технических решений и конструктивных мер для купе вагона.

Путем проведения ряда экспериментов с моделированием опрокидывания пассажирского вагона с моделями манекена выявлено несколько травмоопасных зон для пассажиров. В условиях опрокидывания вагона наиболее частый контакт манекена с элементами интерьера купе наблюдается с боковыми стенами купе и со столом купе вагона. Анализируя таблицы 3.1 и 3.2 определено, что указанные зоны

являются наиболее опасными для пассажиров в условиях опрокидывания вагона. При проведении моделирования опрокидывания модель манекена взаимодействует головой с боковой стеной купе для всех рассматриваемых положений манекена. При этом шея манекена испытывает высокие значения изгибающих моментов и сил, что отражается в полученных высоких значениях критерия травмирования шейного отдела. При положениях модели манекена 1 и 3 в условиях опрокидывания вагона с учетом скорости движения вагона возникают контактные взаимодействия между столом купе и элементами модели манекена, такими как грудь, брюшной отдел и бедра.

В качестве технических решений повышения безопасности пассажирского купе предлагается оснастить травмоопасные зоны конструктивными элементами, имеющими меньшую жесткость, чем элементы интерьера салона в указанных зонах. В качестве материала с меньшей жесткостью предлагается использование того же материала, из которого изготавливаются полки купе и подголовники кресел. Использование конструктивных элементов с подобным материалом исключает необходимость для вагоностроительных предприятий разрабатывать и тестировать нововведенный материал для салона купе вагона.

При проведении моделирования опрокидывания вагона выявлены возможные травмы, которые пассажиры могут получить в связи с падением на них ручной клади с багажных полок. Такие травмы могут варьироваться от легких ушибов частей тела человека до переломов костей в зависимости от веса ручной клади, расположенной на багажных полках, положения пассажира в вагоне и других факторов. Также ручная кладь при опрокидывании вагона может существенно влиять на доступ экстренных служб к травмированным пассажирам и скорость эвакуации пассажиров из вагона после аварии.

Для исключения травмирования пассажиров от падающей ручной клади с багажных полок предлагается применение в купе вагона механической системы для удерживания ручной клади. А именно, размещения в купе вагона механизма

запираания для отделения ручной клади, который позволит багажу оставаться на штатных местах его размещения при опрокидывании вагона.

3.4 Выводы по разделу 3

1 Для разработанных моделей опрокидывания вагона проведено компьютерное моделирование в соответствии с разработанными сценариями. Моделирование опрокидывания вагона проводилось на обе боковые стороны пассажирского вагона. Общее количество проведенных экспериментов – 144.

2 Получены графики зависимостей ускорений головы модели манекена, моментов и сил, действующих на шею манекена, сил, действующих на бедренные части модели манекена и деформация грудного отдела от времени моделирования опрокидывания вагона.

3 По полученным зависимостям, для каждого разработанного сценария опрокидывания вагона, рассчитаны универсальные критерии травмирования: головы модели манекена HIC , шейного отдела позвоночника модели манекена Nij , грудного отдела CTI , бедренных частей манекена FFC .

Различие значений Nij для сценариев опрокидывания на плоскую и наклонную поверхности с малыми скоростями различаются на 46 %. Различие значений HIC – не более 17 %. Для значений критериев CTI и FFC наблюдается разница сопоставляемых сценариев на 23%. Для опрокидывания одиночного вагона на средней скорости движения на плоскую и наклонную поверхности показало различие значений критериев: для HIC – 29 %, для Nij – 27 %, для CTI – 10 %, для FFC – 27 %. Различие значений критериев травмирования для опрокидывания сцепа вагонов составило: для HIC – 30%, для Nij – 40 %, для CTI – 10 %, для FFC – 27 %. Значения критериев травмирования для сценариев опрокидывания одиночного вагона с малыми скоростями и средними скоростями движения различаются: для HIC – на 19 %, для Nij – в 2 раза, для CTI – в 4,5 раза, для FFC – на 32 %.

4 Сформулированы выводы о необходимости разработки технических решений, направленных на повышение безопасности вагона и снижение степени травмирования пассажиров при опрокидывании вагона. В качестве технических решений предложены элементы с пониженной жесткостью, располагаемые в наиболее травмоопасных зонах купе вагона: боковые стены и кромка стола купе. Также в качестве технического решения для снижения степени травмирования пассажиров предложено использование механической системы, которая ограничит перемещение ручной клади при опрокидывании вагона.

4 РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ ПРИ ОПРОКИДЫВАНИИ И ОЦЕНКА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

4.1 Применение технических решений повышения безопасности пассажирских вагонов при опрокидывании

Оценка эффективности предложенных технических решений, направленных на повышение безопасности отечественных пассажирских вагонов, проводится на основе анализа возможного травмирования пассажиров в аварийных ситуациях, связанных со сходом с рельс и последующим опрокидыванием вагонов на боковую стену.

Существующая статистика телесных повреждений, полученных пассажирами при аварийных ситуациях на железнодорожном транспорте, свидетельствует о том, что чаще всего повреждения у пассажиров и обслуживающего персонала возникают при контактировании с поверхностями элементов купе, падением с верхних полок, а также получают повреждения в результате падения на них ручной клади с багажных полок. Однако большая часть телесных повреждений различной степени тяжести связана с вторичными столкновениями пассажиров с элементами внутреннего оборудования, в том числе элементов сорванного с креплений и багажа.

Степень тяжести травм, получаемых при опрокидывании подвижного состава, зависит от совокупности факторов: скорости в момент схода с рельс подвижного состава или части вагонов, скорости в момент наклона и опрокидывания вагонов, конструкции подвижного состава и конфигурации салона пассажирского вагона.

Факторами, связанными со скоростью движения поезда и скоростью опрокидывания вагонов на боковую стену варьировать достаточно сложно, однако, можно оперировать факторами, влияющими на безопасность пассажиров,

находящихся в салоне вагона, которые предоставляется возможность изменять и совершенствовать с целью снижения степени травмирования пассажиров подвижного состава.

Отделение для ручной клади, расположенное в верхней части купе вагона, позволяет сэкономить полезное пространство купе, так как размещается в части купе, находящейся над основным проходом по салону пассажирского вагона. Поэтому изменение положения багажных полок для ручной клади не целесообразно. Таким образом, необходимость применения механической системы, ограничивающей перемещение ручной клади при опрокидывании вагона, является актуальной мерой повышения безопасности пассажирского вагона.

Исходя из вышеизложенного, внедрение технических решений, направленных на снижение уровня травмирования пассажиров и повышения безопасности пассажиров при опрокидывании вагона, является целесообразным.

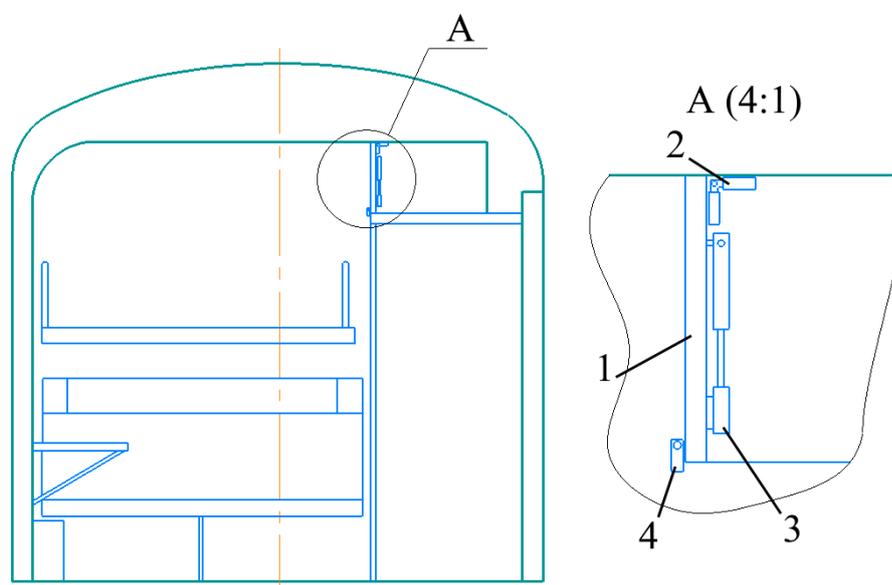
4.2 Выбор параметров технических решений повышения безопасности пассажиров

Для повышения безопасности и снижения травмирования пассажиров в работе предложены механическая система для ограничения перемещения ручной клади, располагающаяся на багажной полке в купе вагона, и дополнительные элементы, с пониженной жесткостью, устанавливаемые в травмоопасные зоны купе вагона.

Система для ограничения перемещения ручной клади (рисунок 4.1) включает в себя подвесной механизм и запирающее устройство, а также поворотную дверцу, которая может находиться, как в закрытом, так и в открытом фиксированных положениях. Фиксированное положение в открытом состоянии дверцы достигается за счет подъемного устройства. Закрытое положение механизма обеспечивается запирающим устройством. На поворотной дверце закрепляется ручка для удобства эксплуатации отделения для ручной клади.

Механизм открывания дверцы включает рычажный механизм, который шарнирно закреплен одним концом на боковой поверхности отделения для ручной клади и связан другим концом с дверцей через подъемное устройство прямого действия, обеспечивающее плавность открывания багажной полки. Поскольку поворотная дверца открывается по направлению вверх и может загораживать осветительные приборы, расположенные на потолке купе вагона, в предлагаемую конструкцию механизма целесообразно включить дополнительный источник освещения пространства багажной полки, который требуется разместить на задней поверхности дверцы и который будет автоматически срабатывать при открывании отделения ручной клади.

Таким образом, отделение для ручной клади имеет конфигурацию изолированного отделения. Разработанное техническое решение обеспечит неподвижное положение ручной клади, которая не повлияет на травмирование пассажиров при опрокидывании вагона.

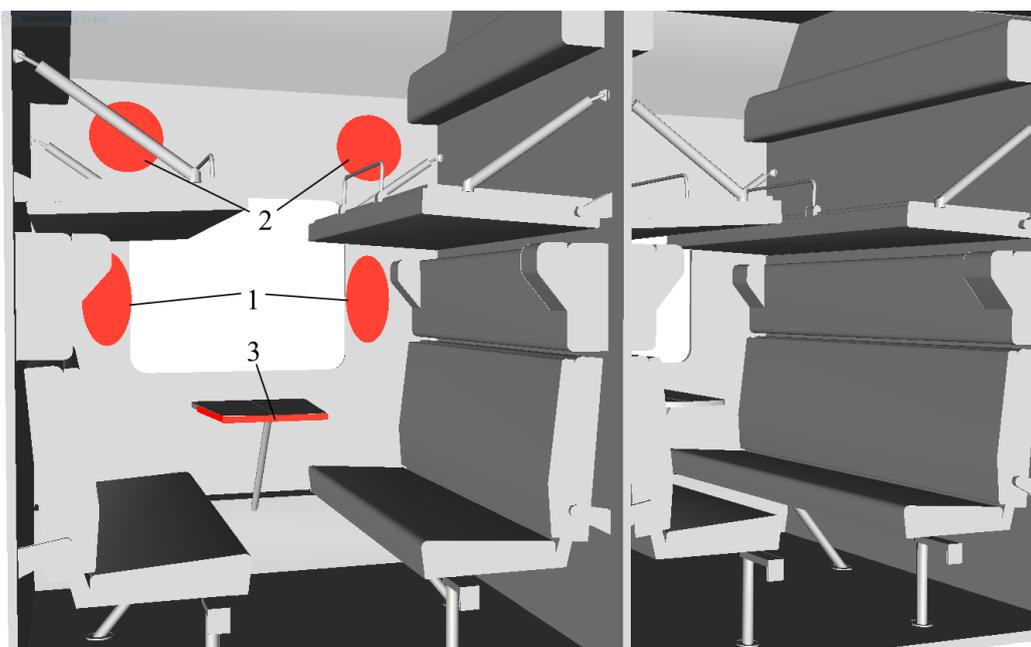


*1 – поворотная дверца, 2 – механизм крепления поворотной дверцы,
3 – подъемное устройство, 4 – ручка*

Рисунок 4.1 – Система для ограничения перемещения ручной клади при опрокидывании вагона

Вторым техническим решением для снижения травмирования пассажиров в купе при опрокидывании вагона в работе предлагается применение дополнительных элементов интерьера салона купе в зонах, которые определены как наиболее травмоопасные при аварии с опрокидыванием. Дополнительными элементами предлагается использовать элементы с меньшей жесткостью по сравнению с жесткостью элементов интерьера салона, путем применения в них соответствующих материалов. В качестве материала для дополнительных элементов, располагаемых в травмоопасных зонах, целесообразно использовать материал, из которого изготавливают мягкие элементы полок и подголовников купе.

Необходимость применения дополнительных элементов, которые позволят смягчить удары пассажиров об элементы салона купе, вызвана высокими значениями расчетных критериев травмирования при моделировании опрокидывания вагона. Зоны, для которых существует необходимость дополнения конструктивными элементами с пониженной жесткостью с целью уменьшения травмирования пассажиров при опрокидывании, указаны на рисунке 4.2. Всего выявлено 3 травмоопасные зоны.



1, 2 – зоны на боковых стенах купе, 3 – зона кромки стола
Рисунок 4.2 – Травмоопасные зоны для пассажиров в купе при опрокидывании вагона

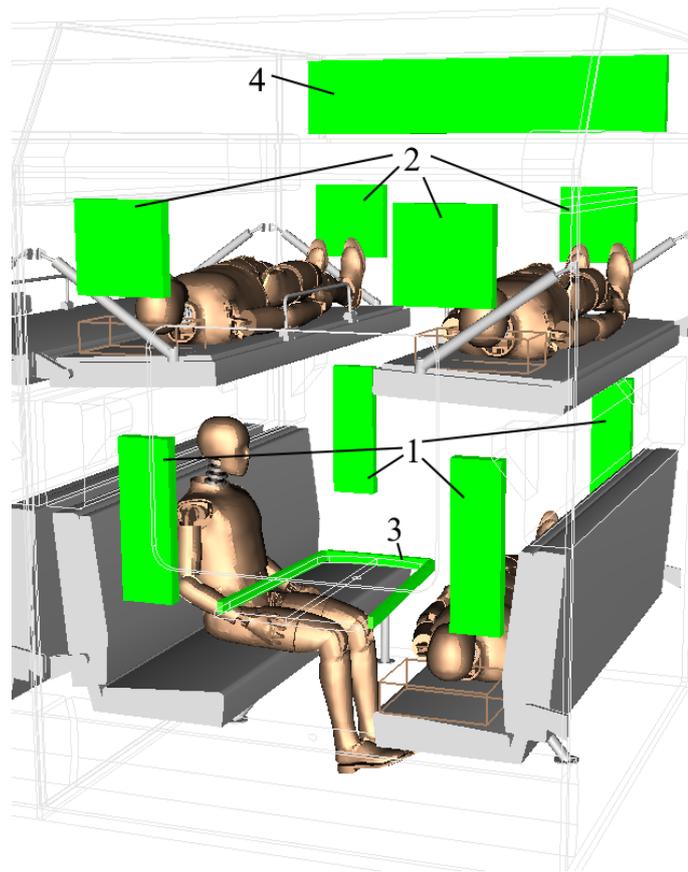
Размеры для дополнительных элементов с пониженной жесткостью определены экспериментальным путем с помощью моделирования опрокидывания вагона с моделью манекена. Выявлен набор точек на поверхностях элементов интерьера купе, в которых происходит контакт элементов манекена и интерьера купе. Таким образом, дополнительные элементы имеют следующие размеры:

- зона 1 – 550x180x50 мм;
- зона 2 – 300x300x50 мм;
- зона 3 – 40x25 мм по кромке стола купе.

Установка элементов с пониженной жесткостью на боковой стене купе (в зоне 1 и 2) осуществляется парно, на каждую боковую стену купе. Таким образом, усовершенствованное купе пассажирского вагона имеет 9 дополнительных элементов с пониженной жесткостью для уменьшения степени травмирования пассажиров при опрокидывании вагона: четыре элемента для пассажиров, находящихся на нижней полке, четыре элемента для пассажиров, находящихся на верхних полках и один элемент на кромке стола купе. Усовершенствованная модель купе пассажирского вагона представлена на рисунке 4.3.

Выполнен анализ влияния предлагаемых технических решений на массу пассажирского вагона. Система, ограничивающая перемещение ручной клади, имеет массу до 4 кг. Элементы с пониженной жесткостью на боковой стене и кромке стола приблизительно будут иметь массу 6÷7 кг. Таким образом, дополнительная масса на вагон от предлагаемых технических решений составит не более 99 кг для одного вагона.

Нормативные документы, направленные на организацию пассажирских перевозок железнодорожным транспортом [164-165], не препятствуют использованию предлагаемых в работе технических решений, поскольку последние не вносят значительных эргономических изменений в пассажирское купе вагона, а также не влияют на технические характеристики кузова вагона.



1, 2 – элементы на боковой стене купе; 3 – элемент на кромке стола; 4 – система, ограничивающая перемещение ручной клади

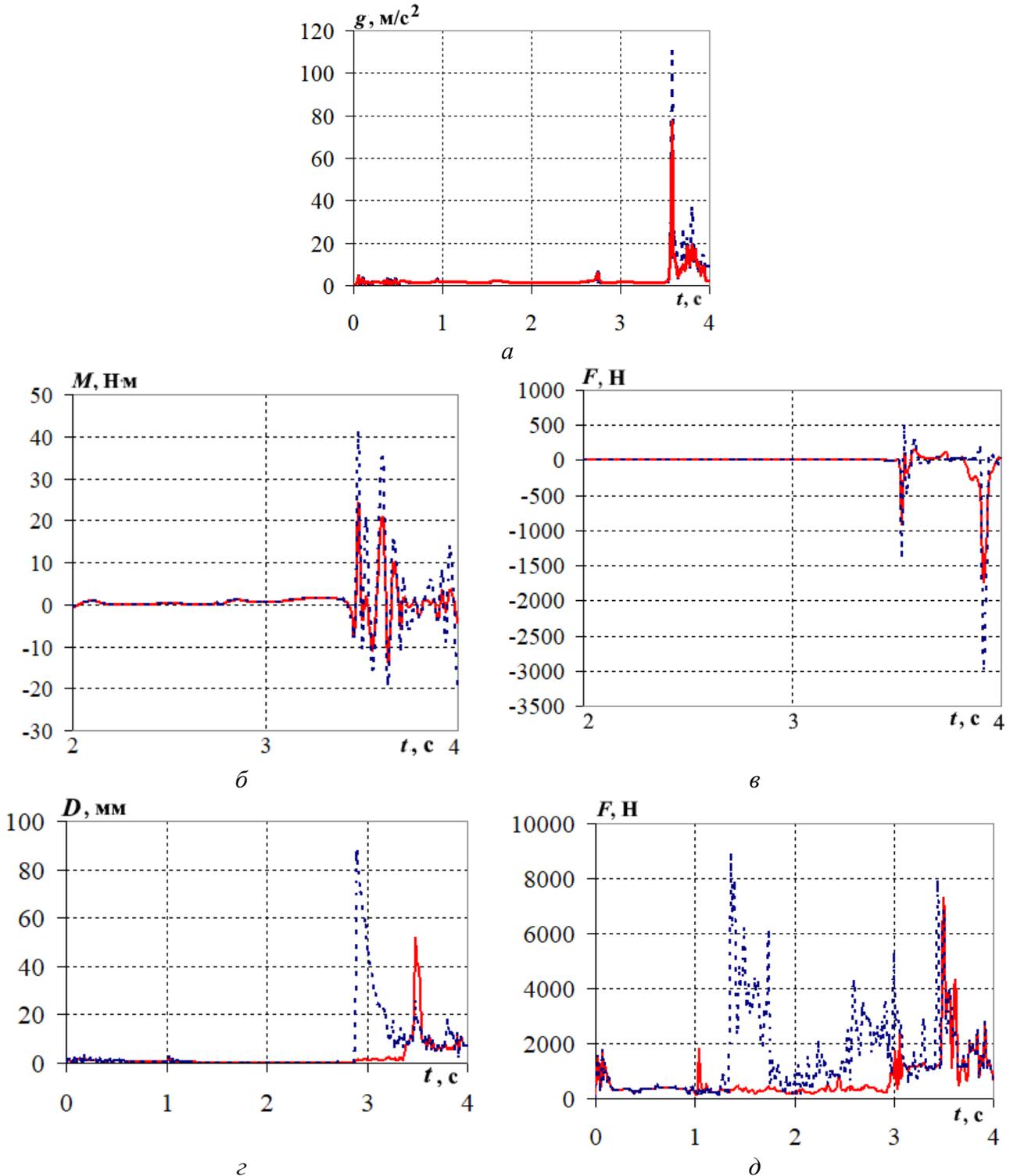
Рисунок 4.3 – Модель купе вагона с техническими решениями

4.3 Оценка безопасности пассажирского вагона при опрокидывании с учетом технических решений

Для проверки эффективности разработанных технических решений, направленных на повышение безопасности вагонов при опрокидывании, усовершенствованная модель пассажирского вагона подверглась ряду виртуальных испытаний. Для этого в модель купе помещается разработанная модель антропометрического манекена. Положения манекена в купе вагона задаются в соответствии с положениями, рассматриваемыми ранее. Моделирование аварийной ситуации проводится в соответствии с разработанными сценариями опрокидывания указанными в главе 2.

По результатам моделирования получены значения динамических воздействий на элементы манекена (рисунок 4.4): ускорения головы манекена,

силы и моменты, действующие на шейный отдел модели манекена, силы, действующие на бедренные отделы манекена и деформации грудного отдела.



.....
без применения технических решений

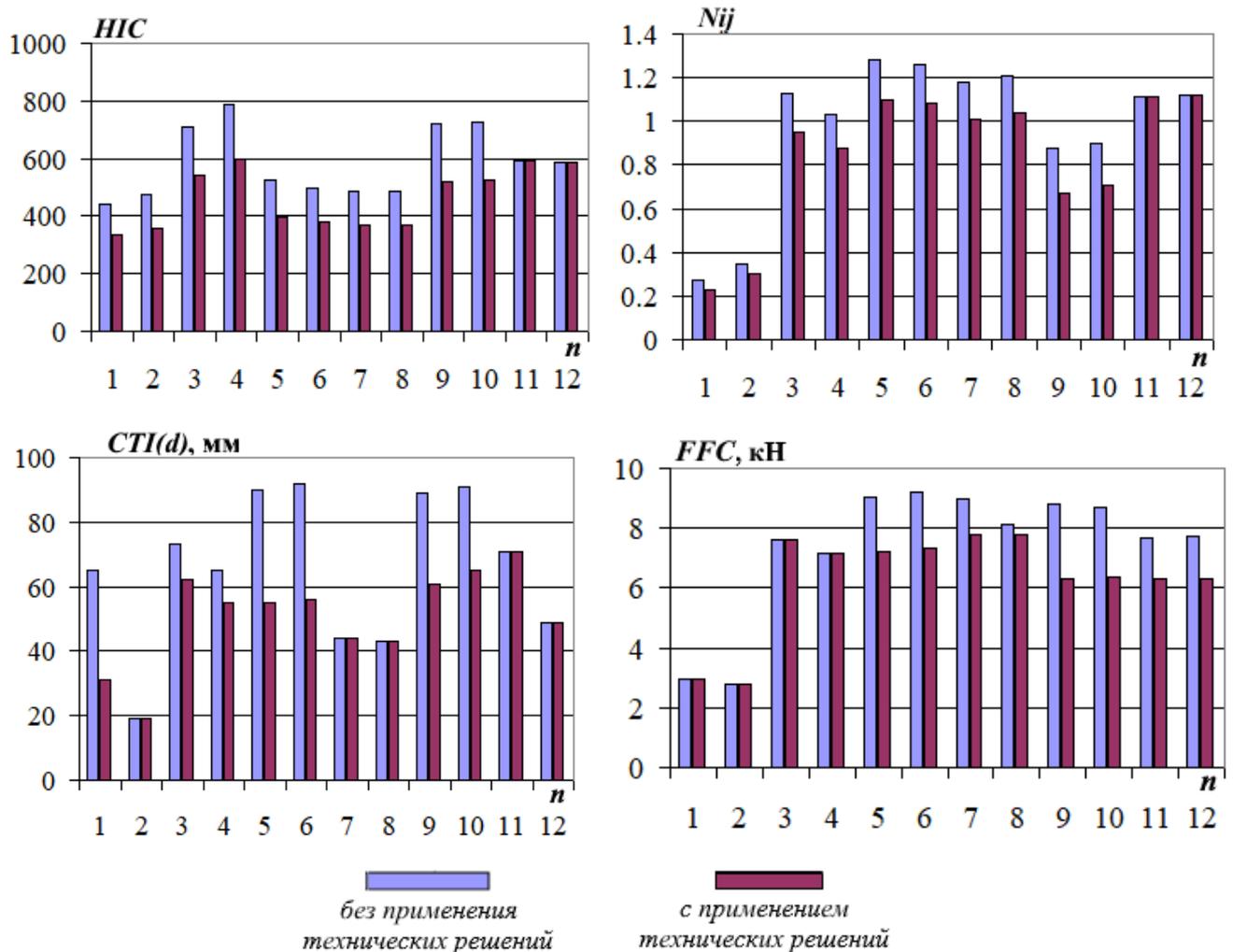
—————
с применением технических решений

а – ускорение головы, б – момент действующий на шею манекена,

в – сила, действующая на шею манекена, г – деформация грудного отдела, д – сила, действующая на бедро

Рисунок 4.4 – Динамические воздействия на модель манекена при опрокидывании вагона на боковую стену 1

По полученным динамическим воздействиям рассчитаны универсальные критерии травмирования для рассматриваемых положений модели манекена в купе вагона при опрокидывании по расчетным сценариям. Полученные значения критериев травмирования для рассматриваемых сценариев опрокидывания вагона сопоставлены с полученными значениями критериев при моделировании опрокидывания без учета технических решений. Сравнительные гистограммы величин критериев травмирования для опрокидывания по сценарию 4 на боковую сторону вагона 1 представлены на рисунке 4.5. В приложении К приведены сравнительные гистограммы для моделирования по сценариям 1, 2 и 3 при опрокидывании вагона на боковую стену 1.



n – положение манекена

Рисунок 4.5 – Величины критериев травмирования модели манекена при опрокидывании вагона по сценарию 4 на боковую стену 1

Полученные значения критериев травмирования для модели манекена при опрокидывании вагона на обе стороны сведены в таблицах 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1 – Значения критериев травмирования манекена при опрокидывании вагона на боковую сторону 1 с учетом технических решений

Положение манекена в купе	Опрокидывание на плоскую поверхность				Опрокидывание на наклонную поверхность			
	<i>HIC</i>	<i>N_{ij}</i>	<i>CTI(d)</i> , мм	<i>FFC</i> , кН	<i>HIC</i>	<i>N_{ij}</i>	<i>CTI(d)</i> , мм	<i>FFC</i> , кН
	Одиночный вагон при скорости движения вагона 0 км/ч							
1	246	0.09	14	2.13	330	0.15	17	2.55
2	245	0.1	13	2.14	325	0.16	16	2.57
3	435	0.64	50	5.68	533	0.85	56	7.02
4	432	0.64	52	5.75	535	0.87	57	7.11
5	284	0.85	48	6.96	340	1.01	50	7.1
6	280	0.86	50	6.95	336	1.02	51	7.02
7	288	0.86	36	6.55	342	0.93	43	7.81
8	293	0.92	34	6.53	344	1.01	42	7.8
9	427	0.51	56	6.04	446	0.79	58	6.11
10	432	0.52	57	6.09	443	0.78	57	6.13
11	510	1.04	42	5.75	519	1.06	45	6.26
12	526	1.04	40	5.66	530	1.06	43	6.28
	Одиночный вагон при скорости движения вагона 60 км/ч							
1	302	0.19	31	2.54	333	0.23	31	2.94
2	310	0.21	18	2.18	360	0.3	19	2.78
3	509	0.79	61	7.48	540	0.95	62	7.59
4	540	0.68	51	5.81	595	0.88	55	7.15
5	331	1	54	7.22	399	1.1	55	7.2
6	285	0.96	55	7.28	379	1.08	56	7.35
7	316	0.92	41	6.62	368	1.01	44	7.69
8	323	0.96	39	6.62	370	1.04	43	7.68
9	502	0.63	59	6.24	518	0.67	61	6.29
10	512	0.63	62	6.32	524	0.71	65	6.38
11	586	1.12	45	6.03	590	1.11	71	6.31
12	591	1.13	54	6.06	584	1.12	49	6.33
	Сцепы из трех вагонов при скорости движения 60 км/ч							
1	323	0.2	31	2,72	356	0.25	31	3.15
2	332	0.22	19	2,33	385	0.32	20	2.97
3	545	0.85	65	8,00	578	1.02	66	8.12
4	578	0.73	55	6,22	637	0.94	59	7.65
5	354	1.07	58	7,83	427	1.18	59	7.7
6	305	1.03	59	7,73	406	1.16	60	7.86
7	338	0.98	44	7.65	394	1.08	47	7,7
8	346	1.03	42	7.64	396	1.11	46	7,7
9	595	0.71	66	6.52	624	0.81	70	6.65
10	598	0.72	64	6.83	629	0.84	68	6.7
11	590	1.07	77	6.26	600	1.07	79	6.48
12	586	1.07	57	6.21	586	1.08	50	6.36

Таблица 4.2 – Значения критериев травмирования манекена при опрокидывании вагона на боковую сторону 2 с учетом технических решений

Положение манекена в купе	Опрокидывание на плоскую поверхность				Опрокидывание на наклонную поверхность			
	<i>HIC</i>	N_{ij}	<i>CTI(d)</i> , мм	<i>FFC</i> , кН	<i>HIC</i>	N_{ij}	<i>CTI(d)</i> , мм	<i>FFC</i> , кН
	Одиночный вагон при скорости движения вагона 0 км/ч							
1	435	0.64	50	5.8	533	0.85	56	6.98
2	432	0.64	52	5.69	535	0.87	57	7.04
3	246	0.09	14	2.79	330	0.14	17	2.76
4	245	0.1	13	2.78	325	0.16	16	2.78
5	485	1.06	66	5.72	489	1.11	54	5.35
6	480	1.08	66	5.75	490	1.12	52	5.32
7	496	1.08	41	7.18	501	1.1	49	6.88
8	494	1.09	42	7.2	499	1.08	50	6.87
9	322	0.88	62	5.89	340	0.91	68	5.91
10	324	0.91	64	5.84	336	0.93	66	5.93
11	295	0.86	36	6.55	342	0.93	43	7.81
12	293	0.92	34	6.53	344	1.01	42	7.8
	Одиночный вагон при скорости движения вагона 60 км/ч							
1	509	0.79	61	7.48	540	0.95	62	7.51
2	540	0.68	51	5.77	595	0.88	55	7.15
3	302	0.19	22	2.54	333	0.23	31	2.9
4	310	0.21	20	2.18	360	0.3	19	2.78
5	552	1.06	50	7.06	575	1.08	52	6.98
6	559	1.07	52	7.09	568	1.07	49	7.02
7	598	1.09	41	7.15	584	1.18	44	7.28
8	589	1.15	39	7.19	590	1.21	43	7.32
9	331	1	44	7.22	399	0.99	46	7.2
10	285	0.96	48	7.28	379	1.02	51	7.35
11	316	0.92	41	6.62	368	1.01	44	7.69
12	323	0.96	39	6.62	370	1.04	43	7.68
	Спепа из трех вагонов при скорости движения 60 км/ч							
1	550	0.84	65	8	578	1.02	66	8.12
2	591	0.71	55	6.22	637	0.94	59	7.65
3	332	0.21	22	2.72	348	0.25	22	3.15
4	332	0.22	19	2.33	380	0.32	20	2.97
5	565	1.03	59	7.1	592	1.07	62	7.15
6	561	1.06	58	7.15	585	1.05	60	7.13
7	596	1.09	50	7.19	602	1.12	52	7.22
8	601	1.11	49	7.25	608	1.15	50	7.25
9	354	1	51	7.83	427	1.02	51	7.7
10	305	0.99	48	7.73	406	1.01	51	7.86
11	338	0.98	44	7.65	394	1.08	47	8.85
12	346	1.03	42	7.64	396	1.11	46	8.31

В результате сопоставления полученных значений критериев травмирования при моделировании опрокидывания вагона без технических решений и с включенными в купе техническими решениями, направленными на повышение безопасности вагона, наблюдается снижение уровня травмирования манекена. По расчетным значениям определено процентное отношение по каждому критерию травмирования для рассматриваемых положений модели манекена. Максимальное снижение критерия травмирования головы наблюдается для положения 10 при моделировании опрокидывания по сценарию 2 – 40,6 %. При этом, в среднем, уменьшение значения критерия *HIC* составляет 36 %, что достигается за счет включения в модель вагона элементов с пониженной жесткостью на боковые стены купе.

Критерий травмирования шейного отдела позвоночника *Nij*, при опрокидывании вагона с включенными в интерьер купе техническими решениями повышения безопасности, максимально уменьшился для аварийного сценария 4, положение манекена 3. При этом значение критерия *Nij* снизилось на 36,1 %.

Анализируя полученные значения критерия травмирования грудного отдела, выявлено значительное снижение значения *CTI(d)* – на 56,3 % для сценария с опрокидывание сцепы из трех вагонов, для положения манекена 1. Такое снижение достигнуто за счет элементов с пониженной жесткостью на кромке стола купе. Для положений манекена на верхних полках купе наблюдается уменьшение критерия травмирования груди на 38 – 39 %, что достигается путем введения в интерьер купе механической системы для ограничения перемещения ручной кладки.

Для критерия травмирования бедра манекена наблюдается максимальное уменьшение значение для положения манекена 10, при моделировании по сценарию 1 – на 31,1 %. В целом отмечено значительное снижение значения критерия *FFC* для положений манекена на верхних полках купе.

Анализируя полученные данные определено, что наибольшее снижение значений критериев травмирования наблюдается за счет введения механической

системы для ограничения перемещения ручной клади. При этом процентное снижение значений критериев травмирования составляет для HIC – 40,6 %, для Nij – 25 %, для CTI – 43,8 %, для FFC – 31,1 %.

Снижение значений критериев травмирования за счет введения элементов с пониженной жесткостью на боковых стенах купе наблюдается для HIC на 35,9 %, для Nij – 36,1 %, для CTI – 24,2 %. Для критерия FFC снижение значений, с учетом элементов с пониженной жесткостью на боковых стенах незначительно.

При включении элементов с пониженной жесткостью на кромке стола купе наблюдается снижение значения критерия травмирования грудной клетки $CTI(d)$ на 21,8 %.

Анализируя процентное соотношение значений критериев травмирования для моделирования опрокидывания вагона с учетом разработанных технических решений и без включения их в купе вагона, можно сделать вывод об уменьшении степени травмирования в 1,5–2 раза. Таким образом, возможную степень травмирования, получаемую пассажирами при опрокидывании вагона, можно описать как легкую и среднюю. При такой степени травмирования возможны травмы связанные с легкими ушибами головы, грудной клетки, а также незначительными травмами шеи. Вероятность получения травм тяжелой степени тяжести и летальных исходов значительно снижается.

По результатам, полученным при моделировании аварийного опрокидывания пассажирского вагона, можно сделать вывод об эффективности применения разработанных технических решений.

4.4 Выводы по разделу 4

1 Разработаны технические решения повышения безопасности пассажирских вагонов. Выбраны оптимальные параметры разработанных технических решений. Выявлено, что применение разработанных решений не влияет на эргономические параметры купе, весовые характеристики вагона и не противоречит правилам перевозки пассажиров.

2 Проведено моделирование опрокидывания пассажирского вагона с моделью купе, дополненной разработанными техническими решениями в соответствии со сценариями опрокидывания на обе боковые стороны вагона. По результатам моделирования получены значения критериев травмирования головы HIC , шейного отдела позвоночника Nij , грудного отдела CTI и бедра FFC .

3 Проведено сравнение полученных значений критериев травмирования манекена для моделирования опрокидывания пассажирского вагона с моделью купе, с включенными в него разработанными техническими решениями и без их включения. Выявлено, что при моделировании опрокидывания вагона с разработанными техническими решениями, максимальное снижение значений критериев травмирования наблюдается для HIC на 40,6 %, для Nij на 36,1 %, для CTI на 56,3 %, для FFC на 31,1 %. Такое уменьшение значений критериев травмирования может свидетельствовать о снижении степени травмирования от тяжелой и средней до легкой степени тяжести травмирования пассажиров в реальных условиях аварийной ситуации с опрокидыванием вагонов.

4 По динамике уменьшения значений критериев травмирования сделан вывод об эффективности применения разработанных технических решений для купе пассажирского вагона при аварийных ситуациях с опрокидыванием вагонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Разработана и апробирована методика определения безопасности пассажирского вагона при опрокидывании.

2 Разработана и верифицирована твердотельная и пластинчатая конечноэлементная модель пассажирского вагона, детально описывающая несущую конструкцию кузова вагона.

3 Разработана и верифицирована компьютерная модель антропометрического манекена для определения возможной степени травмирования пассажиров при опрокидывании вагона.

4 Сформировано шесть сценариев опрокидывания пассажирского вагона, включающих опрокидывание одиночного вагона и сцепы из трех вагонов с малыми и средними скоростями движения на плоскую и наклонную поверхность. Установлено, что пластические деформации кузова пассажирского вагона при опрокидывании не влияют на изменение внутреннего пространства салона вагона.

5 Определена кинематика движения модели антропометрического манекена в зависимости от возможного положения пассажира в салоне вагона в рамках сформированных сценариев опрокидывания пассажирского вагона. Всего рассмотрено 12 положений пассажира в вагоне.

6 Рассчитаны значения универсальных критериев травмирования для головы, шейного отдела позвоночника, грудного отдела и бедра модели антропометрического манекена. Установлено, что пассажиры, находящиеся в купе вагона, могут получать серьезные травмы, приводящие к тяжелым ушибам и переломам костей. Выявлено, что в рамках рассмотренных аварийных сценариев мала вероятность летального исхода для пассажиров.

7 Рекомендовано, для снижения степени травмирования пассажиров, применение технического решения, направленного на ограничение перемещения ручной клади при опрокидывании вагона. Разработаны элементы с пониженной жесткостью, устанавливаемые в, определенных экспериментальным методом,

травмоопасных зонах для пассажиров. Определены параметры предлагаемых технических решений.

8 Выполнена оценка эффективности предложенных технических решений повышения безопасности и снижения степени травмирования пассажиров железнодорожного транспорта. Установлено, что применение разработанных технических решений позволит снизить уровни травмирования пассажиров при опрокидывании пассажирского вагона.

9 Перспективой дальнейшей разработки темы исследования является развитие методики определения безопасности пассажирских вагонов с учетом оценки эффективности эвакуационных мер при опрокидывании вагона. Совершенствование конструкции подвижного состава с целью повышения скорости эвакуации пассажиров, в том числе пассажиров с различной степенью тяжести травмирования при опрокидывании вагона.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

В диссертационной работе применяются следующие обозначения и сокращения:

БГТУ - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

ВНИКТИ - Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава»

ВНИИЖТ - Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта»

ДИИТ – «Днепровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна»

НГТУ – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

ПГУПС - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

РУТ (МИИТ) – Федеральное государственной автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта»

ТИВ – Акционерное общество Научная организация «Тверской институт вагоностроения»

УрГУПС - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения»

NHTSA – (*National highway traffic safety administration*) – Национальное управление безопасности дорожного движения Соединенных Штатов Америки

FRA – (*Federal Railroad Administration*) – Управление железных дорог Соединенных Штатов Америки

Crabi – антропометрический манекен, описывающий ребенка возраста 6, 12, 18 месяцев

Hybrid – семейство манекенов, характеристики которых выражаются в процентилях

SID – (*Side Impact Dummy*) – Антропометрический манекен, используемый для оценки травмирования человека в транспортных средствах при боковых столкновениях

BioRID – (*Rear Impact Dummy*) – Антропометрический манекенов, используемый для оценки травмирования человека в транспортных средствах при ударе в заднюю часть транспортного средства.

CTI – (*Combined Thoracic Index*) – Комбинированный критерий травмирования грудной клетки

CTI(d) – Деформация по комбинированному критерию травмированию грудной клетки

FFC – (*Femur Force Criterion*) – критерий травмирования бедра

HIC – (*Head Injury Criterion*) – критерий травмирования головы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Аварии с поездами: причины, последствия : [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://fb.ru/article/235050/avarii-s-poezdami-prichinyi-posledstviya> (дата обращения: 02.09.2020).
- 2 Федеральный закон от 27.12.2002 г. № 184-ФЗ • Президент России: : [электронный ресурс] : Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/18977> (дата обращения: 02.09.2020).
- 3 Постановление Правительства РФ от 15.07.2010 N 524 «Об утверждении технического регламента о безопасности железнодорожного подвижного состава» | ГАРАНТ: : [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://base.garant.ru/198873> (дата обращения: 15.09.2020).
- 4 Распоряжение Правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-р: [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/93585/> (дата обращения: 02.09.2020).
- 5 Никольский, Л.Н. Особенности изменения сил и напряжений в конструкции вагона при ударах в автосцепку /Л.Н. Никольский, М.А. Озеров, В.Г. Дуденков // Вестник ВНИИЖТ. – №1. – М., 1962. – С.3-7.
- 6 Кеглин, Б. Г. Исследование уточненных расчетных схем вагона применительно к задачам продольной динамики // Труды Брянского ин-та трансп. машиностр. – 1971. – № 24. – С. 123-127.
- 7 Погорелов, Д.Ю. Моделирование контактных взаимодействий в задачах динамики систем тел. / Д.Ю. Погорелов, А.Э. Павлюков, Т.А. Юдакова, С.В. Котов // Динамика, прочность и надежность транспортных машин: Сб. науч. тр. под ред. В.И. Сакало. – Брянск: БГТУ. – 2001. – С. 11-23.
- 8 Кобищанов, В.В. Оценка безопасности пассажиров при столкновении поездов на основе моделирования / В.В. Кобищанов, Д.Я. Антипин, С.Г. Шорохов // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2013. – №18. – С. 164-168.

9 Котуранов, В.Н. Нагруженность элементов конструкции вагонов / В.Н. Котуранов, В.Д. Хусидов // Учебник для вузов. – М.: Транспорт, 1991. – 238 с.

10 Бурчак, Г. П. Моделирование возмущения в виде горизонтальной неровности оси пути для исследования извилистого движения рельсового экипажа / Г. П. Бурчак, А. Н. Савоськин, Г. Н. Фрадкин, В. С. Коссов // Труды МГУ ПС. – 1997. – №912. – С. 23-29.

11 Филиппов, В.Н. Результаты работ по повышению надежности цистерн для сжиженных углеводородных газов / В.Н. Филиппов, А.Е. Скуратов // Транспорт Урала: научно-технический журнал. – 2009. – №2 (21). – С. 42-47.

12 Ромен, Ю. С. Динамика железнодорожного экипажа в рельсовой колее. Методы расчета и испытаний. / Ю. С. Ромен. – М.: ВМГ-Принт, 2014. – 210 с.

13 Хусидов, В. В. Динамика пассажирского вагона и пути модернизации тележки КВЗ-ЦНИИ / В. В. Хусидов, А. А. Хохлов, Г. И. Петров, В. Д. Хусидов // Под ред. А. А. Хохлова. – М.: МИИТ, 2001. – 160 с.

14 Оганьян, Э.С. Критерии несущей способности конструкций локомотивов в экстремальных условиях нагружения: дис... д-ра. техн. наук / Э.С. Оганьян. – М.: МИИТ, 2004. – 389 с.

15 Бороненко, Ю. П. Особенности динамики высокоскоростного поезда «СОКОЛ». / Ю. П. Бороненко, В. С. Лесничий, А. М. Орлова, А. Дятлов // Журнал «Инженер путей сообщения», ПГУПС. – 1998. – № 2. – С. 55-56.

16 Бороненко, Ю.П. Расчёт узлов вагонов на прочность МКЭ / Ю.П. Бороненко, А.В. Третьяков, Г.Е. Сорокин // Учебное пособие и руководство к использованию учебным пакетом программ. – Л.: ЛИИЖТ. – 1991. – 39 с.

17 Смольянинов, А.В. Нагруженность и методы расчета защиты при аварийных ситуациях котлов цистерны для опасных грузов: автореф. дис... д-ра техн. наук / А. В. Смольянинов. – М., 1991. – 42 с.

18 Лапшин, В.Ф. Прогнозирование прочности и долговечности вагонов для перевозки коррозионно-активных грузов: диссертация докт. техн. наук / В.Ф. Лапшин. – Екатеринбург: УрГУПС. – 2003. – 413 с.

19 Павлюков, А.Э. Прогнозирование нагруженности ходовых частей грузовых вагонов повышенной грузоподъемности методами имитационного моделирования: автореф. диссертации д-ра техн. наук / А.Э. Павлюков. – Екатеринбург: УрГУПС. – 2002. – 48 с.

20 Буйносов, А. П. Взаимодействие колеса и рельса // Путь и путевое хозяйство. – 1999. – №5. – С. 22-25.

21 Мямлин, С.В. Улучшение динамических качеств рельсовых экипажей путем усовершенствования характеристик рессорного подвешивания: автореф. диссертации д-ра техн. наук / С.В. Мямлин. – Луганск. – 2004. – 37 с.

22 Вершинский, С.В. Динамика вагона / С.В. Вершинский, В.Н. Данилов, И.И. Челноков // М.: Транспорт. – Москва. – 1972. – 353 с.

23 Лазарян, В.А. Динамика вагонов. Устойчивость движения и колебания. – М.: Транспорт, 1964. – 256 с.

24 Блохин, Е.П. Динамика поезда / Е.П.Блохин, Л.А. Манашкин. – М.: Транспорт, 1982. – 222 с.

25 Коршунов, С. Д. Методика расчетно-экспериментальных исследований кузовов современного подвижного состава / С. Д. Коршунов, А. Н. Скачков, С.Л. Самошкин, Д. И. Гончаров, А. С. Жуков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015. – № 4 (45) – С. 38-47.

26 Юхневский, А.А. Повышение безопасности пассажирских перевозок на вагонах нового поколения габарита «РИЦ»/ А.А. Юхневский, А.А. Полестеров, А.О. Мейстер// Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты. VIII Международная научно-техническая конференция. Тезисы докладов. – СПб.: ПГУПС, 2013. – С. 86-88.

27 Беляев, В.И. Разработка системы безопасности пассажирского поезда при аварийных соударениях/ В. И. Беляев, Ю.М. Черкашин, Д.Л. Ступин, А.Д. Кочнов// Транспорт: Збірник наукових праць. – 2000. – Вип. 6 – С. 11-13.

28 Федеральная служба государственной статистики : [электронный ресурс] : Режим доступа: https://www.gks.ru/free_doc/doc_2018/transp18.pdf (дата обращения: 10.09.2020).

29 LIVEJOURNAL : [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://ru-bmo.livejournal.com/30275.html> (дата обращения: 10.09.2020).

30 Железнодорожные катастрофы в США. Досье – Биографии и справки – ТАСС : [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://tass.ru/info/4822918> (дата обращения: 10.09.2020).

31 Електронні вісті : [электронный ресурс] : Режим доступа: <http://elvisti.com/news> (дата обращения: 10.09.2020)

32 Происшествия в Украине и мире: : [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://korrespondent.net/magnolia> (дата обращения: 10.09.2020).

33 Обзор крупнейших железнодорожных катастроф (2012-2016 гг.) : [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/reviews/obzor-krupneyshikh-zheleznodorozhnykh-katastrof-2012-2016-gg-/> (дата обращения: 10.09.2020).

34 СК назвал предварительные версии крушения поезда на Кубани: Общество: РБК: : [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://www.rbc.ru/society/07/07/2013/57040bee9a794761c0cdf77a/> (дата обращения: 10.09.2020).

35 Крупная ж/д катастрофа в Испании 24 июля 2013 года: : [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://fb.ru/article/228318/krupnaya-j-d-katastrofa-v-ispanii-iyulya-goda/> (дата обращения: 10.09.2020).

36 13 вагонов поезда с пассажирами сошли с рельсов в Атырау – новости Kapital.kz : [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://kapital.kz/gosudarstvo/29152/13-vagonov-poyezda-s-passazhirami-soshli-s-rel-sov-v-atyrau.html/> (дата обращения: 10.09.2020).

37 Крупные железнодорожные аварии и катастрофы в России в 2015-2017 годах – РИА Новости, 03.03.2020 : [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://ria.ru/20200910/kipr-1732795364.html> (дата обращения: 10.09.2020).

38 Крупные железнодорожные аварии и катастрофы в мире в 2015-2016 годах – РИА Новости, 08.04.2016: [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://ria.ru/20160209/1371791367.html> (дата обращения: 10.09.2020).

39 МЧС: четыре вагона пассажирского поезда Екатеринбург - Адлер сошли с рельсов – Происшествия – ТАСС : [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://tass.ru/proisshestiya/2174210> (дата обращения: 10.09.2020).

40 Крушение поезда в Индии 20 ноября 2016 : [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://web.archive.org/web/20161121042425/http://catastrofe.ru/tehnno/transport/232-krushenie-poezda-v-indii.html> (дата обращения: 10.09.2020).

41 В Казахстане сошедший с рельс поезд : [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://ria.ru/20180617/1522881419.html> (дата обращения 10.09.2020)

42 Крупные железнодорожные аварии и катастрофы в мире в 2016 – 2018 годах – РИА Новости, 04.01.2018 : [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://ria.ru/20180104/1512150187.html> (дата обращения: 10.09.2020).

43 Бондаренко, О.И. Оценка уровня травмирования пассажиров вагонов в аварийных ситуациях при взаимодействии с багажом / О.И. Бондаренко, Д.Я. Антипин, С.Г. Шорохов // Транспорт Урала. – 2020. – №1 (64). – С. 30-34.

44 Федеральная служба государственной статистики : [электронный ресурс] : Режим доступа: https://rosstat.gov.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/%20rosstat.ru/statistics/enterprise/transport/ (дата обращения: 23.09.2020)

45 Бондаренко, О.И. Анализ аварийного соударения пассажирского поезда с препятствием на железнодорожном пути / Д.Я. Антипин, С.Г. Шорохов, О.И. Бондаренко // Вестник Брянского государственного технического университета. – № 4 (65). – 2018. – С. 47-54.

46 Bondarenko, O.I. Modeling of nonlinear shock deformation of passenger car bodies with emergency exits / S.G. Shorokhov, O.I. Bondarenko, V.A. Lebedev // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series International Scientific Conference «Conference on

Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-2019». Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations; Polytechnical Institute of Siberian Federal University. – 2019. Vol.1399(1). – P. 022054 (1-7). doi:10.1088/1742-6596/1399/2/022054.

47 Испытания колёсных транспортных средств: учебное пособие / А.М. Иванов, С.Р. Кристальный, Н.В. Попов, А.Р. Спинов. – М.: МАДИ, 2018. – 124 с.

48 Федорова, Н.Н. Основы работы в ANSYS 17 / Н. Н. Федорова, С.А. Вальгер, М. Н. Данилов, Ю. В. Захарова. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.

49 LS-DYNA | Livermore Software Technology Corp : [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://www.lstc.com/products/ls-dyna> (дата обращения: 23.09.2020).

50 SIMULIA Abaqus. Применение комплекса в инженерных задачах : [электронный ресурс] : Режим доступа: https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/abaqus/abaqus_metodic_2010.pdf (дата обращения: 23.09.2020).

51 Pam-Crash | ESI Group : [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://cn.esi-group.com/pam-crash> (дата обращения: 23.09.2020).

52 Бондаренко, О.И. Нагруженность пассажирского поезда при аварийном соударении с автомобилем на железной дороге / Д.Я. Антипин, С.Г. Шорохов, О.И. Бондаренко // Известия транссиба. – 2018. – № 3 (35). – С. 2-10.

53 Гольдин, С.Л. Зарубежный опыт стандартизации для обеспечения безопасности пассажиров при авариях поездов / С.Л. Гольдин // Железные дороги мира. – 2010. – №2. – С. 62-69.

54 Matej, J. Tracked mechanism simulation of mobile machine in MSC.ADAMS/View / J. Matej // Research in Agricultural Engineering. – 2010. – vol. 56, P. 1-7.

55 Chang K.-H. Motion Simulation and Mechanism Design with SolidWorks Motion 2009 / К.-Н. Chang // School of Aerospace and Mechanical Engineering The University of Oklahoma. – 2010. – 134 p.

56 Eichberger, A. TMPT: multi-body package SIMPACK / A. Eichberger, G. Hofmann // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. – 2007. – vol. 45. – P. 207-216.

57 Орлова, А.М. Влияние конструктивных схем и параметров тележек на устойчивость, ходовые качества и нагруженность грузовых вагонов: автореф. диссертации д-ра. техн. наук: 05.22.07 / А.М. Орлова: – СПб. – 2009. – 32 с.

58 Универсальный механизм - программный комплекс для моделирования динамики механических систем: Загрузки. Универсальный механизм 9 / Руководство пользователя : [электронный ресурс] : Режим доступа: <http://www.universalmechanism.com/pages/index.php?id=3> (дата обращения: 23.09.2020).

59 Антипин, Д.Я. Выбор рациональных конструктивных решений и параметров рессорного подвешивания тележек пассажирских вагонов/ Д.Я. Антипин, В.В. Кобищанов// Справочник: инженерный журнал. – 2009. – №10 (151) – С. 14-18.

60 Бороненко, Ю.П. Разработка тележек грузовых вагонов с осевой нагрузкой 30 т/ Ю.П. Бороненко, А.М. Орлова // Сб. науч. статей Подвижной состав 21 века: идеи, требования, проекты. – СПб.: ПГУПС. – 2007. – С. 5-12.

61 Бачурин, Н. С. Методика определения нагруженности шкворневого узла трамвайного вагона / Н. С. Бачурин, К. М. Колясов // Безопасность движения, совершенствование конструкций вагонов и ресурсосберегающие технологии в вагонном хозяйстве: сб. науч. трудов. – Екатеринбург: УрГУПС. – 2003. – С.132-134.

62 Антипин, Д.Я. Методика оценки усталостной долговечности сварных несущих конструкций вагонов/ Д.Я. Антипин, В.В. Кобищанов // Справочник: инженерный журнал. – 2004. – №11. – С.13-18.

63 Серпик, И.Н. Оптимизация несущих систем кузовов грузовых вагонов с использованием комплекса математических моделей / И.Н. Серпик, А.И. Тютюнников // Тяжелое машиностроение. – 2007. – №8. – С.25-28.

64 Лозбинец, В.П. О нормах проектирования кузовов грузовых вагонов/ В.П. Лозбинец, Д.Г. Бейн, О.Н. Козлова// Железнодорожный транспорт. – 2010. – №5. – С.60-61.

65 Лозбинец, Ф.Ю. Оптимальное проектирование несущих конструкций кузовов вагонов / Ф.Ю. Лозбинец // Тяжелое машиностроение. – 2006. – №11. – С.18-22.

66 Овечников, М.Н. Решение проблемы снижения повреждаемости котлов и рам железнодорожных цистерн для перевозки нефтепродуктов с использованием современных программных средств моделирования и расчета конструкции: автореф. диссертации д-ра техн. наук / М.Н. Овечников. – М.: МИИТ. – 2001. – 47 с.

67 Битюцкий, А.А. Разработка комплексного метода проектирования, расчета и испытания грузовых вагонов: автореф. диссертации д-ра техн. наук / А.А. Битюцкий. – СПб.: ПГУПС. – 1995. – 40 с.

68 Ивашова, Т.В. Напряженно-деформированное состояние котлов цистерн с учетом воздействия коррозионно-активных грузов: автор. диссертации канд. техн. наук / Т.В. Ивашова. – Екатеринбург: УрГУПС. – 2003. – 22 с.

69 Bubnov, V.M. Construction design and decision analysis of tank car / V.M. Bubnov, S.V. Myamlin, A.A. Nikitchenko, D.T. Lavrenko // Proceedings of the 11th mini conf. on vehicle system dynamics, identification and anomalies. –Budapest, 2008. – p. 301-308.

70 Беляев, В.И. Обеспечение безопасности пассажиров поезда постоянного формирования при аварийных соударениях/ В. И. Беляев, Ю.М. Черкашин, Ю.Н. Койчев// Вестник ВНИИЖТ. – 2000. – № 4. – С. 12-15.

71 Кобищанов, В.В. Оценка безопасности пассажиров при столкновении поездов на основе моделирования / В.В. Кобищанов, Д.Я. Антипин,

С.Г. Шорохов // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2013. – №18. – С. 164-168.

72 Бобров, М.В. Прогнозирование уровня повреждений пассажиров в вагоне с местами для сидения при больших скоростях соударения / М.В. Бобров, М.А. Булычев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – № 2(38). – С. 16-21.

73 Шорохов, С.Г. Обоснование технических решений обеспечения механической безопасности пассажирских вагонов при аварийных соударениях: автореф. диссертации канд. техн. наук / С.Г. Шорохов. – М. – 2015. – 16 с.

74 Linstromberg, M. Test and simulation tools in a rollover protection development process / M. Linstromberg, G. Scholpp, Ol. Scherf // Siemens Restraint Systems GmbH. – Paper №. 05-0122.

75 An investigation of the mechanics of rollover for cars and light trucks : [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=11929&context=rtd> (дата обращения: 23.09.2020).

76 Lund, Y. An investigation of the mechanics of rollover for cars and light trucks / Yvonne Irene Katherine Lund // Retrospective Theses and Dissertations. – Iowa State University. – 155 p.

77 Тумасов, А.В. Разработка методики расчетной оценки пассивной безопасности кузовов и кабин автомобилей при опрокидывании: диссертация ...канд. техн. наук: 05.05.03 / Тумасов Антон Владимирович – Нижний Новгород. – 2008. – 265 с.

78 Батманов, Э.З. Интегральная оценка пассивной безопасности легковых автомобилей: диссертация ...канд. техн. наук: 05.22.10 / Батманов Эдвард Загидинович – Москва, 2004. – 174 с.

79 Безопасность автотранспортных средств: учебник для вузов. / В.В. Ломакин, Ю.Ю. Покровский, И.С. Степанов, О.Г. Гоманчук; под общ. ред. В.В. Ломакина. – М: МГТУ «МАМИ», 2011. – 299 с.

80 Рогов, П.С. Оценка пассивной безопасности автобусов по результатам расчетов кузовов и испытаний их секций / П.С. Рогов, Л.Н. Орлов, А.С. Вашурин // Исследования, конструкции, технологии. – 2014. – №4(87). – С.26-30.

81 Основы разработки конечно-элементных моделей кузовных конструкций автотранспортных средств. Расчеты на безопасность и прочность: учебное пособие / Л.Н. Орлов, А.В. Тумасов, Е.В. Кочанов [и др.] / под. ред. Л.Н. Орлова; Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т. им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – 144 с.

82 Орлов, Л.Н. Повышение пассивной безопасности автотранспортных средств / Л.Н. Орлов, А.В. Тумасов, С.А. Багичев // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 3(105). – С.163-172.

83 Вашурин, А.С. Разработка методики и оценка пассивной безопасности кузовов из многослойных панелей вахтовых автобусов: автореферат дис. ... канд. тех. наук: 05.05.03 / Вашурин Андрей Сергеевич. – Нижний Новгород: НГТУ, 2014. – 19 с.

84 Pankaj S.D. Rollover and roof crush analysis of low-floor mass transit bus / S. Deshmukh Pankaj // M.Sc. Thesis. Wichita, KS. – 2006. – 104 p.

85 Chawla, A. Investigating the rollover propensity of a 15 seater mini bus / A. Chawla, Sudipto Mukherjee, Akshaya Nayak, Dinesh Mohan // Int. J. Vehicle Safety. – 2007. – vol. 2. – P. 1-19.

86 Patil, A. Rollover Analysis of Sleeper Coach Bus by Virtual Simulation in LS-DYNA / A. Patil, S.R. Pawar // International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR). – 2016.– Issue 5. – P. 1815-1820.

87 Belsare, V. ROLLOVER ANALYSIS OF PASSENGER BUS AS PER AIS-031 / V. Belsare, C. Pathak, M. Kulkarni // International Journal of Engineering Research and Development. – 2012. – Vol.4. – Issue 5. – P. 49-59.

88 ГОСТ Р 41.66-99 (Правила ЕЭК ООН N 66) Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения крупногабаритных

пассажирских транспортных средств в отношении прочности верхней части конструкции = Uniform provisions concerning the approval of large passenger vehicles with regard to the strength of their superstructure : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 26 мая 1999 г. N 184 : введен впервые : дата введения 2000-07-01 / разработан Всероссийским научно-исследовательским институтом стандартизации и сертификации в машиностроении (ВНИИНМАШ). - Москва : Стандартинформ, 1999. – 15 с.

89 Belingardi, G. MULTIBODY ANALYSIS OF M3 BUS ROLLOVER: STRUCTURAL BEHAVIOUR AND PASSENGER INJURY RISK / G. Belingardi, D. Gastaldin, P. Martella, L. Peroni // Dipartimento di Meccanica Politecnico di Torino C.so Duca degli Abruzzi 24. – 2003. – vol. 288. – 12 p.

90 Micu, D.A. A ROLLOVER TEST OF BUS BODY SECTIONS USING ANSYS / D.A. Micu, M.D. Iozsa // 5th International Conference «Computational Mechanics and Virtual Engineering» COMEC 2013. – Braşov, Romania, 2013. – P. 6.

91 Micu, D.A. Analysis of the Rollover Behavior of the Bus Bodies / D.A. Micu, M.D. Iozsa // ANALELE UNIVERSITĂȚII «EFTIMIE MURGU» RESITA ANUL XVIII. – NR, 2011. – P. 125-134.

92 Prochowski, L. Analysis of the risk of double-deck bus rollover at the avoidance of an obstacle (analytical approach and computer simulation) / L. Prochowski, K. Zielonka // Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability. – 2014. – vol. 16 (4). – P. 507-517.

93 Gursel, T. Analysis of the Superstructure of a Designed Bus in Accordance with Regulations ECE R 66 / K.T. Gursel, S. Gursesli // G.U. Journal of Science. – 2010. – Vol. 23(1). P. 71-79.

94 Kaptanoğlu, M. ROLLOVER CRASHWORTHINESS OF A MULTIPURPOSE COACH / M. Kaptanoğlu, Ö. Küçük // OTEKON 2014 Otomotiv Teknolojileri Kongresi. – Bursa, 2014. – P. 1-8.

95 Numerical static and dynamic stress analysis on railway passenger and freight car models / C. Baykasoglu, E. Sunbuloglu, S. E. Bozdog, F. Aruk, T. Toprak, A. Mugan // International Iron & Steel Symposium. – Karabuk, Turkiye, 2012. – P. 579 – 586.

96 Liang, C.-C. OPTIMIZATION OF BUS ROLLOVER STRENGTH BY CONSIDERATION OF THE ENERGY ABSORPTION ABILITY / C.-C. Liang // International Journal of Automotive Technology. – 2010. – Vol. 11. – No. 2. – P. 173–185.

97 Бондаренко, О.И. Требования по обеспечению безопасности железнодорожного пассажирского подвижного состава в аварийных ситуациях / Д.Я. Антипин, О.И. Бондаренко, С.Г. Шорохов, Д.А. Бондаренко // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производства», Том 4. Технические и естественные науки. Рост. Гос. ун-т. Путей сообщения. Ростов н/Д, 2019. – С. 290–294.

98 Mao, M. Assessment of Vehicle Roof Crush Test Protocols Using FE Models: Inverted Drop Tests Versus Updated FMVSS / Mao M., Chirwa E.C., Wang W. // International Journal of Crashworthiness. – 2006. – Vol. 11. – No. 1. – P. 49-63.

99 National Highway Traffic Safety Administration, Final Regulatory Impact Analysis, FMVSS 220, Upgrade Roof Crush Resistance, 1991. – 40 p.

100 Elitok, K. An investigation on the rollover crashworthiness of an intercity coach, influence of seat structure and passenger weight / M. A. Guler, B. Bayram, U. Stelzmann // International Journal of Crashworthiness. – 2007. – P. 567-580.

101 Federal Railroad Administration. Code of Federal Regulations, 49, Transportation (49 CFR). Part 238.201, Passenger Equipment Safety Standards. Department of Transportation (U.S. DOT). Office of the Federal Register, National Archives and Records Administration. Washington, DC. As of October 1, – 2012. – 106 p.

102 National Highway Traffic Safety Administration, Federal Register, Vol. 74, No. 90, Docket No. NHTSA 2009-0093-1, 2009. – 46 p.

103 National Highway Traffic Safety Administration, Final Regulatory Impact Analysis, FMVSS 216, Upgrade Roof Crush Resistance. – 2009. – 64 p.

104 National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). 49 CFR. Part 571, Federal Motor Vehicle Safety Standards (FMVSS), Subsection 571.217, FMVSS No. 217, Bus Emergency Exits and Window Retention and Release. U.S. DOT. Office of the Federal Register, National Archives and Records Administration, Washington, DC. As of October 1, 2012. – 68 p.

105 FRA. Passenger Train Emergency Systems: Review of Egress Variables and Egress Simulation Models. Department of Transportation (U.S. DOT). Office of the Federal Register, National Archives and Records Administration. Washington, DC. As of May, 2013. – 96 p.

106 Vehicle crashworthiness and occupant protection: safety book / Paul Du Bois, Clifford C. Chou, Bahig B. Fileta, Tawfik B. Khalil, Albert I. King, Hikmat F. Mahmood, Harold J. Mertz, Jac Wismans. – American Iron and Steel Institute. – 2000. – 388 p.

107 Tabiei, Al Validation of finite element crash test dummy models for predicting ORION crew member injuries during a simulated vehicle landing / Al Tabiei, Ch. Lawrence, Ed. L. Fasanella // NASA/TM. – 2009. – 2009-215476. – P. 31.

108 Polanco, M.A. Vertical Drop Testing and Simulation of Anthropomorphic Test Devices / M.A. Polanco, J.D. Littell // 67th Annual Forum. – Virginia Beach, VA. – 2011. – P.18.

109 Perez, O. Evaluation of the FAA Hybrid III 50th percentile anthropometric test dummy under the FAR 23.562 and 25.562 emergency landing conditions for the combined horizontal-vertical dynamic loading / O. Perez // Oriol Oliva-Perez. – Polytechnic University of Catalonia. – 2010. – 76 p.

110 Рябчинский, А.И. Механизм травмирования человека в автомобиле и биомеханика дорожно-транспортных происшествий / А.И. Рябчинский / Таллин: Валгус. – 1979. – 126 с.

111 Tyrell, D. Crashworthiness of Passenger Trains. Safety of High-Speed Ground Transportation Systems / David Tyrell, Kristine Severson, Brian Marquis // U.S. Department of Transportation Office of Systems Engineering Research and Special Programs Administration John A. Volpe February. – 1998. – 112 p.

112 Fildes, B.N. Passenger cars and Occupant injury: side impact crashes. / B.N. Fildes, J.C. Lane, J. Lenard, A.P. Vulcan // Monash University Accident Research Centre. – 1994. – 120 p.

113 Zuby, D.S. The influence of crash pulse shape on BioRID response // D.S. Zuby, C.M. Farmer, M. Avery // Proceedings of the 2003 IRCOBI Conference. – Bron, France: IRCOBI. – 2003. – P. 327-341.

114 Sled tests using the THOR - NT device and post mortem human surrogates in frontal impacts / Narayan Yoganandan, Frank Pintar, Jason Moore, Michael Schlick, John Humm, James Rinaldi, Dennis J. Maiman. // Proceedings of IRCOBI Conference. – 2012. - P. 130-141.

115 Бондаренко, О.И. Оценка травмирования пассажиров вагонов при опрокидывании вагона на бок / О.И. Бондаренко // Новые горизонты: материалы VII научно-практической конференции с международным участием, 20 марта 2020 года, Брянск/под ред. О.М. Голембиовской. – Брянск: БГТУ, 2020. – С. 23-26.

116 Hybrid III 50th Male | Humanetics : [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://humanetics.humaneticsgroup.com/products/anthropomorphic-test-devices/frontal-impact/hybrid-iii-50th-male/hybrid-iii-50th-male> (дата обращения: 29.10.2020).

117 CRABI 12-Month Old Physical Data | National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) : [электронный ресурс] : Режим доступа: <https://one.nhtsa.gov/Research/CRABI-12%E2%80%93Month-Old-Physical-Data> (дата обращения: 29.10.2020).

118 Petrović, Z. Research of the effects of shock and vibrations on the human body / Z. Petrović // VOJNOTEHNIČKI GLASNIK. MILITARY TECHNICAL COURIER. – 2017. – Vol 65. – No 1. – P. 69–88

- 119 Patel, D. Study of rear impact in light trucks and potential injuries to the occupants / Dhruv Vikram Patel. – Mumbai University. – 2003. – 100 p.
- 120 Henderson, B. A retrospective study in understanding «low speed change» vehicle collisions, occupant movement and likelihood of injury / Brian Henderson // University of Central Lancashire. – 2012. – 215 p.
- 121 Kan, C.-D. Development of a 50th percentile Hybrid III dummy model / C.- D. Kan, D. Marzougui, N.E. Bedewi // 4th European LS-DYNA Users Conference. – P. 13-22.
- 122 Jaśkiewicz, M. Overview and analysis of dummies used for crash tests / M. Jaśkiewicz, R. Jurecki, K. Witaszek, D. Więckowski // Scientific Journals Maritime University of Szczecin. – 2013. – vol. 35(107). – P. 22–31.
- 123 Linder, A. Evaluation of the BioRID P3 and the Hybrid III in pendulum impacts to the back: a comparison with human subject test data / A Linder, U Bergman, M Svensson, D Viano // Traffic Injury Prevention. – vol. 3. – №2. – P.159-166.
- 124 Бобров, М.В. Прогнозирование уровня повреждений пассажиров в вагоне с местами для сидения при больших скоростях соударения / М.В. Бобров, М.А. Булычев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – № 2(38). – С. 16-21.
- 125 Беляев, В.И. Разработка системы безопасности пассажирского поезда при аварийных соударениях/ В. И. Беляев, Ю.М. Черкашин, Д.Л. Ступин, А.Д. Кочнов// Транспорт: Збірник наукових праць. – 2000. – Вип. 6 – С. 11-13.
- 126 Беляев, В. И. Обеспечение безопасности пассажиров поезда постоянного формирования при аварийных соударениях / В. И. Беляев, Ю.М. Черкашин, Ю.Н. Койчев // Вестник ВНИИЖТ. – 2000. – № 4. – С. 12-15.
- 127 Kleinberger, M. Development of Improved Injury Criteria for the Assessment of Advanced Automotive Restraint Systems / Michael Kleinberger, Emily Sun, Rolf Eppinger, Shashi Kuppaa, Roger Saul // National Highway Traffic Safety Administration Vehicle Research & Test Center (VRTC). – 1998. – 120 p.

128 Бондаренко, О.И. Анализ безопасности несущей конструкции кузова пассажирского вагона при аварийном опрокидывании на боковую стену / О.И. Бондаренко, Д.Я. Антипин, С.Г. Шорохов // Материалы VIII международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2019». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. – С. 188-93.

129 Бондаренко, О.И. Методика анализа безопасности конструкции пассажирских вагонов при аварийных соударениях / О.И. Бондаренко, С.Г. Шорохов // Техника и технологии наземного транспорта: материалы Всероссийской конференции аспирантов (25 – 26 января 2018 г., г. Екатеринбург: УрГУПС, 2018. – С. 13-17.

130 Тверской Вагоностроительный Завод : [электронный ресурс] : Режим доступа: <http://www.tvz.ru/> (дата обращения: 15.10.2020).

131 Модель 61-4440 : [электронный ресурс] : Режим доступа: http://www.tvz.ru/catalog/passenger/item_detail.php?ELEMENT_ID=182 (дата обращения: 15.10.2020).

132 Bondarenko, O. I. CAD/CAE-technologies application for assessment of passenger safety on railway transport in emergency / D. Ya. Antipin, S. G. Shorokhov, O. I. Bondarenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. Vol. 327. – P. 022007 (1-7). doi: 10.1088/1757-899X/327/2/022007.

133 Бондаренко, О.И. Оценка безопасности пассажирских вагонов при аварийном опрокидывании на бок / Бондаренко О.И., Бондаренко Д.А., Антипин Д.Я. // Труды 60-й Всероссийской научной конференции МФТИ. 20–26 ноября 2017 г. Аэрокосмические технологии. - М.: МФТИ, 2017. – С. 186-188.

134 Рязанов, Э.М. Совершенствование расчетных методов оценки работоспособности аварийных крэш-систем электропоездов: диссертация ...канд. техн. наук: 05.22.07 / Рязанов Эльдар Михайлович – Екатеринбург. – 2016. – 149 с.

135 Bondarenko, O.I. Prediction of injury to passengers of railway rolling stock based on modern physical simulation methods / S.G. Shorokhov, O.I. Bondarenko, V.V. Kobishanov//

В сборнике: Journal of Physics: Conference Series International Scientific Conference «Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-2019». Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations; Polytechnical Institute of Siberian Federal University. – 2019. Vol. 1399. – P. 055098 (1-7). doi:10.1088/1742-6596/1399/5/055098

136 Бондаренко, О.И. Методика оценки безопасности пассажирского подвижного состава при аварийном опрокидывании с использованием элементов САПР / О.И. Бондаренко, Д.Я. Антипин // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. II Международной научно-практической конференции / под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. – Брянск: БГТУ, 2018. – Ч.2. С. 6-9.

137 Бондаренко, О.И. Методика оценки безопасности пассажирских вагонов при аварийном опрокидывании / О.И. Бондаренко // XXIX Международная конференция «Машиноведение и инновации. Конференция молодых учёных и студентов» (МИКМУС - 2017): материалы конференции (Москва, 6-8 декабря 2017 года)/М: Изд-во ИМАШ РАН, 2018 – С.54-56.

138 Орлов, Л.Н. Расчетная оценка пассивной безопасности кузовов и кабин автотранспортных средств: методические указания к лабораторным и курсовой работам по курсам «Строительная механика автомобиля» / Л.Н. Орлов // Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород. – 2012. – 17 с.

139 Бондаренко, О.И. Методика оценки безопасности пассажирских вагонов в условиях аварийного опрокидывания на откос насыпи железнодорожного полотна / О.И. Бондаренко // Новые горизонты: Материалы V Международной конференции-конкурса, 20 апреля 2018 года, Брянск [Текст] + [Электронный ресурс]/под ред. О.М.Голембиовской. – Брянск: БГТУ, 2018. – С. 48-50.

140 СП 238.1326000.2015 Железнодорожный путь : свод правил Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Министерства транспорта Российской Федерации 06 июля 2015 г. N 209 : дата введения 2015-07-30 / разработан Открытым акционерным обществом

"Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта" (ОАО "ВНИИЖТ") и Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования "Московский государственный университет путей сообщения" (МГУПС (МИИТ)). – Москва : Стандартинформ, 2015. – 71 с.

141 Бондаренко, О.И. Методика моделирования упругопластических деформаций материалов несущей конструкции кузова пассажирского вагона при аварийных соударениях / Бондаренко О.И., Высоцкий А.М. // Сборник научных трудов 8-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные инновации в науке и технике» (19-20 апреля 2018 года)/ редкол.: Горохов А.А. (отв. Ред.); Юго-Зап. Гос. Ун-т. Курск, 2018. – С. 46-49.

142 Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ. – ВНИИЖТ. – 1983. – 260 с.

143 ГОСТ 10791-2011 Колеса цельнокатаные. Технические условия = All-rolled wheels. Specifications : межгосударственный стандарт Российской Федерации: издание официальное : утвержден и введен в действие по переписке Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол N 46 от 15 марта 2011 г.) : дата введения 2012-01-01 / разработан открытым акционерным обществом "Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ОАО "ВНИИЖТ"), открытым акционерным обществом "Уральский институт металлов" (ОАО "УИМ"), открытым акционерным обществом "Научно-исследовательский институт вагоностроения", Институтом черной металлургии НАН Украины. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 28 с.

144 Belytschko, T. Nonlinear finite elements for continua and structures / T. Belytschko, W. K. Liu, B. Moran // Chichester : John Wiley & Sons Ltd. – 2001. – 650 p.

145 Бондаренко, О. И. Исследование аварийного опрокидывания пассажирских вагонов для оценки безопасности пассажиров / О.И. Бондаренко, Д.А. Бондаренко // Перспективное развитие науки, техники и технологий: сборник научных статей материалы 8-й Международной научно-практической конференции (24-25 октября 2018 года)/ редкол.: Горохов А.А. (отв. ред.); Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2018. – С. 21-23.

146 Клованич, С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных расчетах пространственных железобетонных конструкций / С.Ф. Клованич, Д.И. Безушко// Одесса:Издательство ОНМУ. – 2009. – 89с.

147 Гончаров, П.С. NX Advanced Simulation. Практическое пособие / П.С. Гончаров, И.А. Артамонов, Т.Ф. Халитов, С.В. Денисихин, Д.Е. Сотник. – М.: МДК Пресс. – 2014. – 112 с.

148 Отчет по определению массы и координат центра тяжести кузова вагона модели 61-4447. – Тверь: ОАО «ТВЗ». – 2006. – 59 с.

149 Бондаренко, О.И. Оценка безопасности пассажирского подвижного состава при опрокидывании вагонов / О.И. Бондаренко, Д.А. Бондаренко // Проблемы безопасности на транспорте: материалы X междунар. Научн.-практ. конф. (Гомель, 26-27 ноября, 2020 г.) : в 5 ч. Ч. 5 / М-во трансп. И коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж.д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2020. – С. 16-18.

150 Отчет о научно-исследовательской работе: Прочностные статические испытания кузова пассажирского вагона модели 61-4447». ЗАО НО «ТИВ». – Тверь. – 2012. – 35 с.

151 Протокол периодических испытаний №ИЦ-149/05-14 от 24 апреля 2014 г. Вагон пассажирский купейный модели 61-4440, изготовленный по ТУ 3183-020-05744544-2008. ЗАО НО «Тверской институт вагоностроения. – 2014 г.

152 Гребенюк, П.Т. Тяговые расчеты: справочник / П.Т. Гребенюк, А.Н. Долганов, А.И. Скворцов. – М.: Транспорт. – 1987. – 272 с.

153 Бондаренко, О.И. Методика оценки травмирования пассажиров железнодорожного транспорта при аварийных ситуациях / Д.А. Бондаренко, О.И. Бондаренко // Современные инновации в науке и технике: Сборник научных трудов 10-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (15-16 апреля 2020 года)/ редкол.: Разумов М.С. (отв. ред.); ЮгоЗап. гос. ун-т. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. – 2020. – С. 51-54.

154 Бондаренко, О.И. Оценки травмирования пассажиров при аварийном опрокидывании вагона на бок / О.И. Бонадренко, Д.А. Бондаренко // Проблемы и перспективы развития России: Молодежный взгляд в будущее: сборник научных статей 3-й Всероссийской научной конференции (15-16 октября 2020 года), в 4-х томах, Том 4. Юго-Зап. гос. ун-т., Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2020, - С. 12-14.

155 Бондаренко, О.И. Анализ возможного травмирования пассажиров подвижного состава при аварийном опрокидывании кузова вагона на боковую стену / О.И. Бондаренко, С.Г. Шорохов // Новые горизонты: Материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию БГТУ, 21 марта 2019 года, Брянск [Электронный ресурс]/под ред. О.М. Голембиовской. – Брянск: БГТУ, 2019. – С. 8–11.

156 Уткин, В.Л. Биомеханика физических упражнений: Учеб. пособие для студентов фак. физ. воспитания пед. ин-тов и для ин-тов физ. культуры. – М.: Просвещение. – 1989. – 210 с.

157 Xu, T. Development and validation of dummies and human models used in crash test / T. Xu, X. Sheng, T. Zhang, H. Liu, X. Liang, A. Ding // Applied Bionics and Biomechanics. – 2018. – 12 p.

158 Вибрации в технике: справочник в 6 т. Т. 6. Защита от вибрации и ударов / В. К. Асташев, В. И. Бабицкий, И. И. Быховский и др.; под ред. К. В. Фролова. – М.: Машиностроение. – 1995. – 456 с.

159 Bergstrom, J.S. Constitutive modeling of the large strain time-dependent behavior of elastomers. / J.S. Bergstrom, M.C. Boyce // J. Mech. Phys. Solids. – 1998. – vol. 46. – iss. 5. – P. 931–954.

160 Белкин, А.Е. Математическая модель вязкоупругого поведения полиуретана при сжатии с умеренно высокими скоростями деформирования / А.Е. Белкин, И.З. Даштиев, В.К. Семенов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2014. – № 6. – С. 44–58

161 Parts list and drawings subpart E Hybrid III 50th percentile male, April 1997. – 332 p.

162 Commuter Rail Seat Testing and Analysis of Facing Seats, 2003. – 192 p.

163 Commuter Rail Seat. DOT/FRA/ORD-01/06. U.S. Department of Transportation Federal Railroad Administration. Washington, D.C. – July 2002. – 203 p.

164 ГОСТ Р 55182-2012 Вагоны пассажирские локомотивной тяги = Passenger cars on locomotive traction. General technical requirements : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 ноября 2012 г. № 1161-ст : переиздание : дата переиздания 2019-07 / разработан открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ОАО «ВНИИЖТ») совместно с открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский институт вагоностроения» (ОАО «НИИ вагоностроения»);). – Москва : Стандартинформ, 2014. – 24 с.

165 СП 2.5.1198-03 Санитарные правила по организации пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте: свод правил Российской Федерации: издание официальное : утвержден и введен в действие Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 3 марта 2003 года: дата введения 2003-06-03 / разработаны на основании Федерального закона от 30 марта 1999 года № 52-ФЗ "О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения" (Собрание законодательства Российской Федерации, 1999, № 14, ст.1650), Положения о государственном санитарно-эпидемиологическом нормировании, утвержденного

постановлением Правительства Российской Федерации от 24 июля 2000 года N 554 (Собрание законодательства Российской Федерации, 2000, № 31, ст.3295), Положения о порядке осуществления государственного санитарно-эпидемиологического надзора на объектах железнодорожного транспорта ЦУВС-782 от 14 сентября 2000 года, зарегистрированного Минюстом России 10 ноября 2000 года, регистрационный N 2447. – Москва : Стандартиформ, 2020. – 52 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

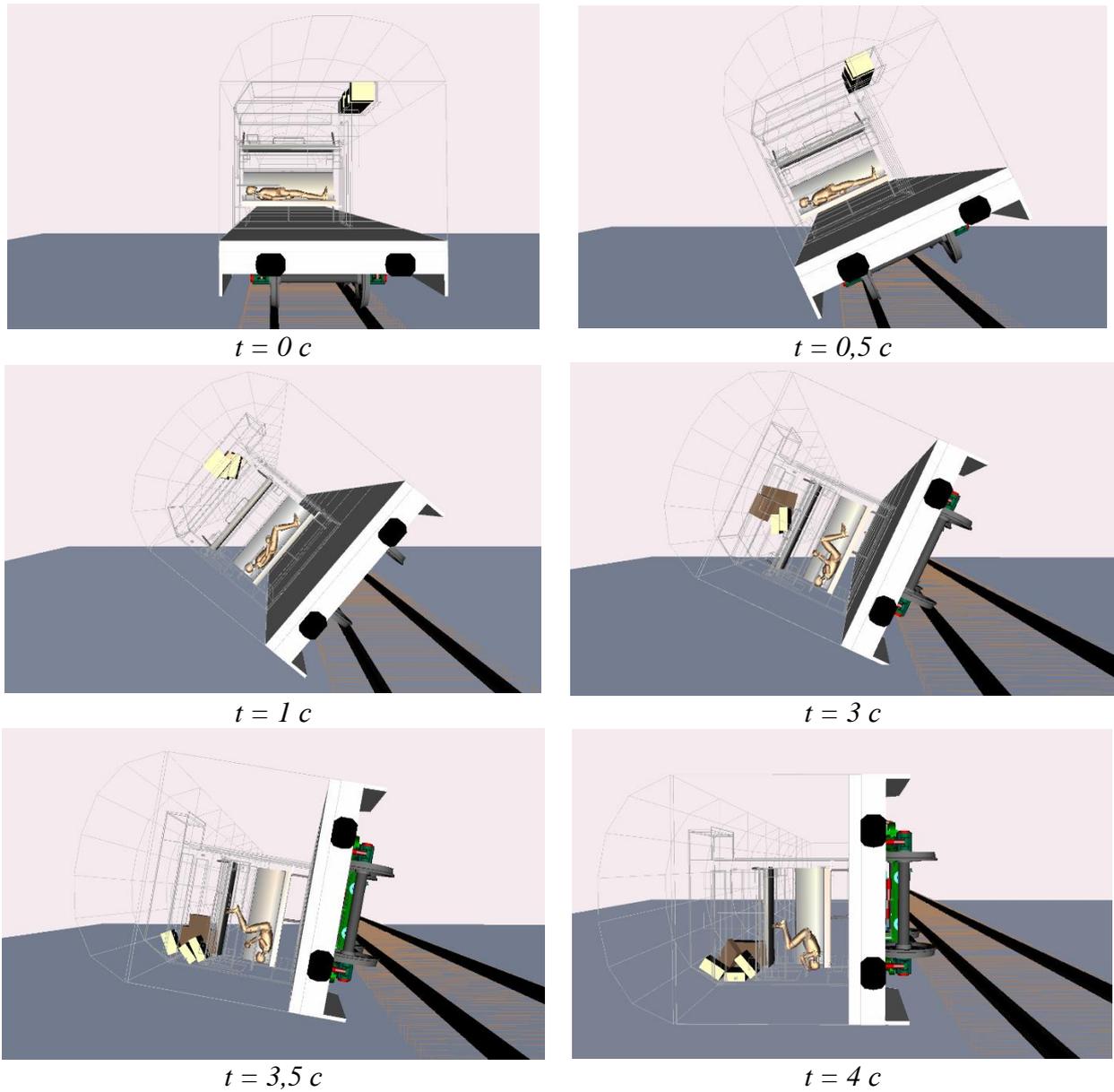


Рисунок А.1 - Кинематика движения модели манекена при моделировании опрокидывания вагона по сценарию 1 для манекена 7

Продолжение приложения А

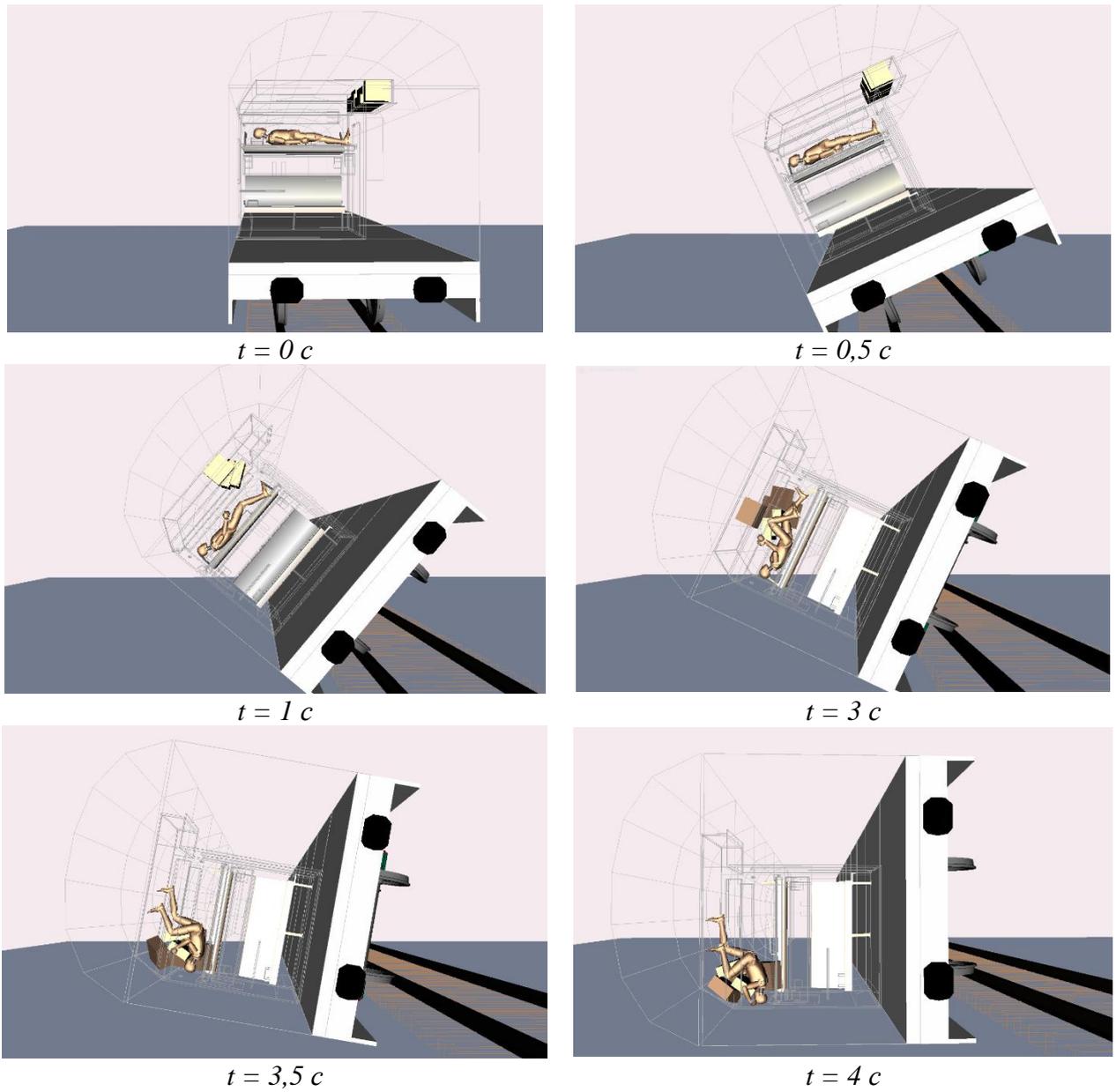


Рисунок А.2 - Кинематика движения модели манекена при моделировании опрокидывания вагона по сценарию 1 для манекена 6

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

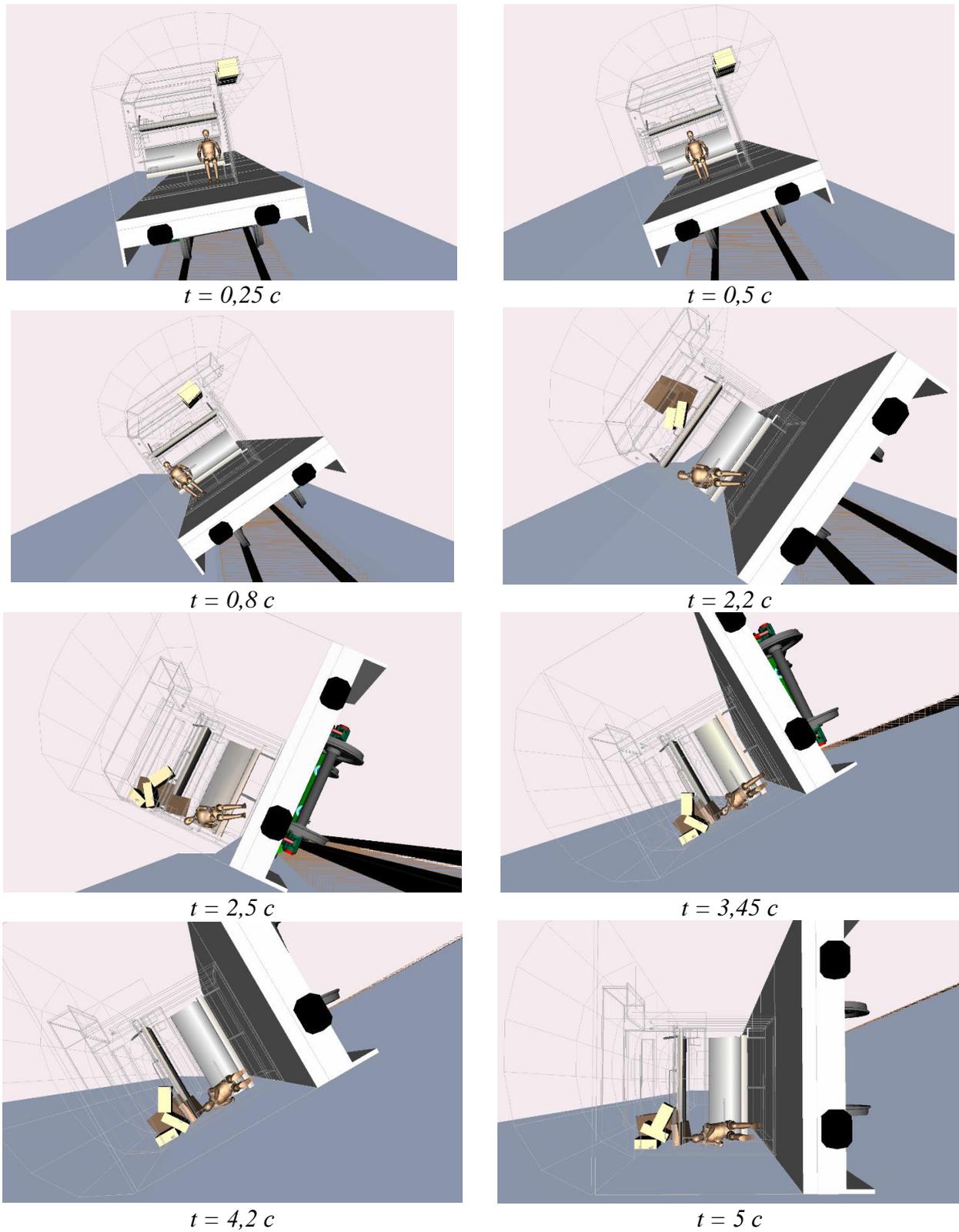


Рисунок Б.1 – Кинематика движения модели манекена при моделировании опрокидывания вагона по сценарию 3 для манекена 3

Продолжение приложения Б

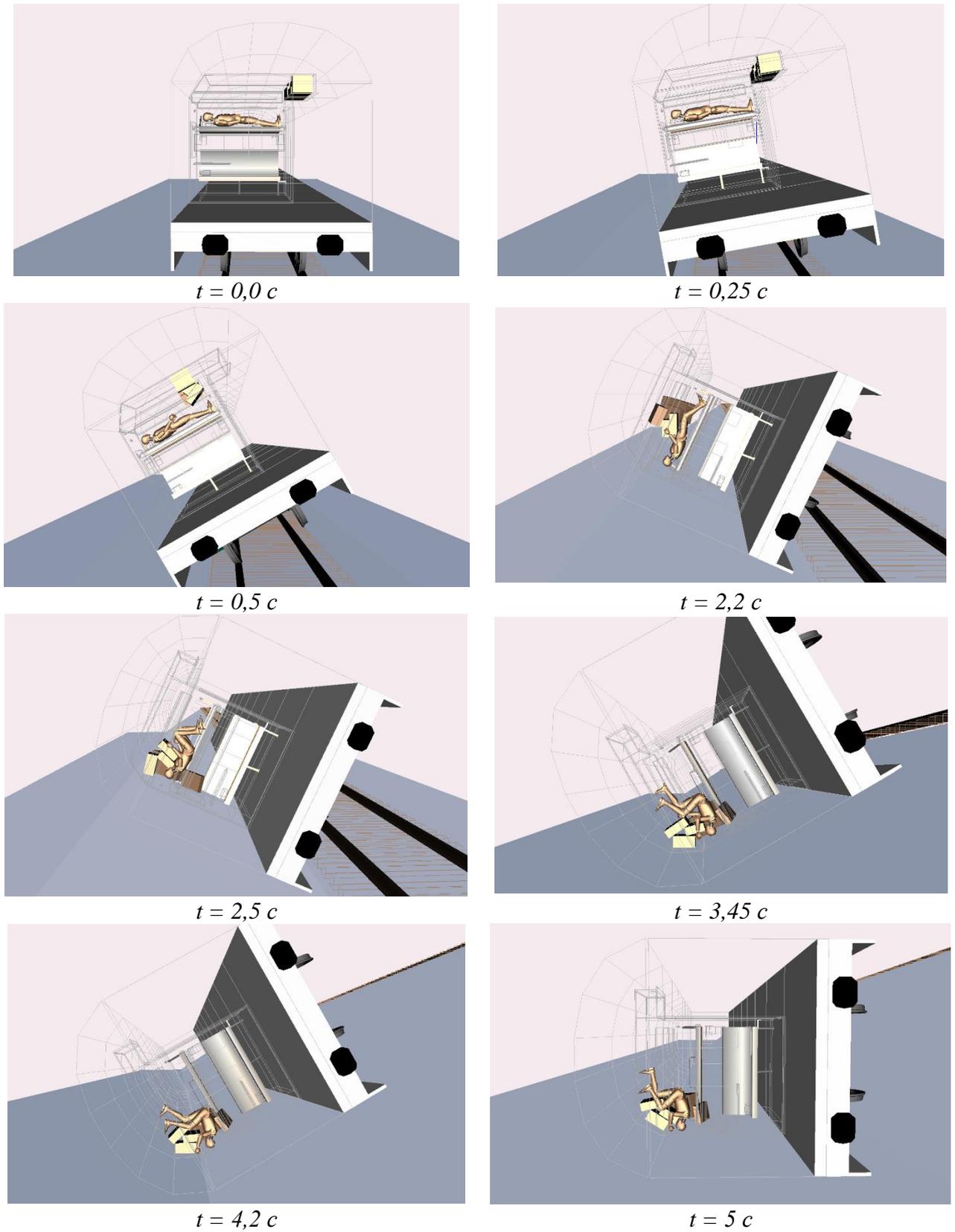


Рисунок Б.2 – Кинематика движения модели манекена при моделировании опрокидывания вагона по сценарию 3 для манекена 6

ПРИЛОЖЕНИЕ В

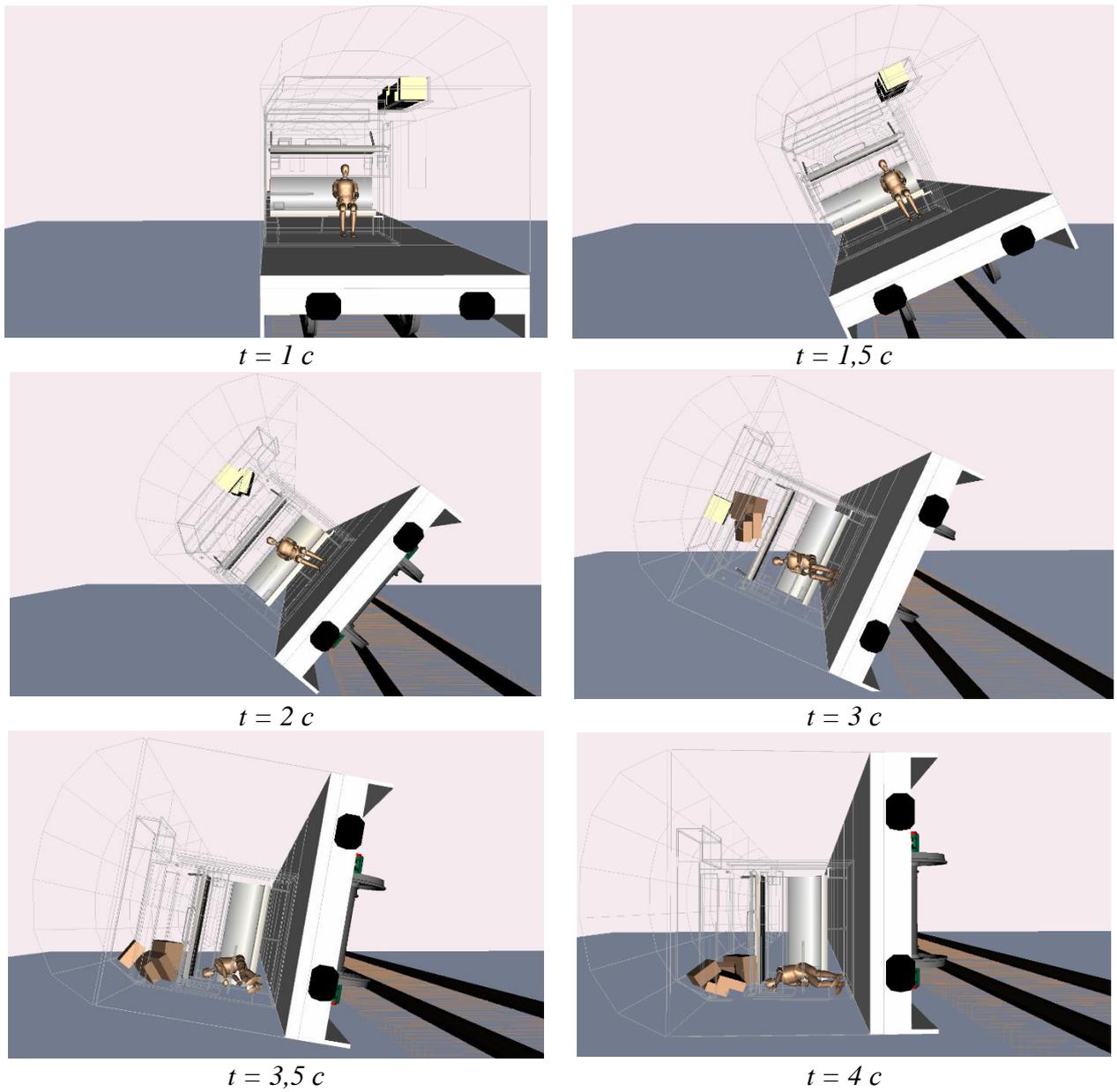


Рисунок В.1 - Кинематика движения модели манекена при моделировании опрокидывания вагона по сценарию 2 для манекена 3

Продолжение приложения В

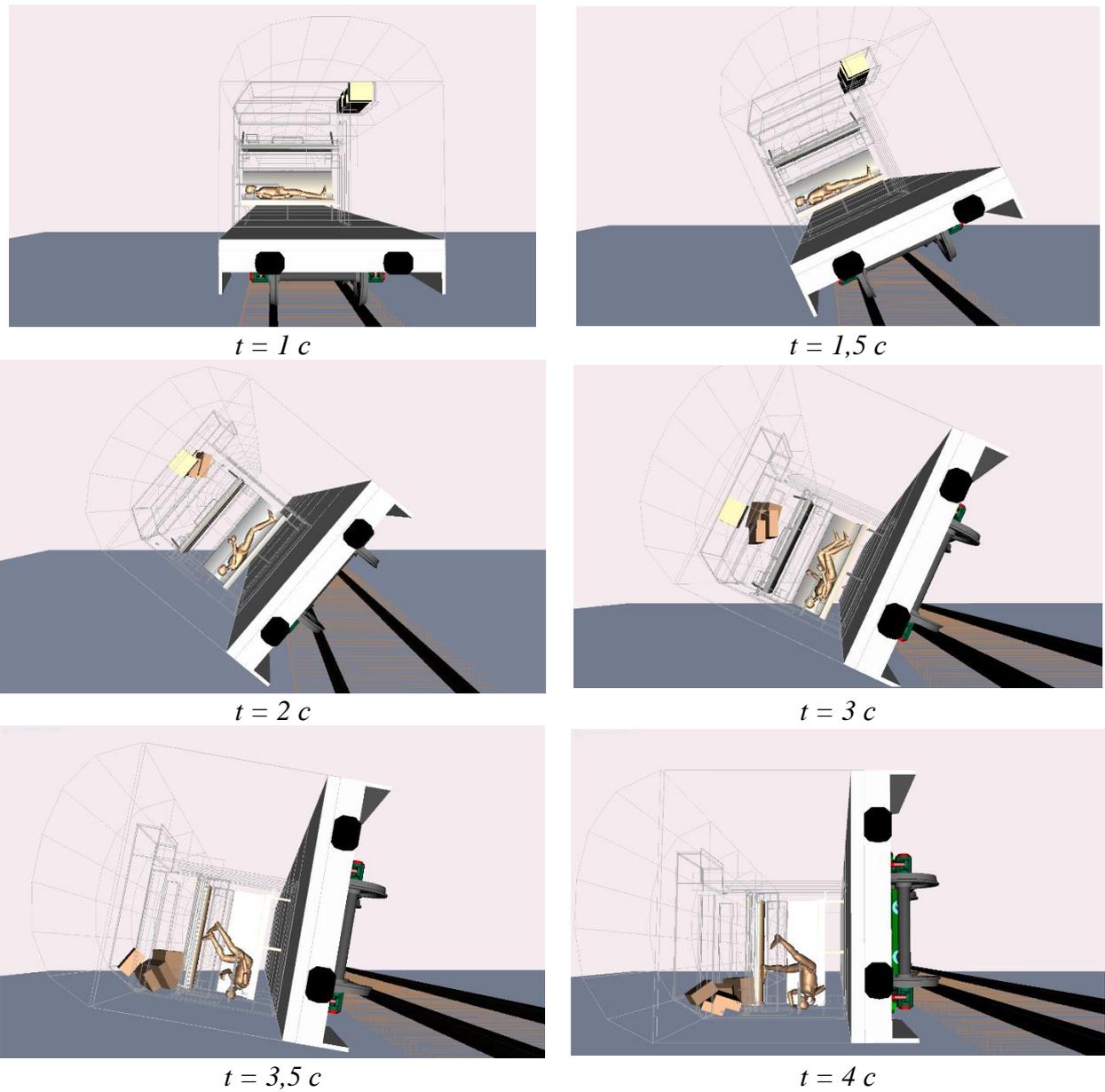


Рисунок В.2 - Кинематика движения модели манекена при моделировании опрокидывания вагона по сценарию 2 для манекена 7

Продолжение приложения В

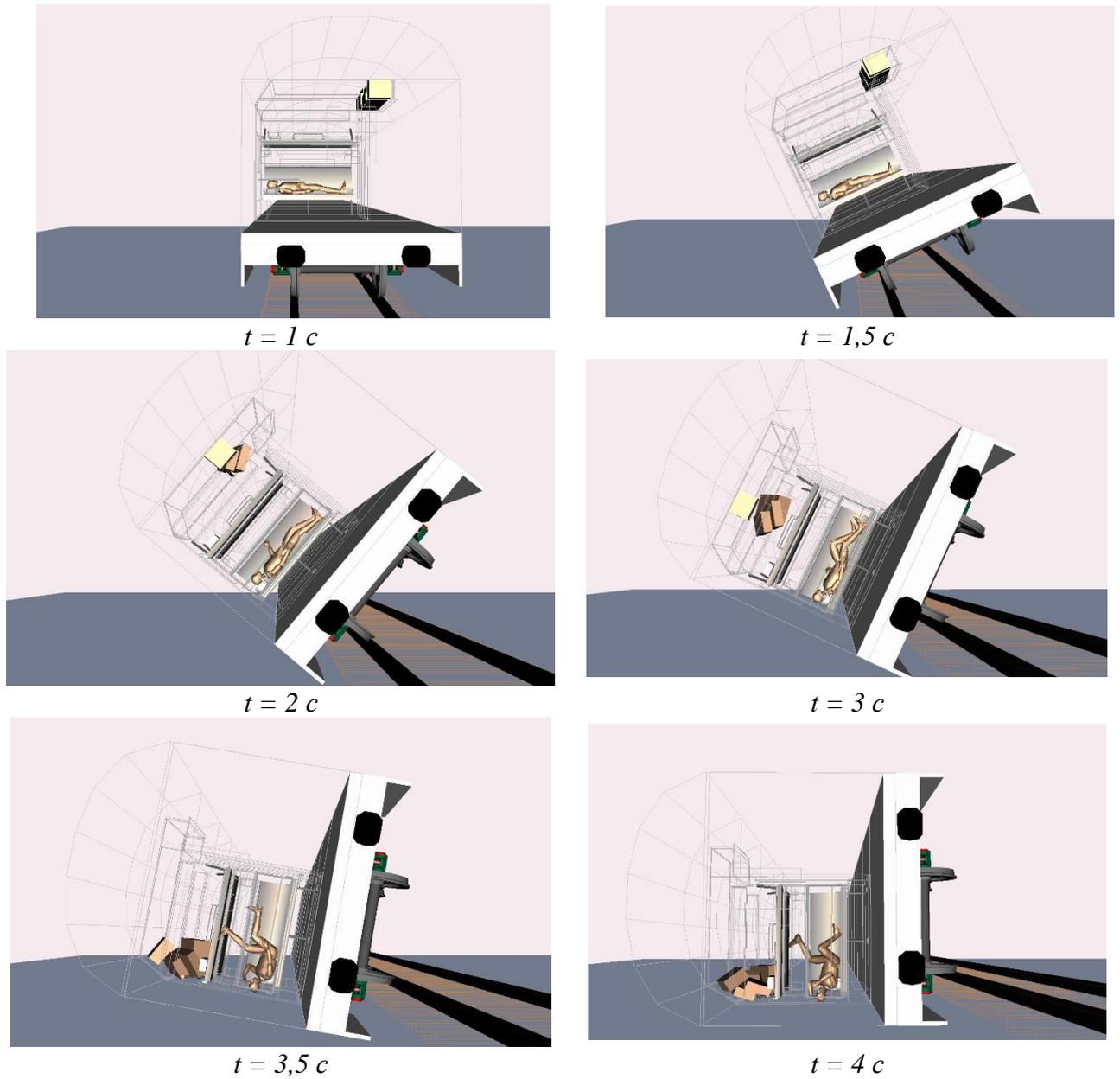


Рисунок В.3 - Кинематика движения модели манекена при моделировании опрокидывания вагона по сценарию 2 для манекена 8

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

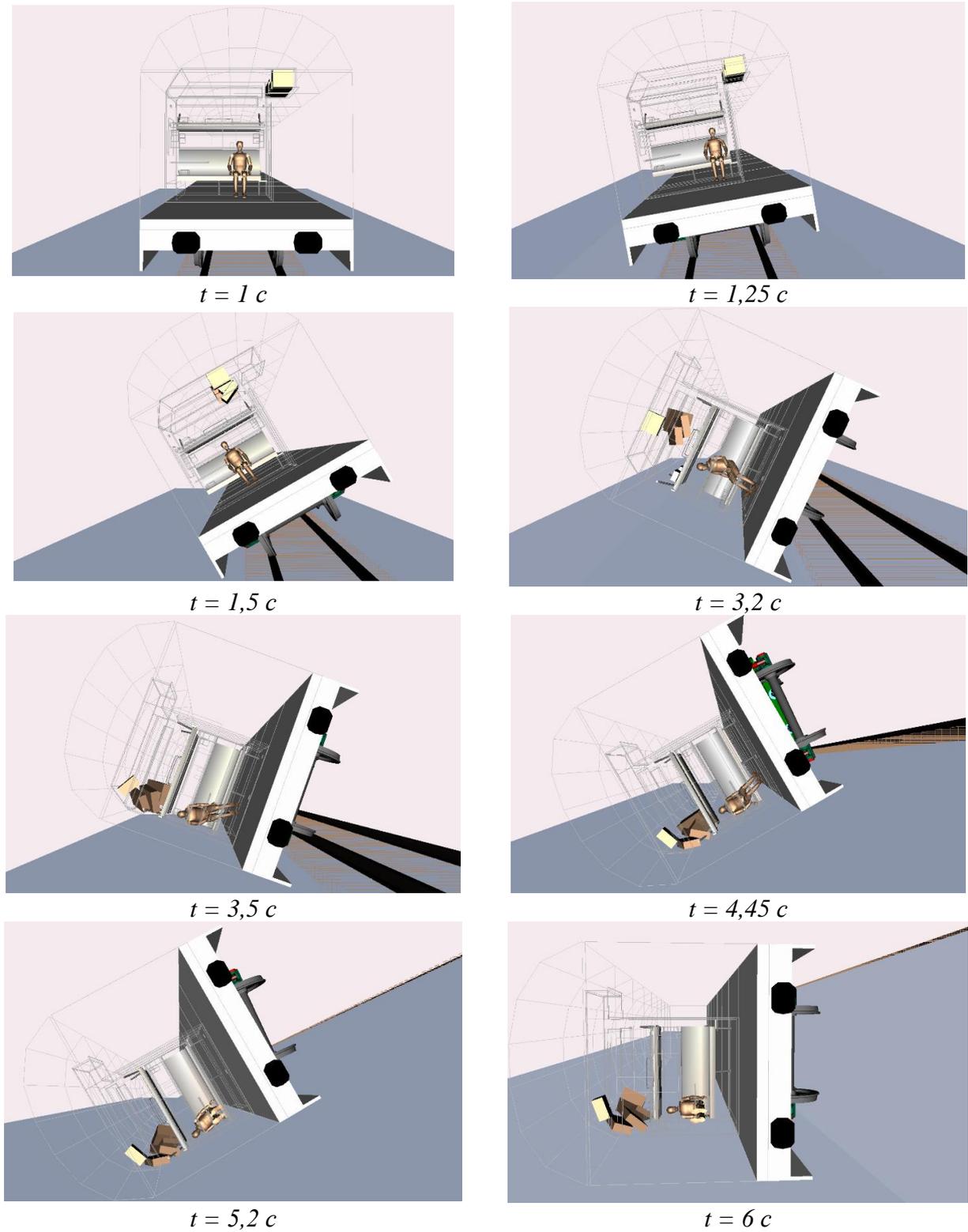


Рисунок Г.1 – Кинематика движения модели манекена при моделировании опрокидывания вагона по сценарию 4 для манекена 3

Продолжение приложения Г

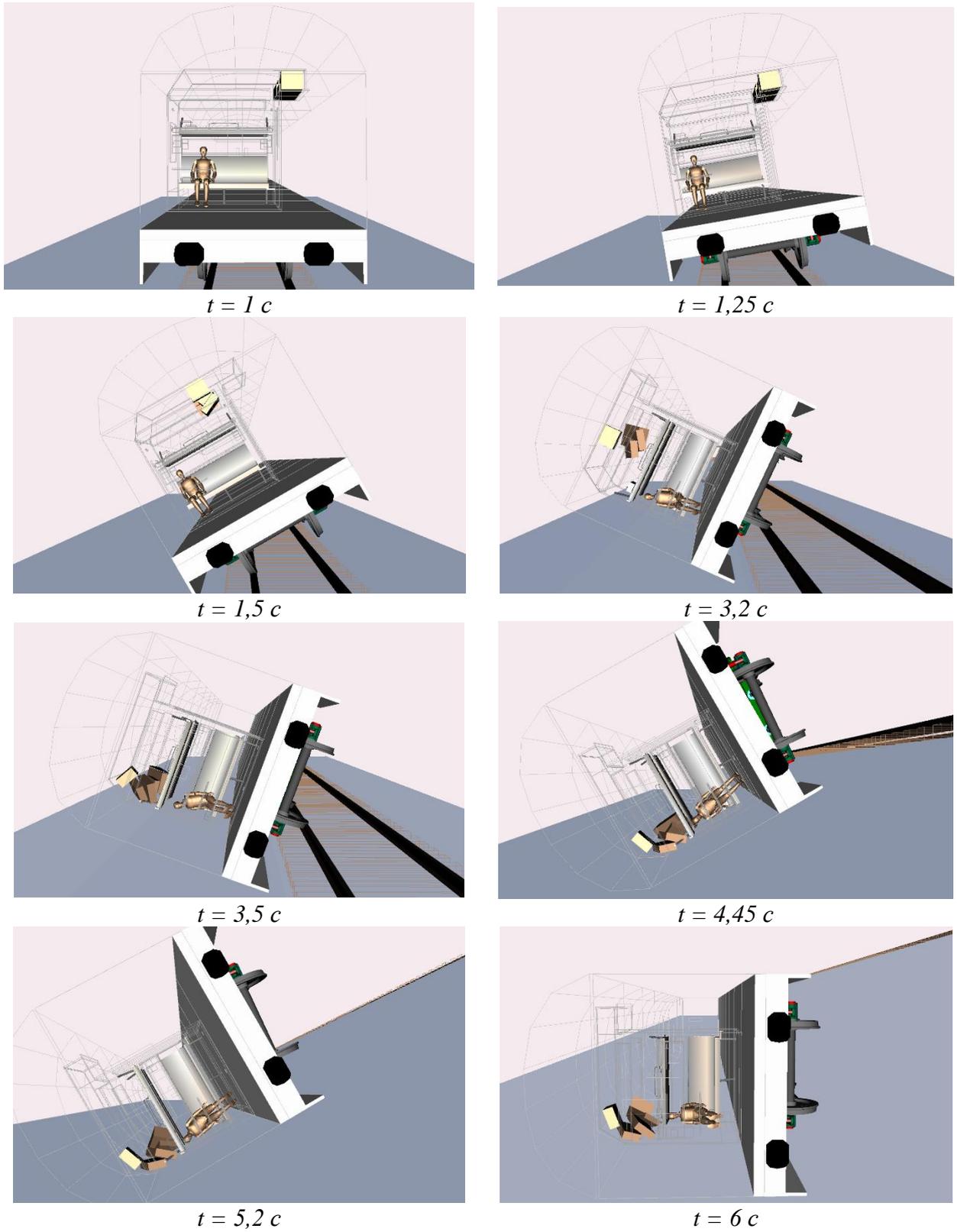


Рисунок Г.2 – Кинематика движения модели манекена при моделировании опрокидывания вагона по сценарию 4 для манекена 1

Продолжение приложения Г

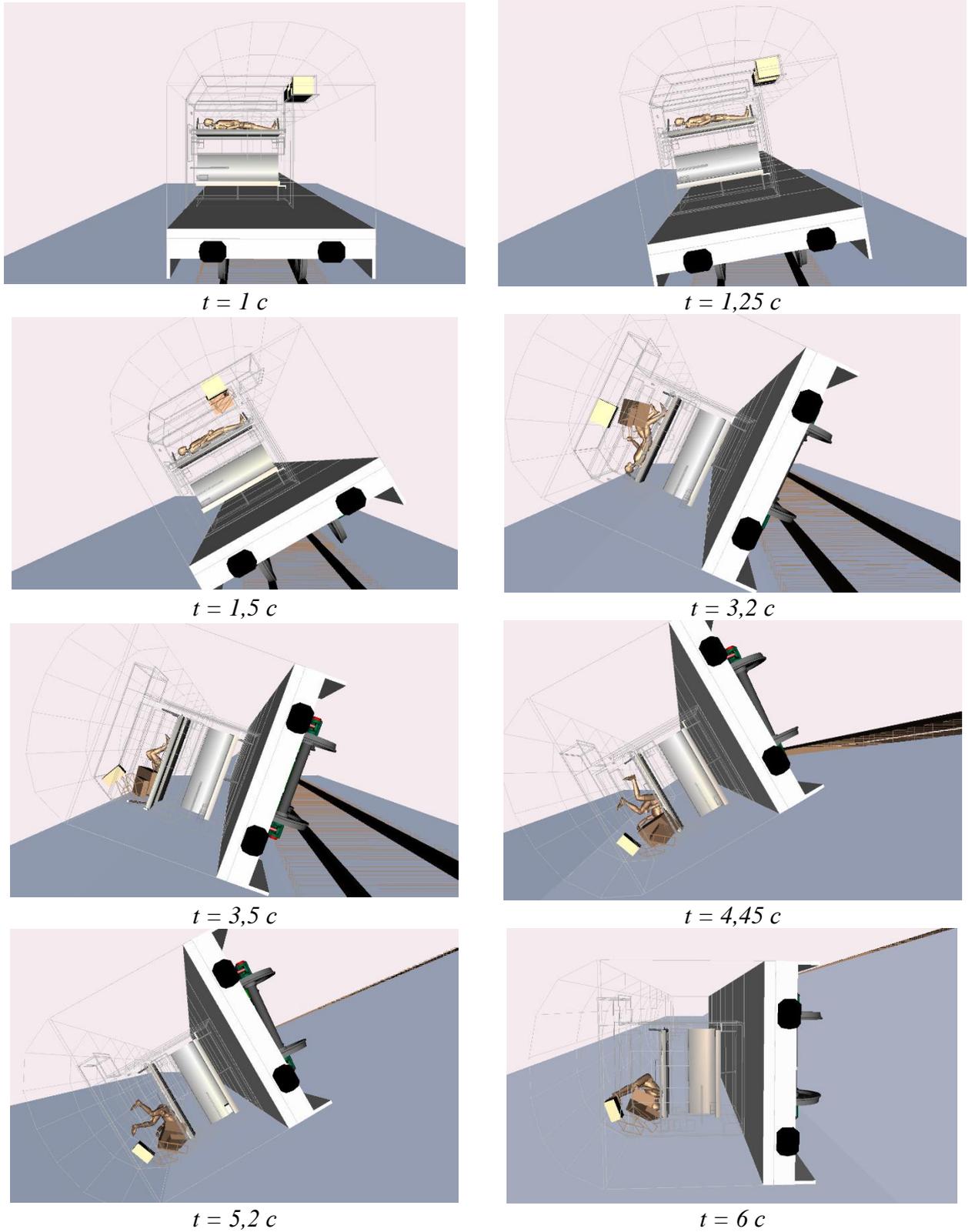


Рисунок Г.3 – Кинематика движения модели манекена при моделировании опрокидывания вагона по сценарию 4 для манекена 5

Продолжение приложения Г

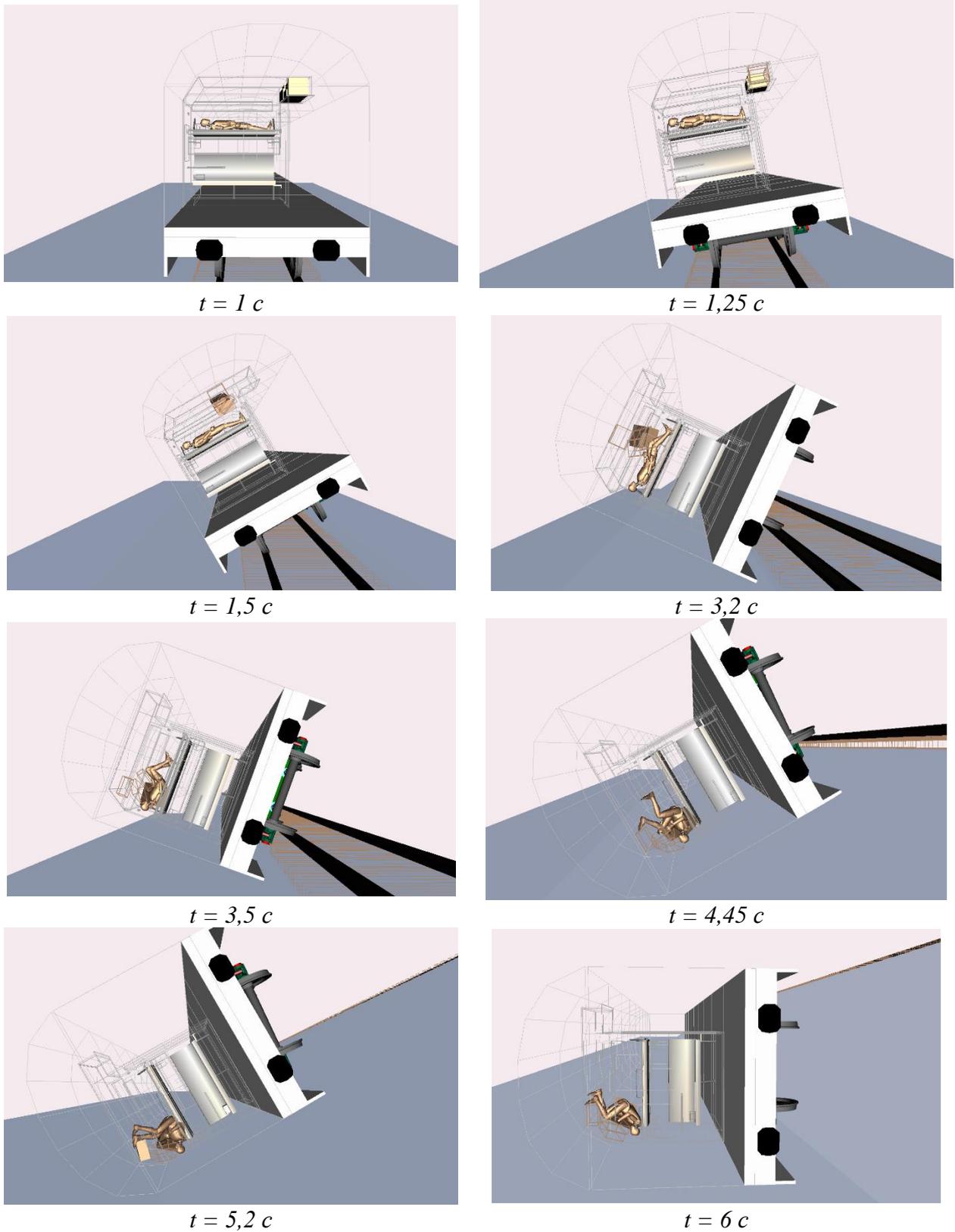


Рисунок Г.4 – Кинематика движения модели манекена при моделировании опрокидывания вагона по сценарию 4 для манекена 6

Продолжение приложения Г

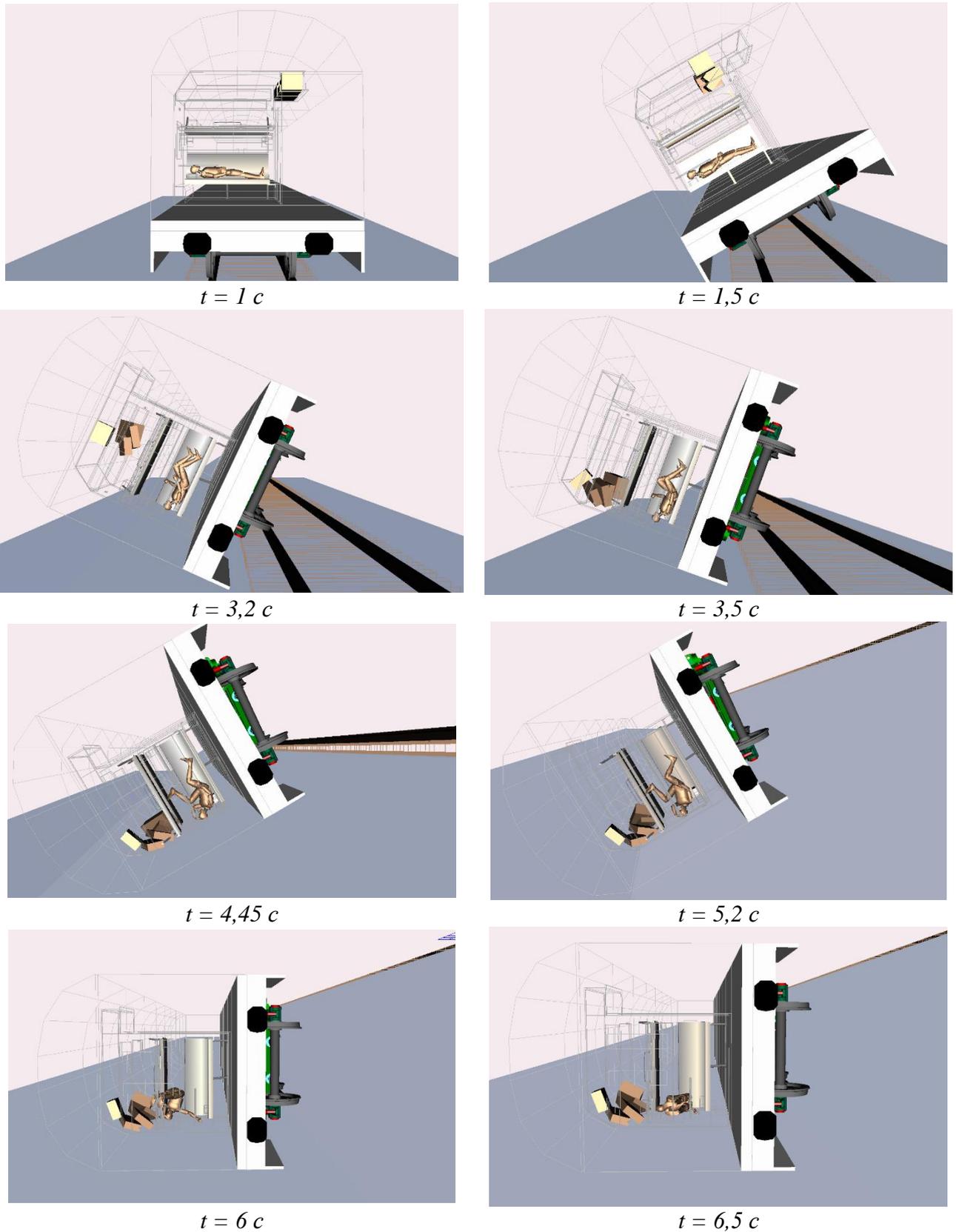


Рисунок Г.5 – Кинематика движения модели манекена при моделировании опрокидывания вагона по сценарию 4 для манекена 7

Продолжение приложения Г

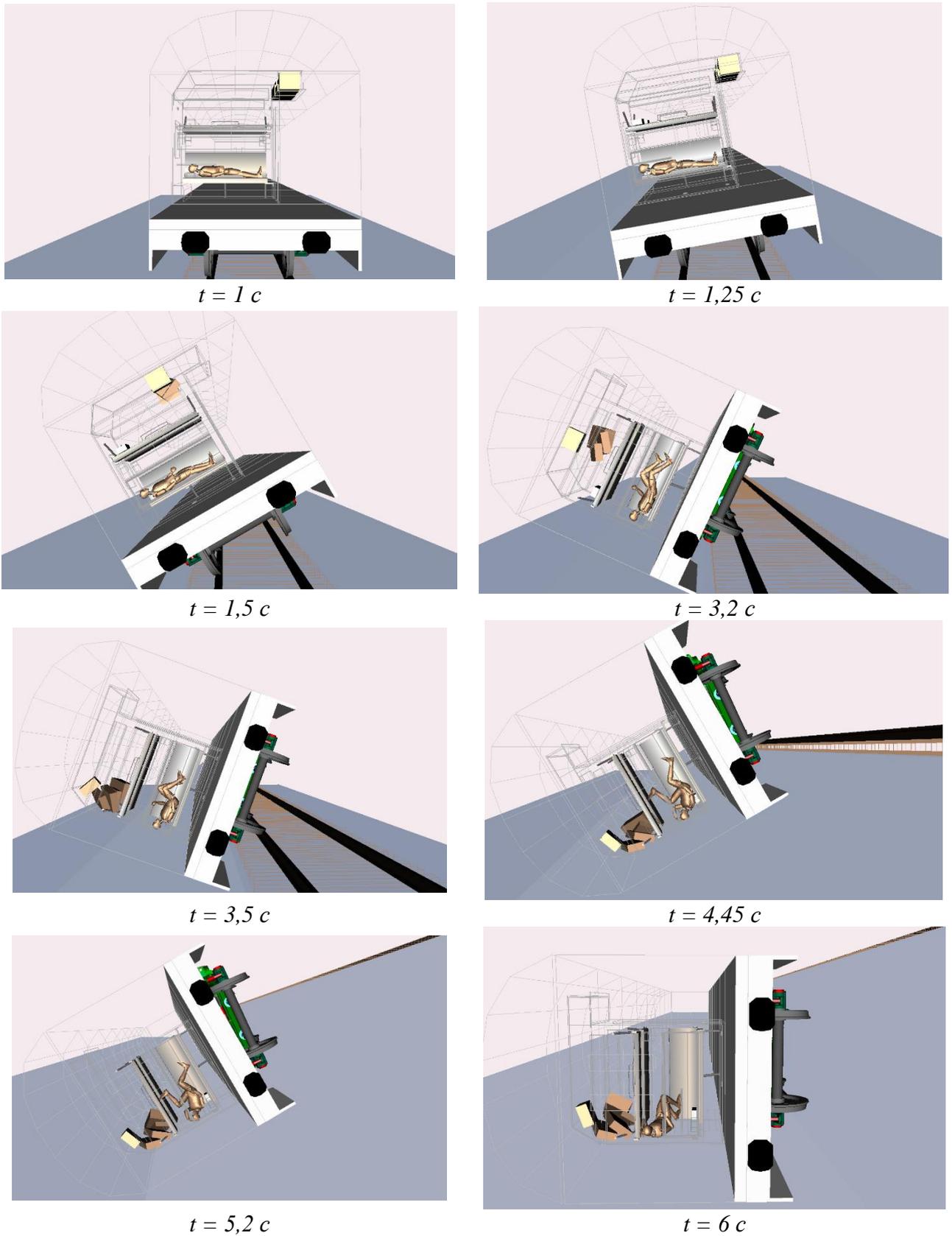


Рисунок Г.6 – Кинематика движения модели манекена при моделировании опрокидывания вагона по сценарию 4 для манекена 8

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Динамические воздействия на модель манекена при опрокидывании вагона
на боковую сторону 1 по сценарию 1

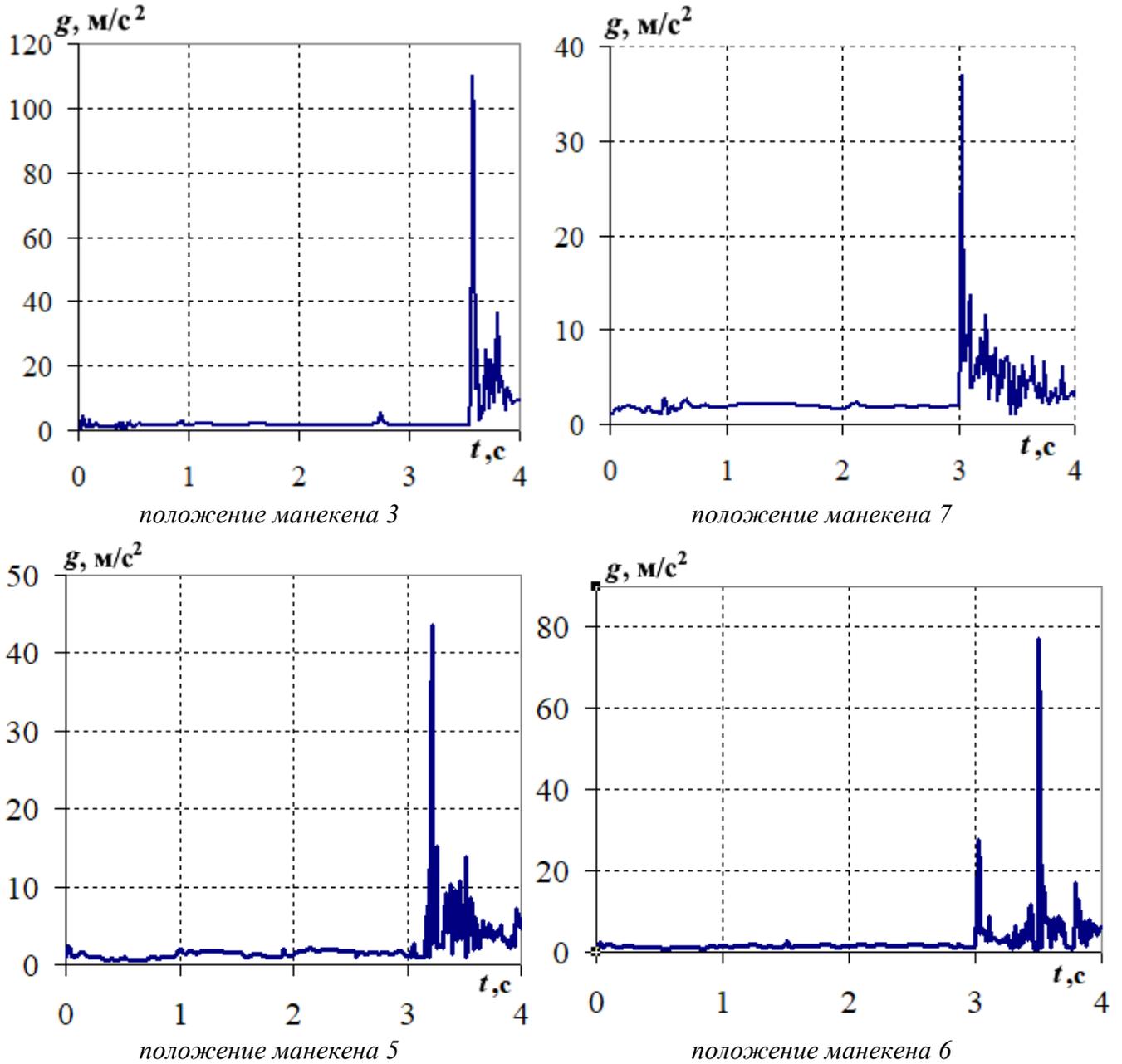


Рисунок Д.1 – Ускорение головы модели манекена

Продолжение приложения Д

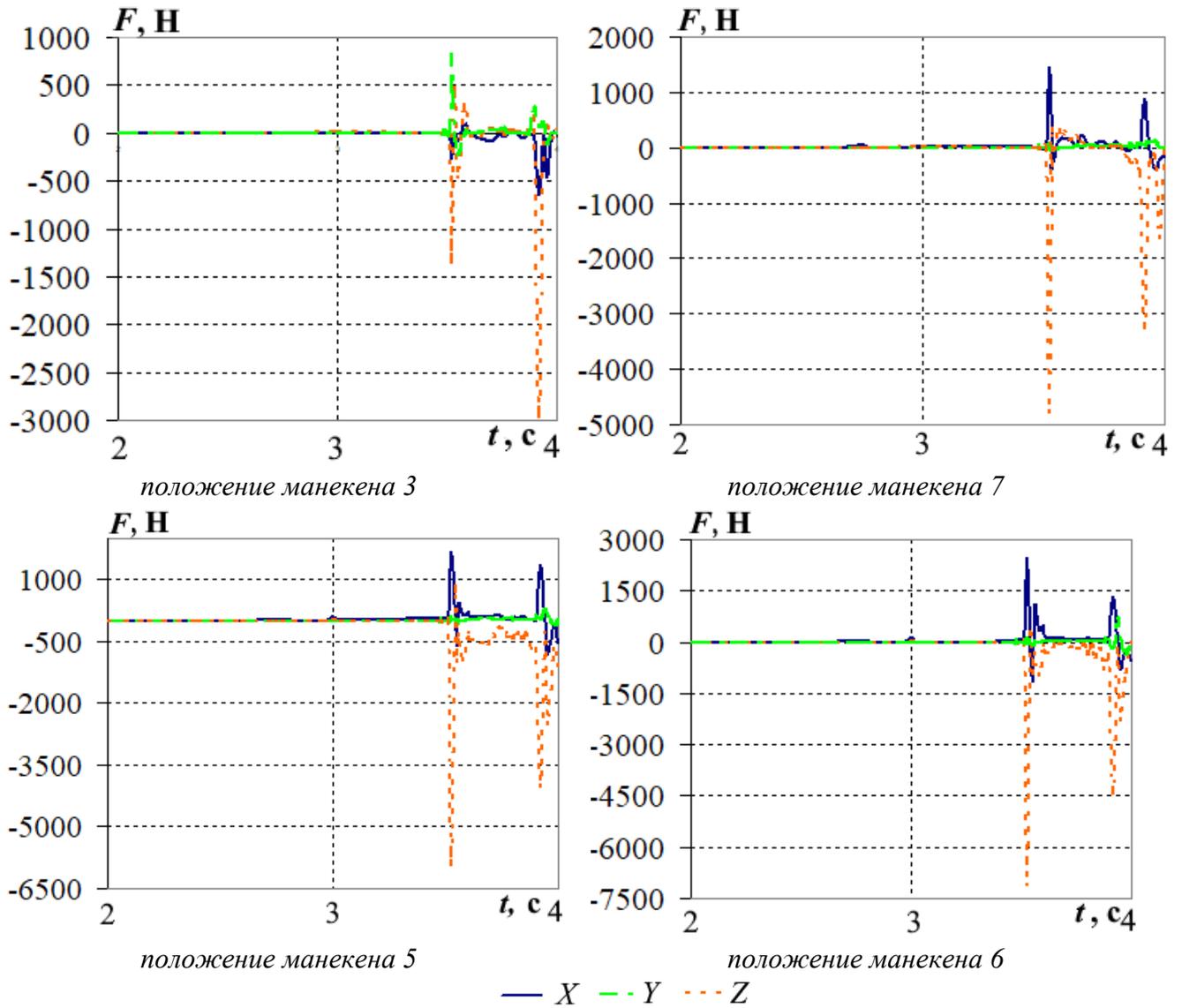


Рисунок Д.2 – Сила, действующая на шейный отдел модели манекена

Продолжение приложения Д

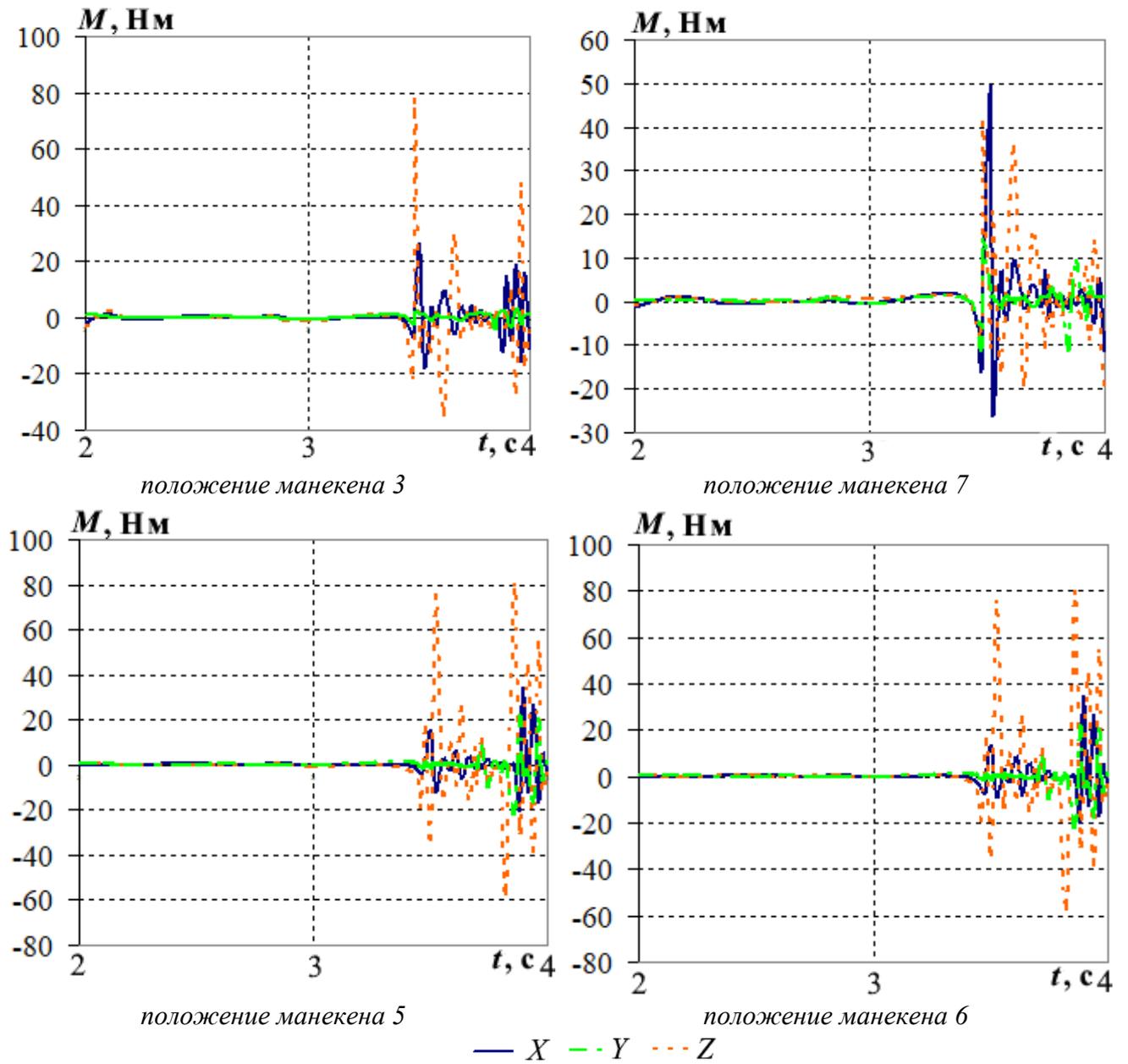


Рисунок Д.3 – Момент, действующий на шейный отдел модели манекена

Продолжение приложения Д

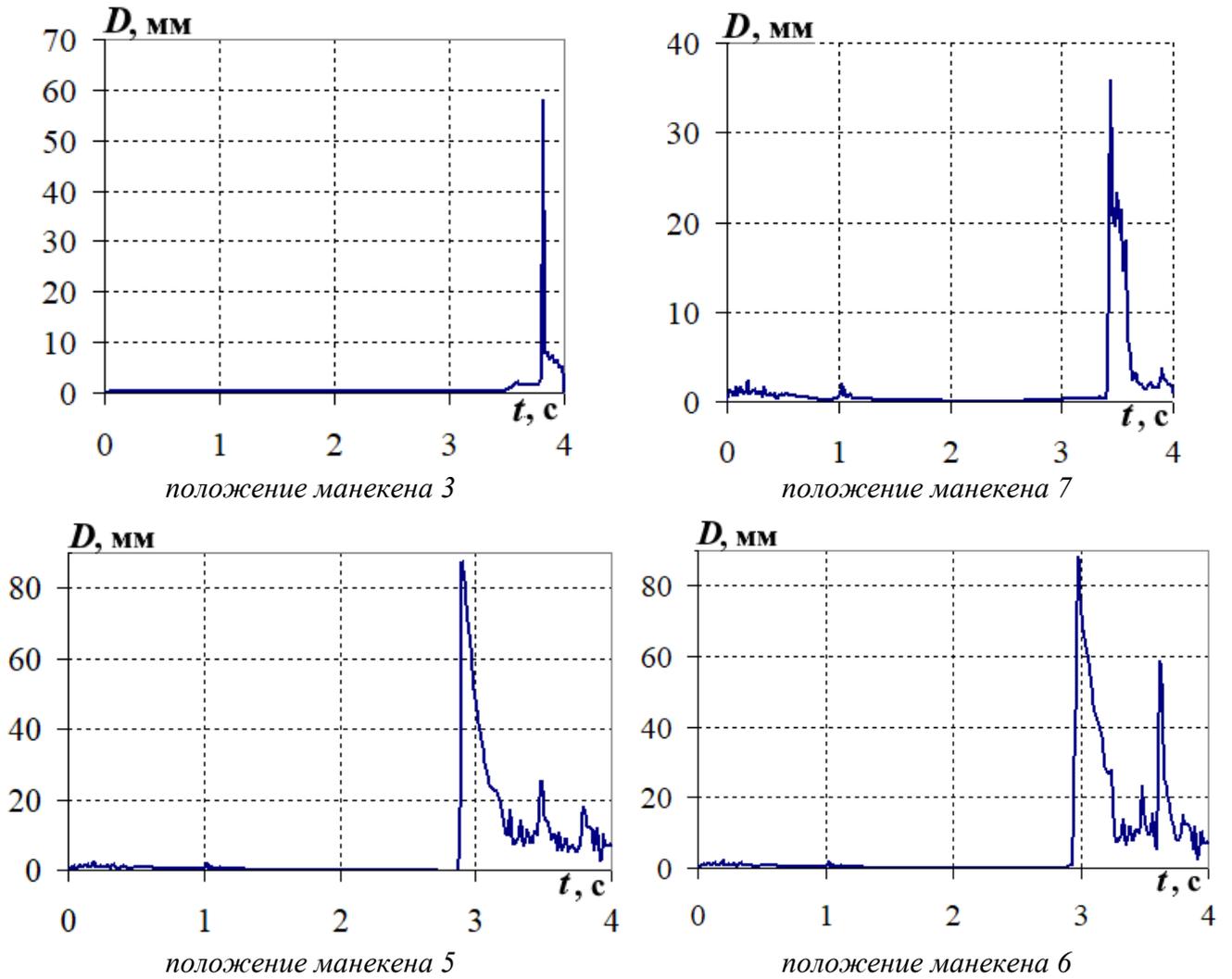


Рисунок Д.4 – Деформация грудного отдела модели манекена

Продолжение приложения Д

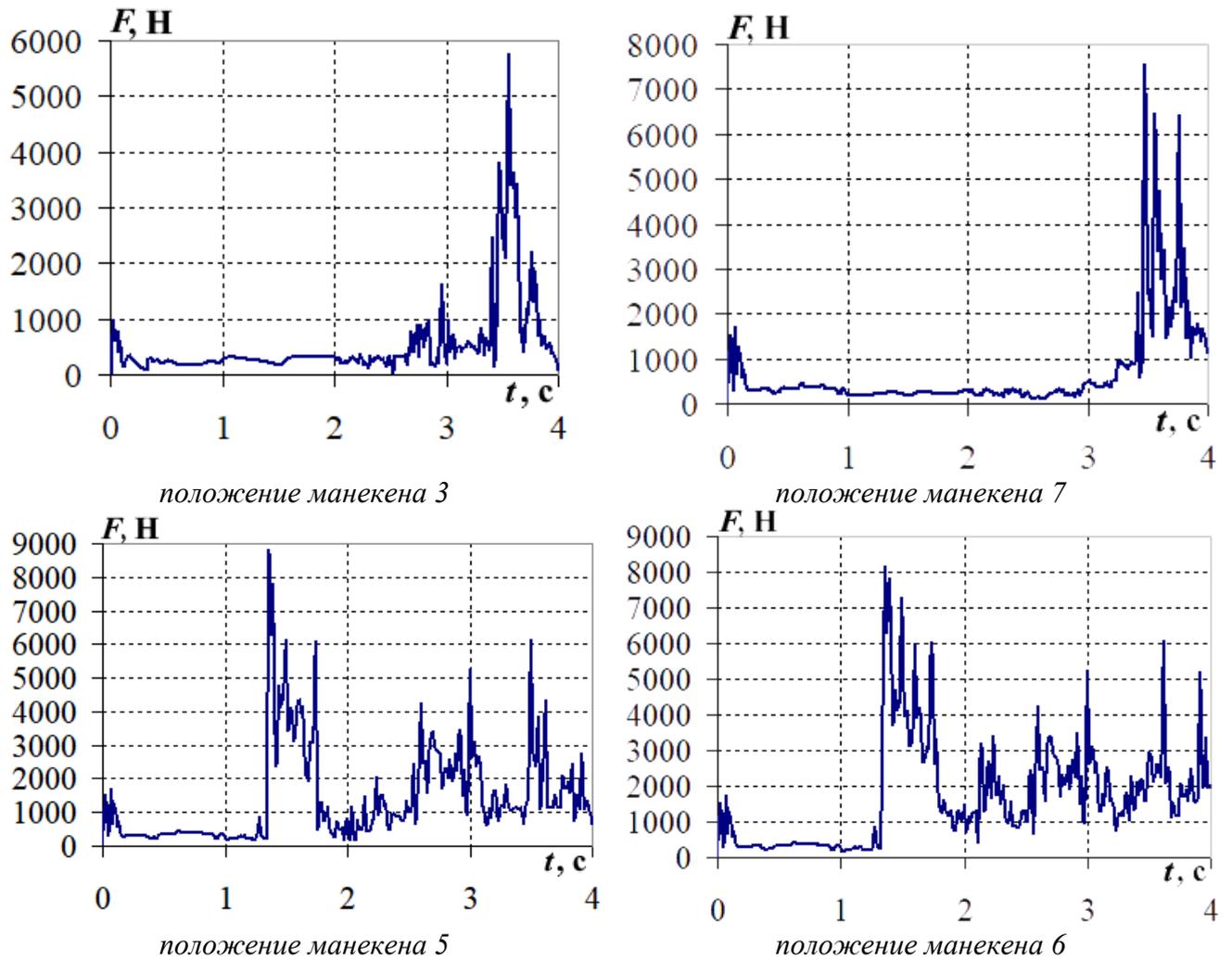


Рисунок Д.5 – Сжимающее усилие, действующее на бедро модели манекена

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Динамические воздействия на модель манекена при опрокидывании на боковую сторону с купе вагона по сценарию 3

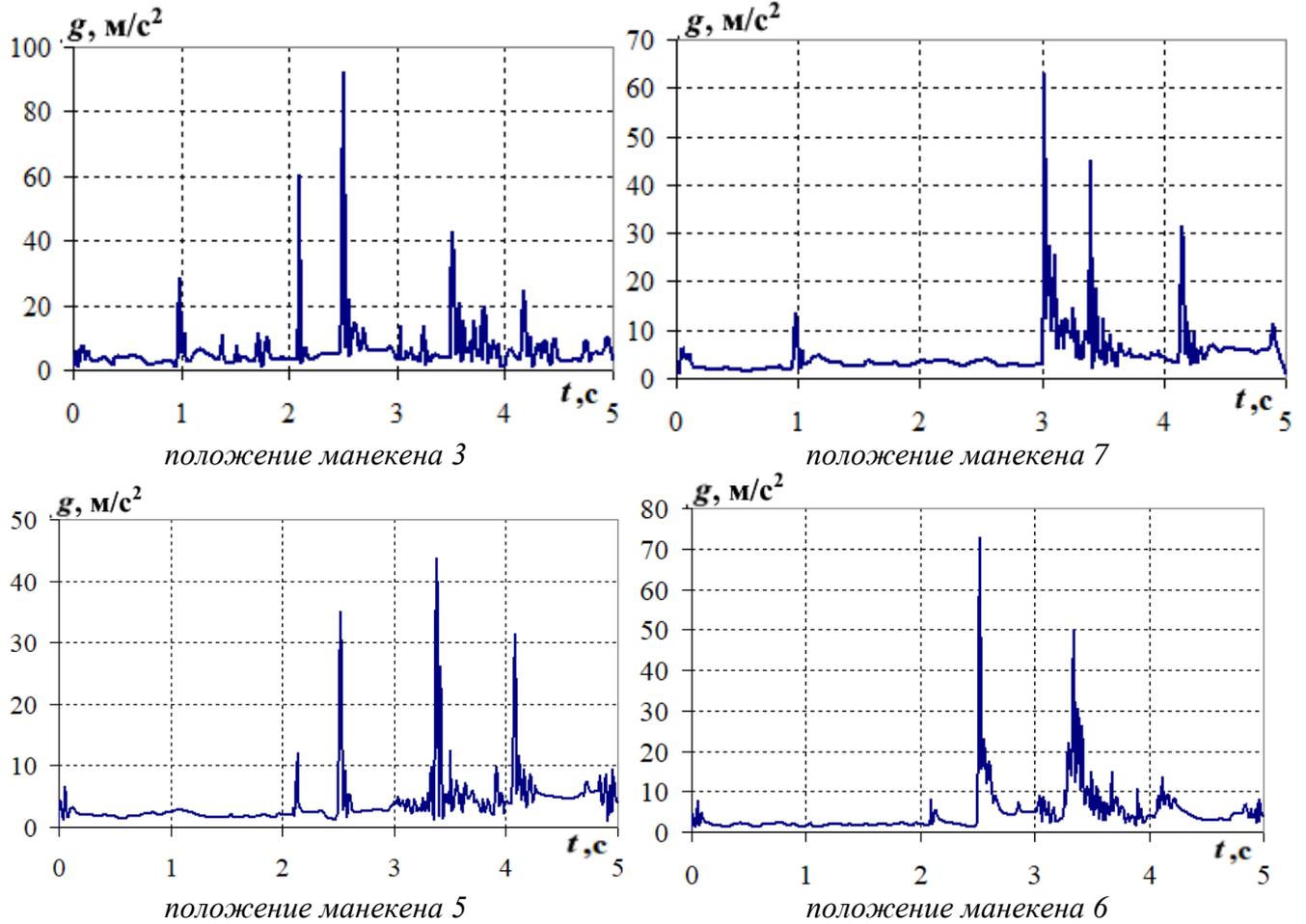


Рисунок Е.1 – Ускорения головы модели манекена

Продолжение приложения Е

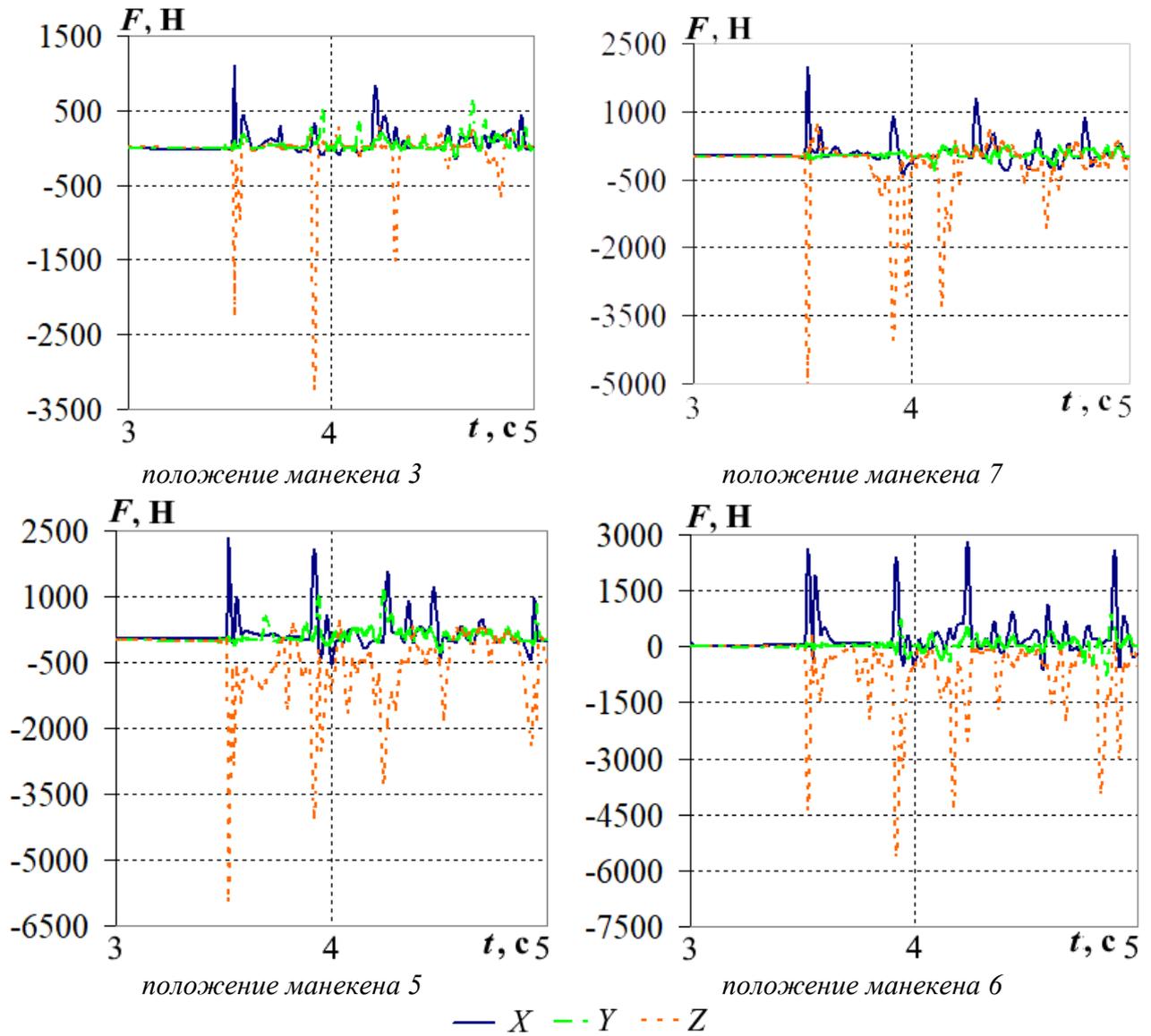


Рисунок Е.2 – Сила, действующая на шейный отдел модели манекена

Продолжение приложения Е

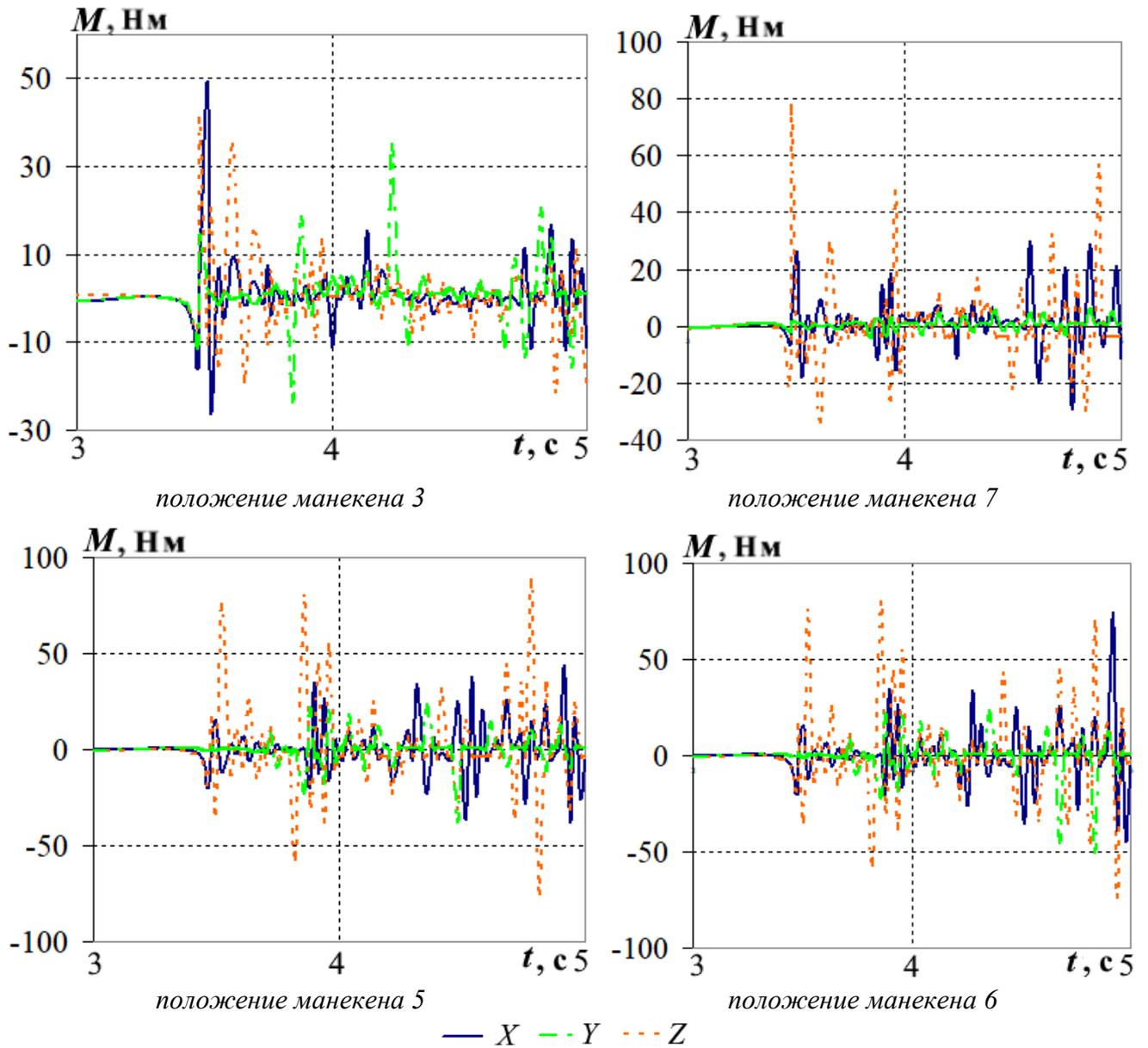


Рисунок Е.3 – Момент, действующий на шейный отдел модели манекена

Продолжение приложения Е

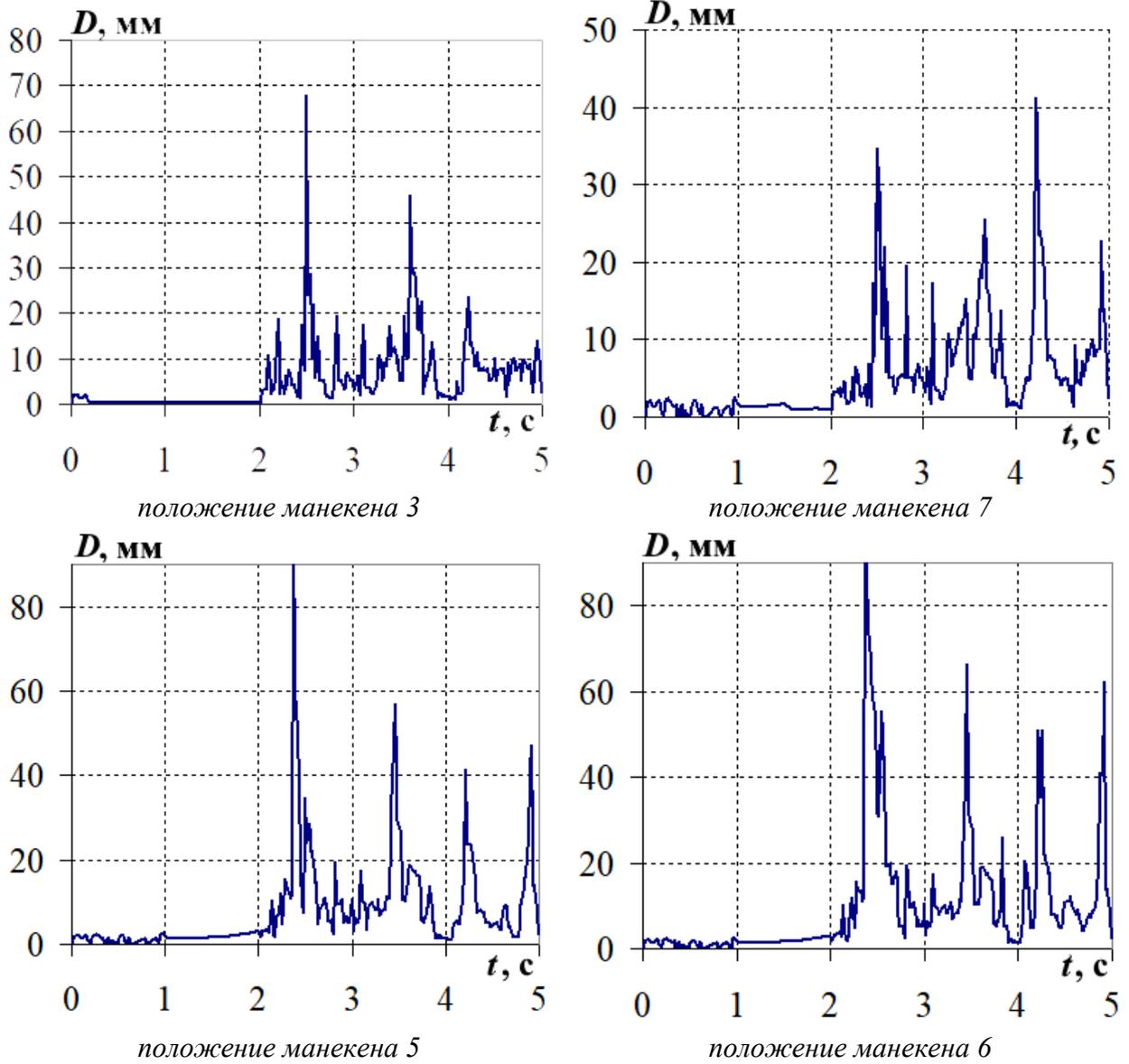


Рисунок Е.4 – Деформация грудного отдела модели манекена при опрокидывании

Продолжение приложения Е

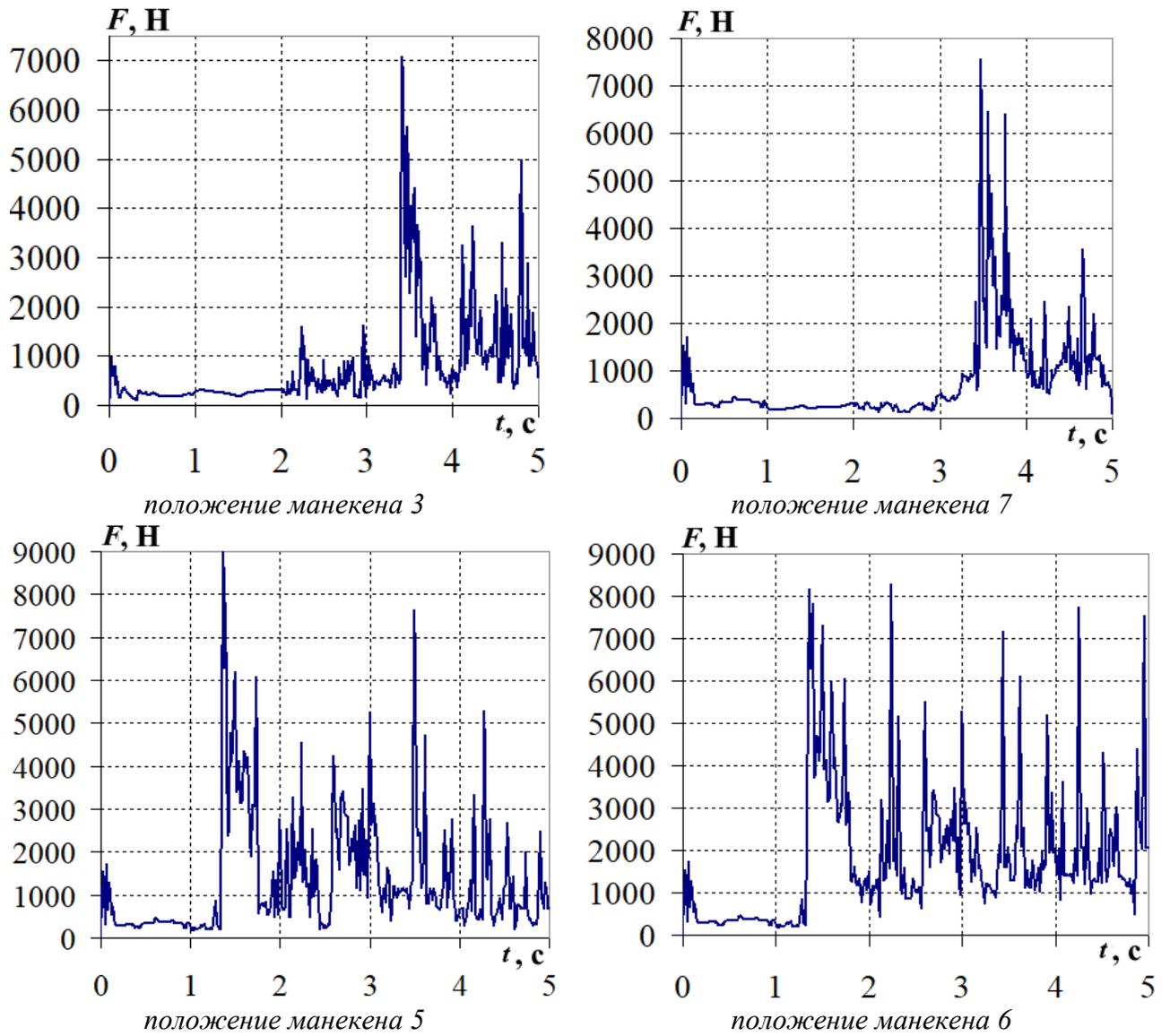


Рисунок Е.5 – Сжимающее усилие, действующее на бедро модели манекена

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Динамические воздействия на модель манекена при опрокидывании вагона на боковую сторону 2 по сценарию 1

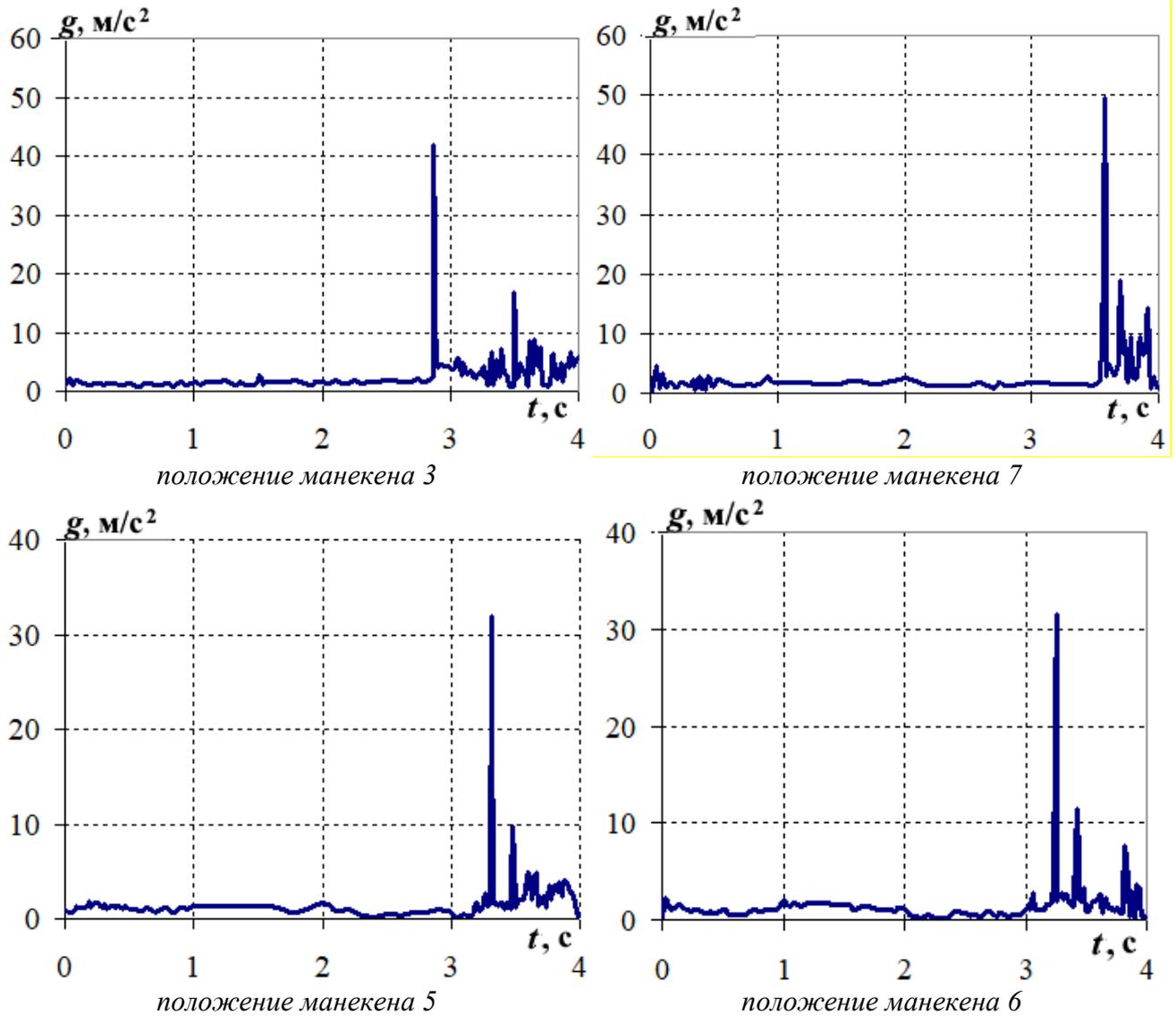


Рисунок Ж.1 – Ускорение головы модели манекена

Продолжение приложения Ж

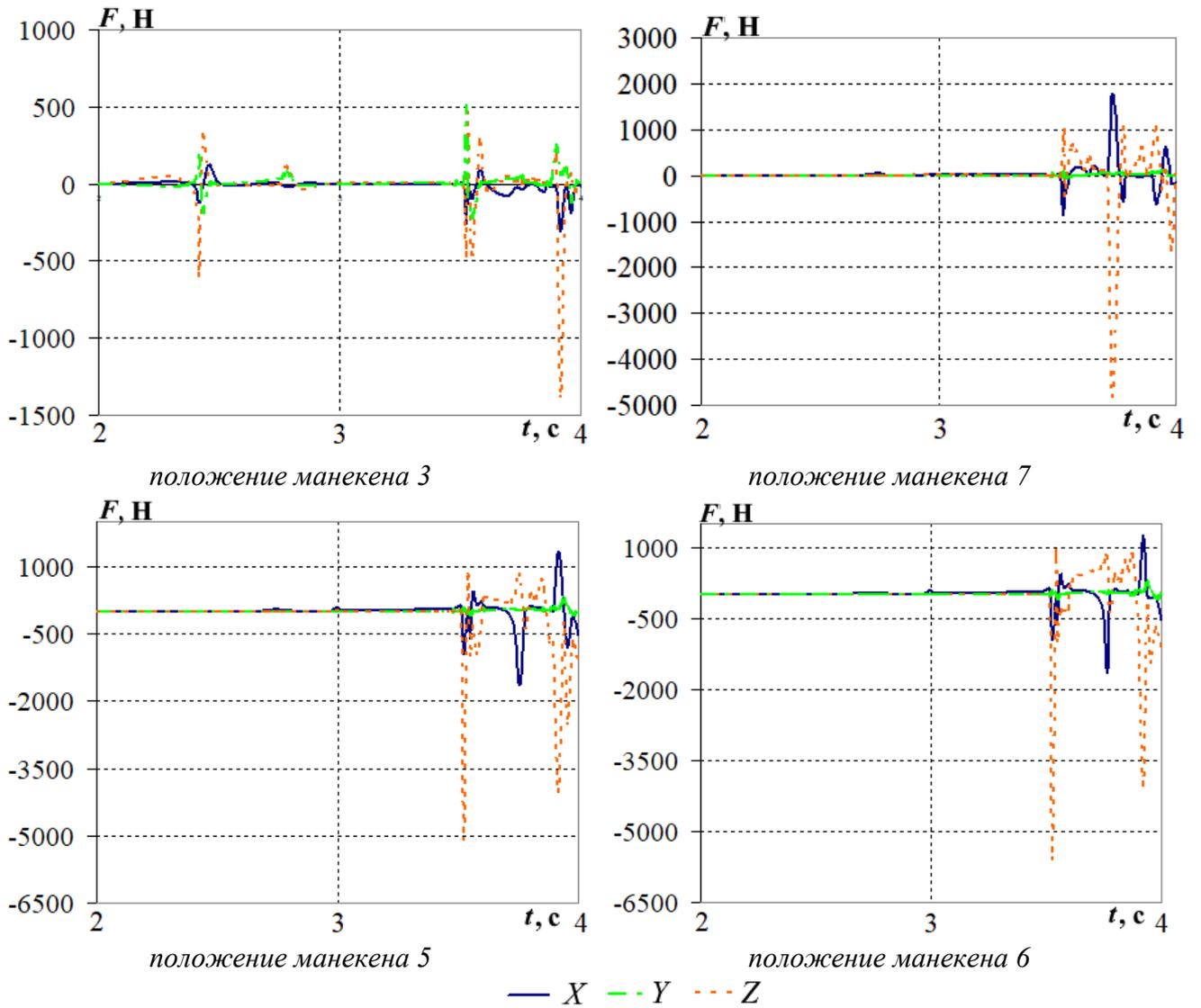


Рисунок Ж.2 – Сила, действующая на шейный отдел модели манекена

Продолжение приложения Ж

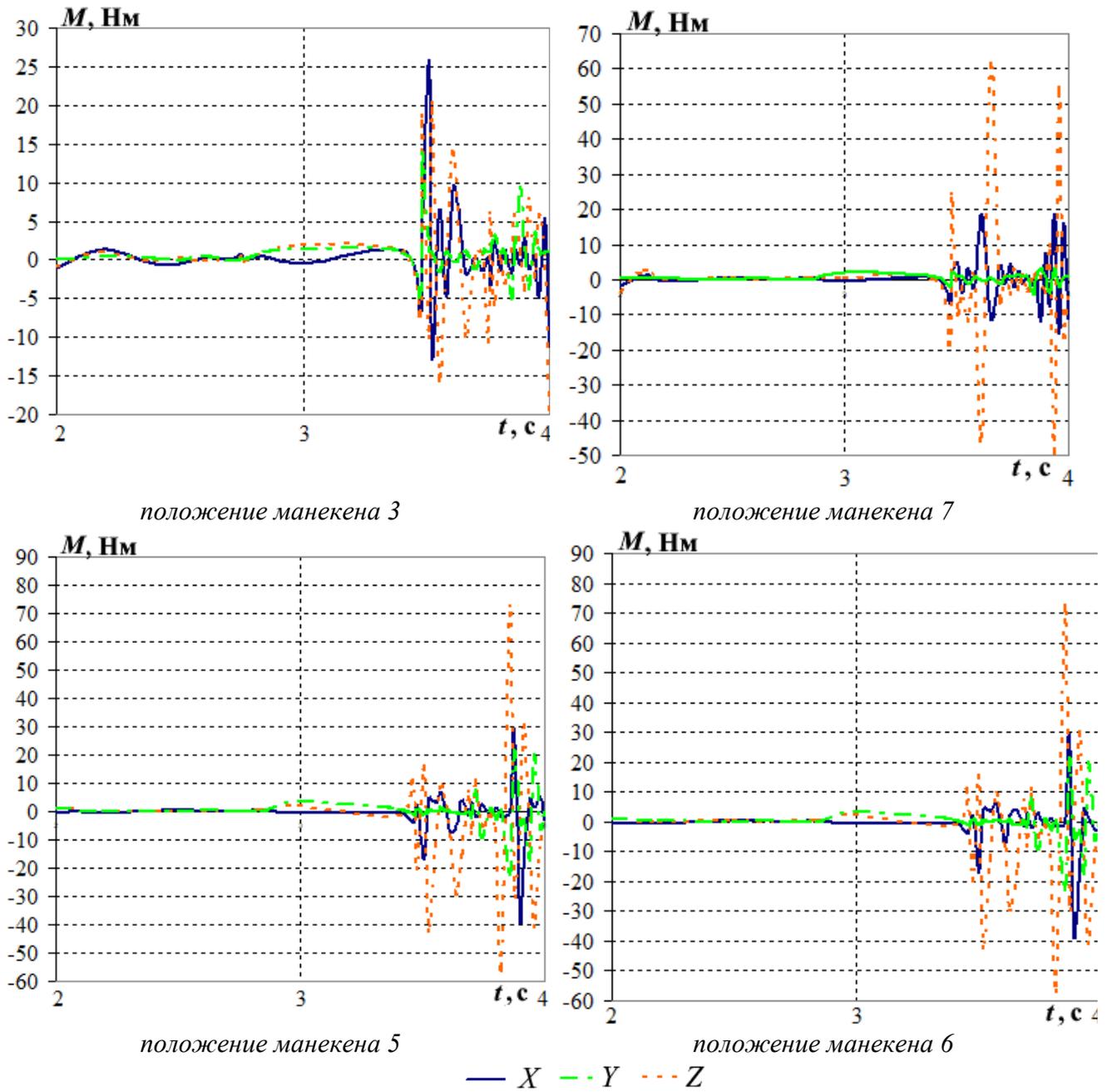


Рисунок Ж.3 – Момент, действующий на шейный отдел модели манекена

Продолжение приложения Ж

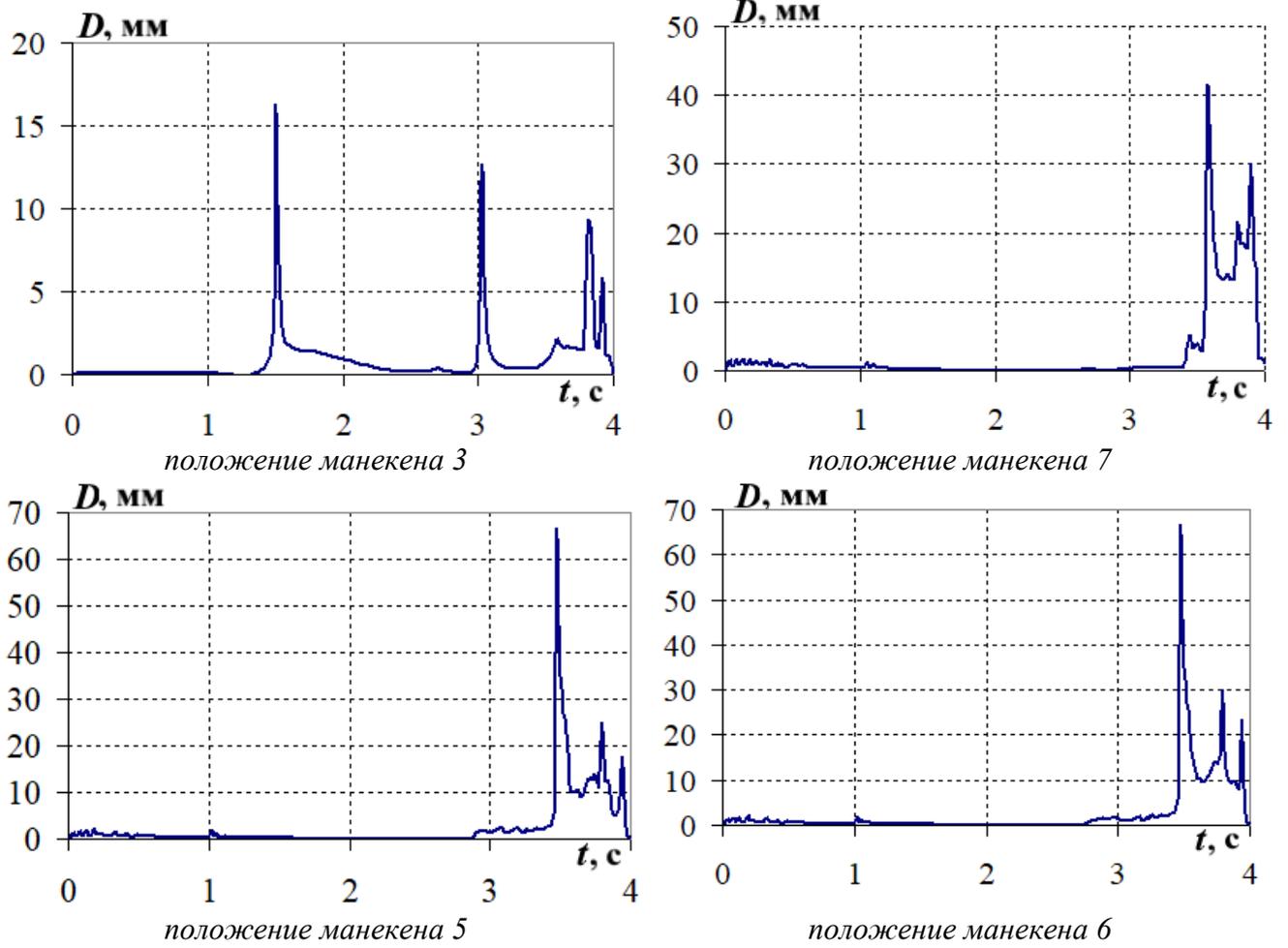


Рисунок Ж.4 – Деформация грудного отдела модели манекена

Продолжение приложения Ж

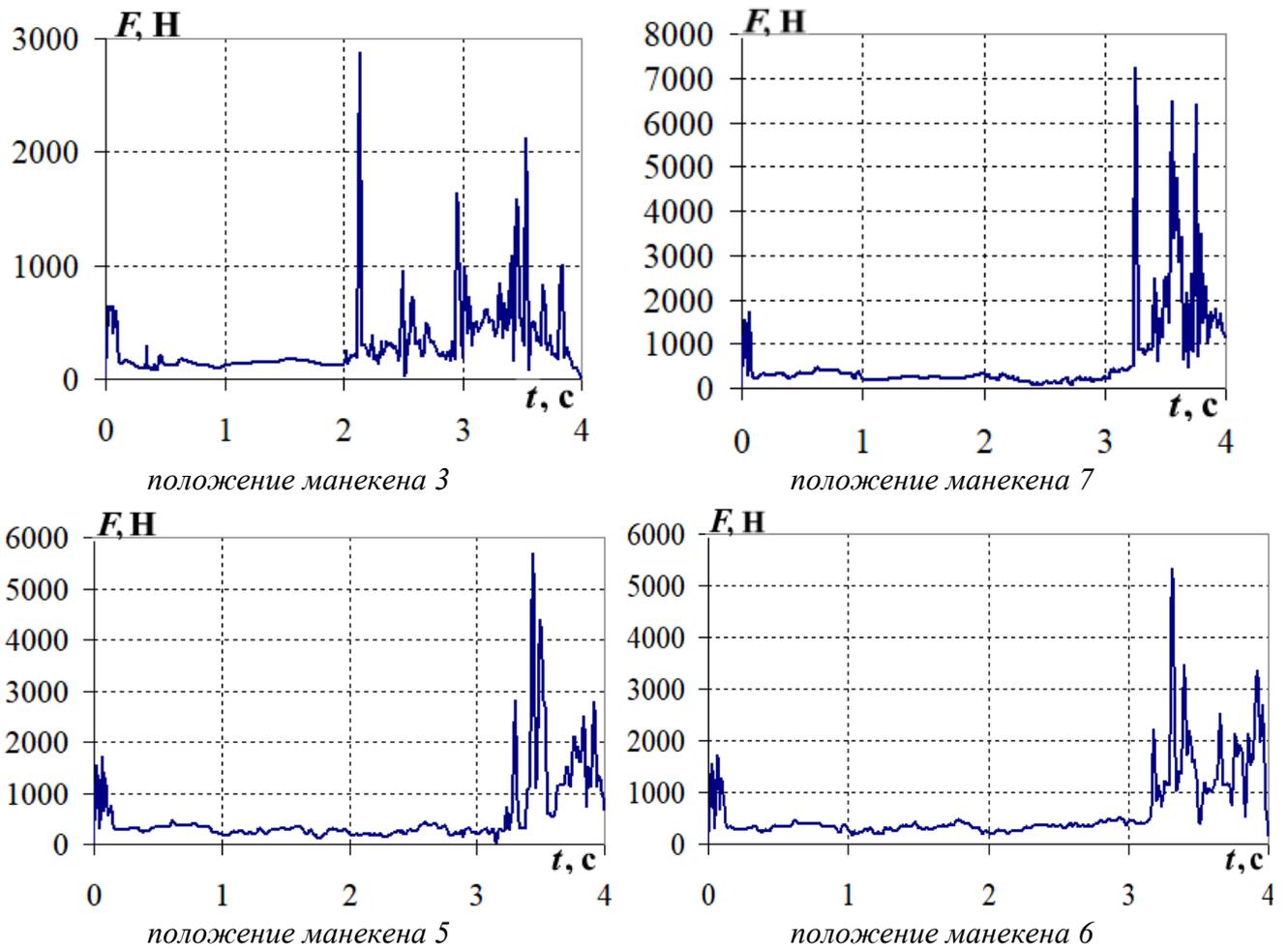


Рисунок Ж.5 – Сжимающее усилие, действующее на бедро модели манекена

ПРИЛОЖЕНИЕ И

Динамические воздействия на модель манекена при опрокидывании вагона на боковую сторону 2 по сценарию 3

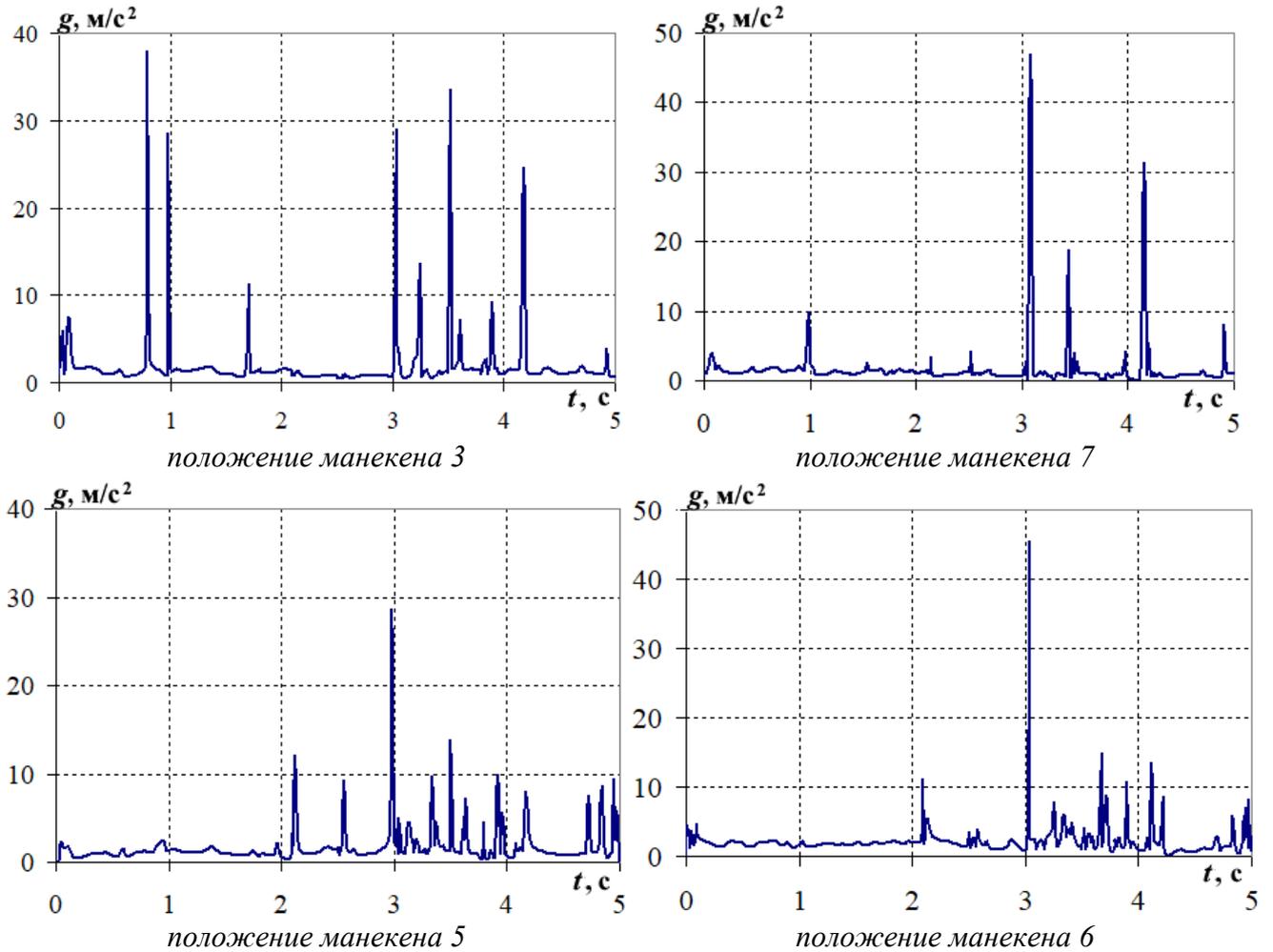


Рисунок И.1 – Ускорение головы манекена

Продолжение приложения И

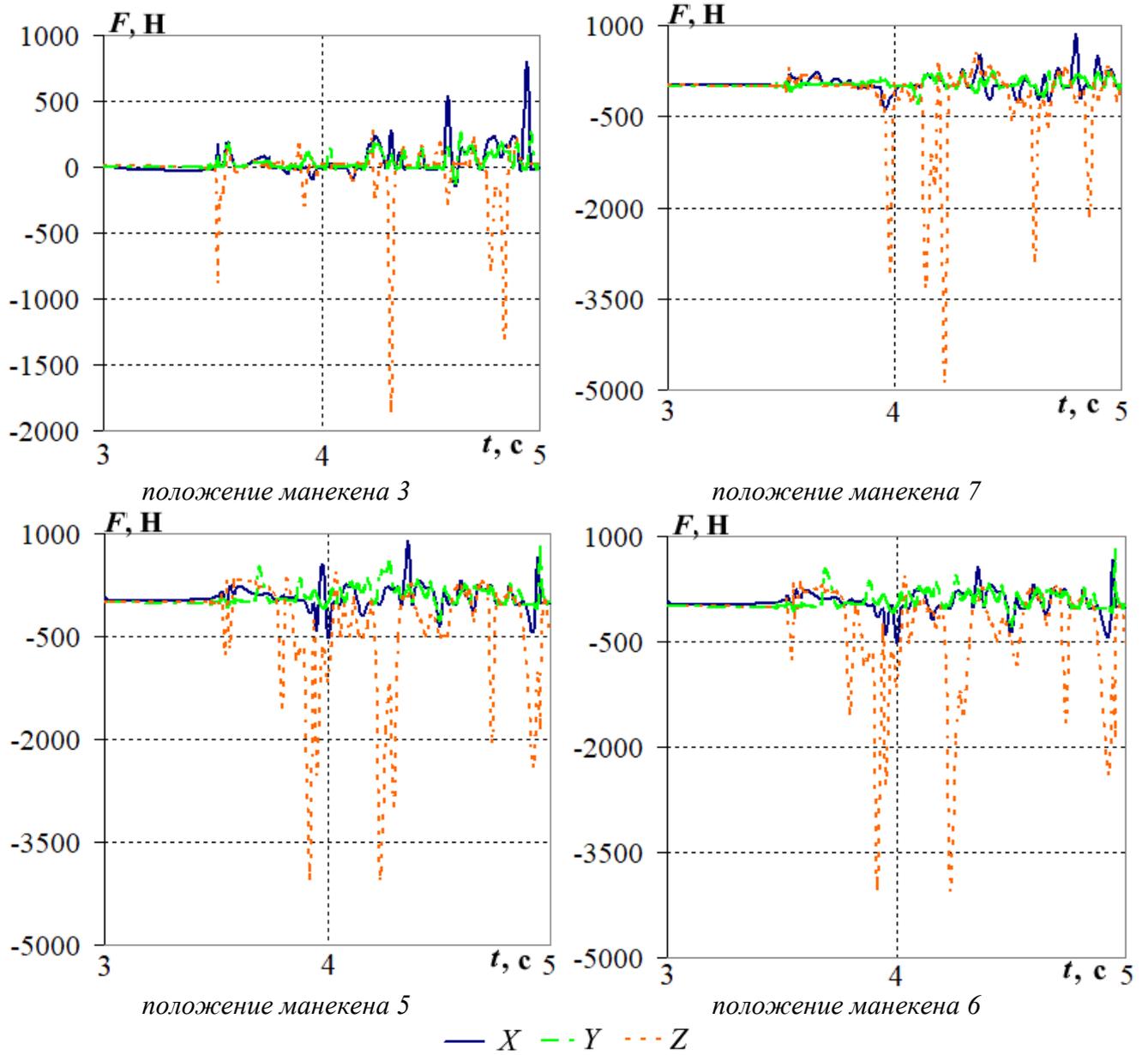


Рисунок И.2 – Сила, действующая на шейный отдел модели манекена

Продолжение приложения И

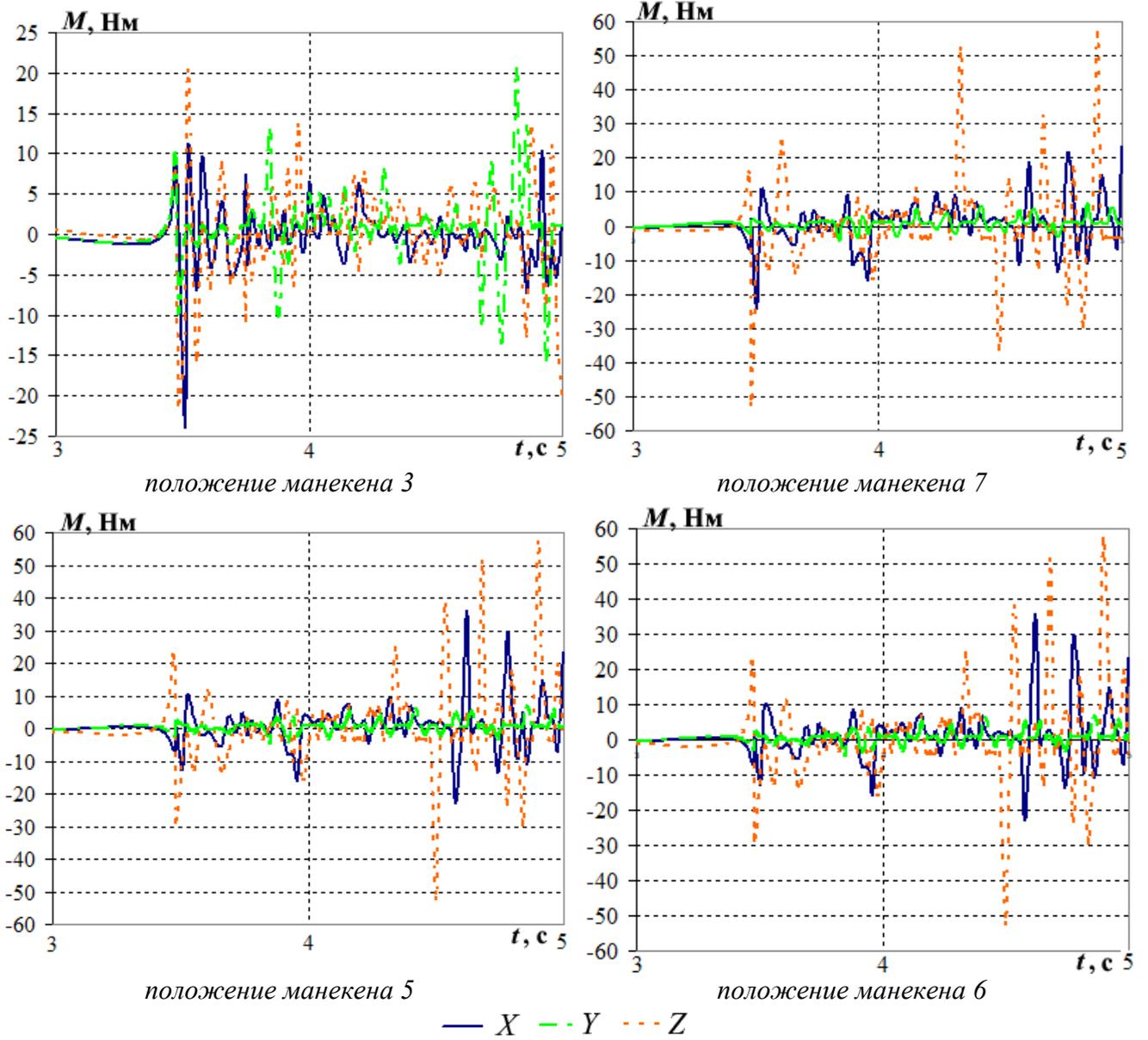


Рисунок И.3 – Момент, действующий на шейный отдел модели манекена

Продолжение приложения И

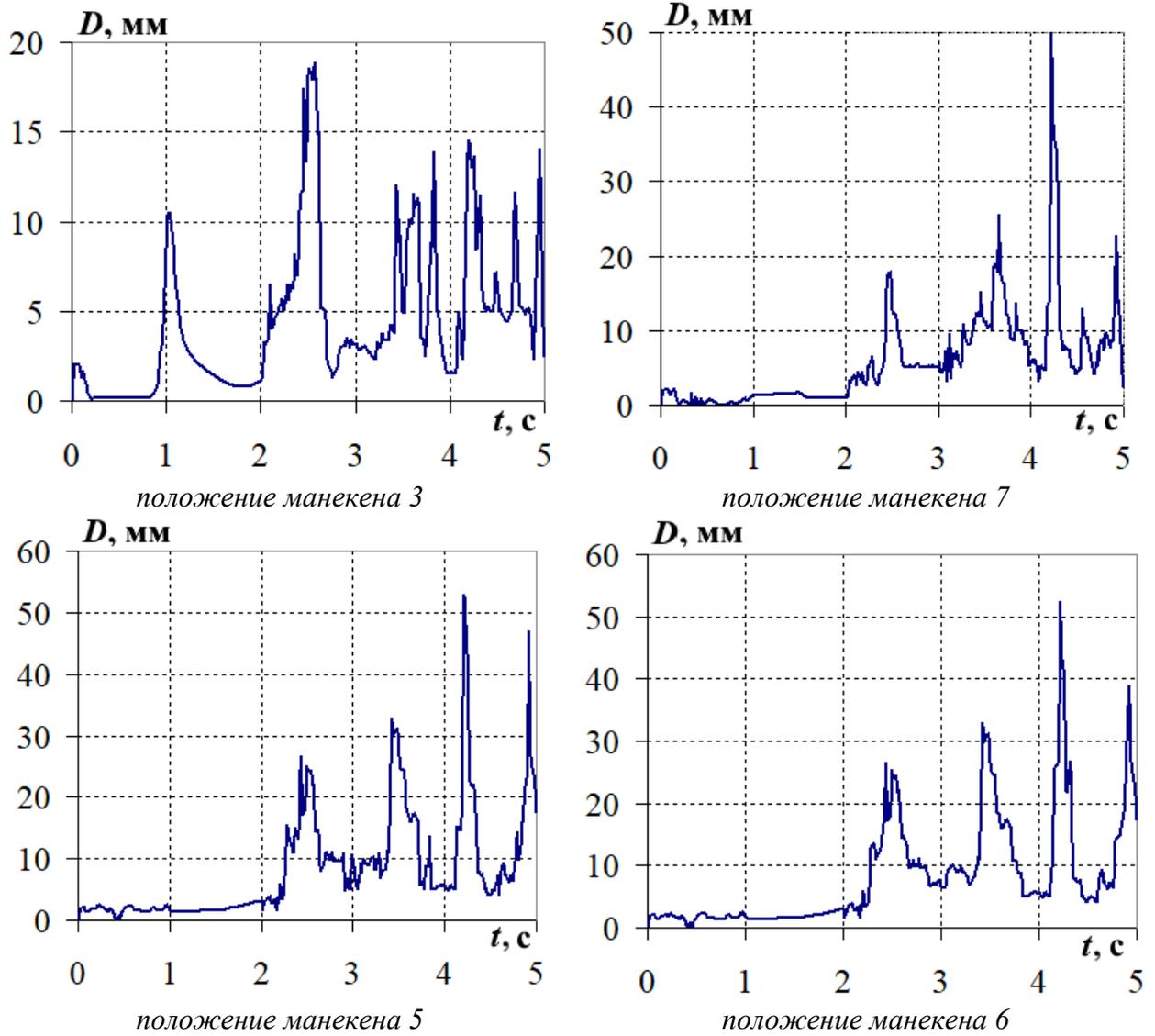


Рисунок И.4 – Деформация грудного отдела модели манекена

Продолжение приложения И

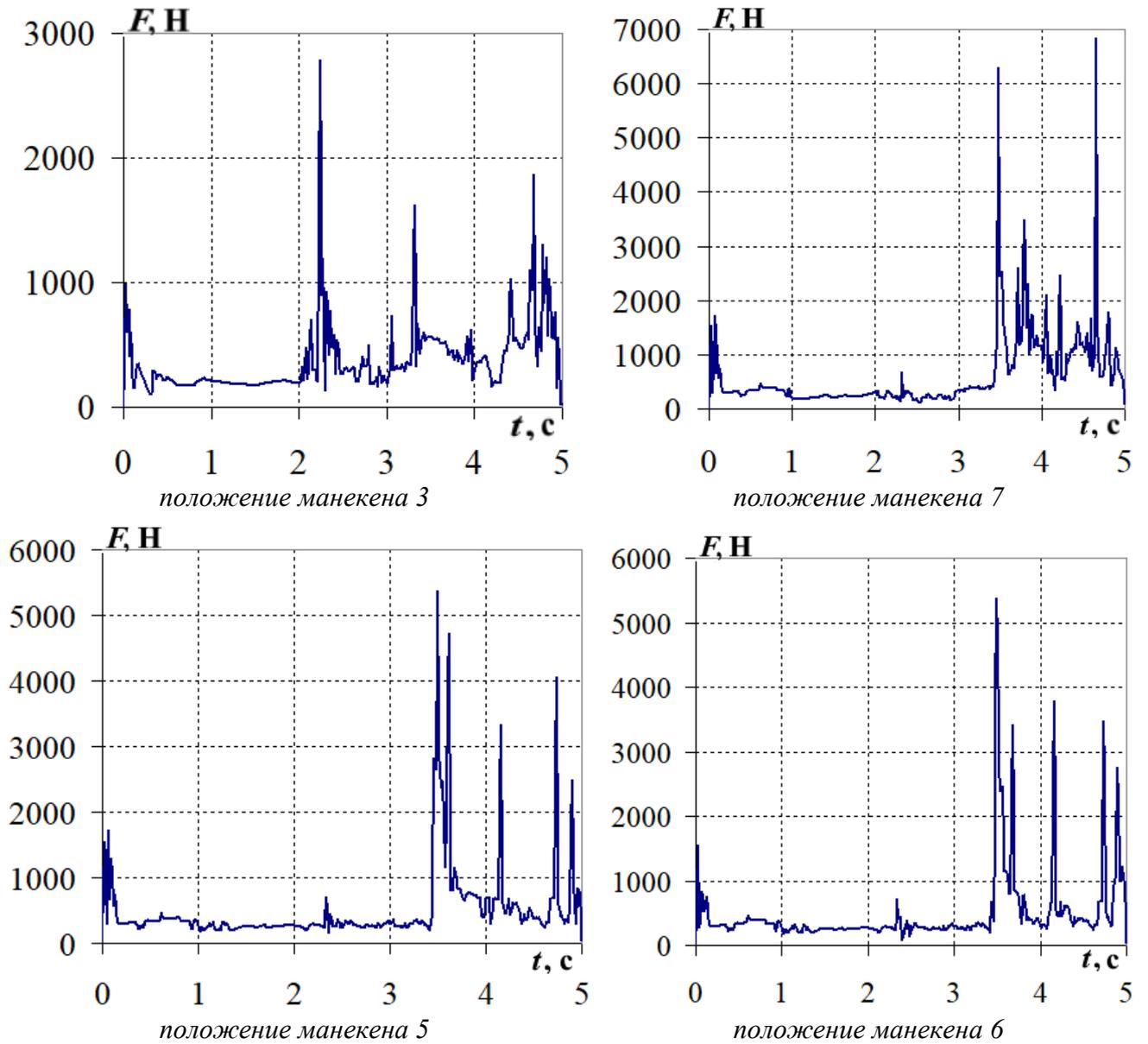


Рисунок И.5 – Сжимающее усилие, действующее на бедро модели манекена

ПРИЛОЖЕНИЕ К

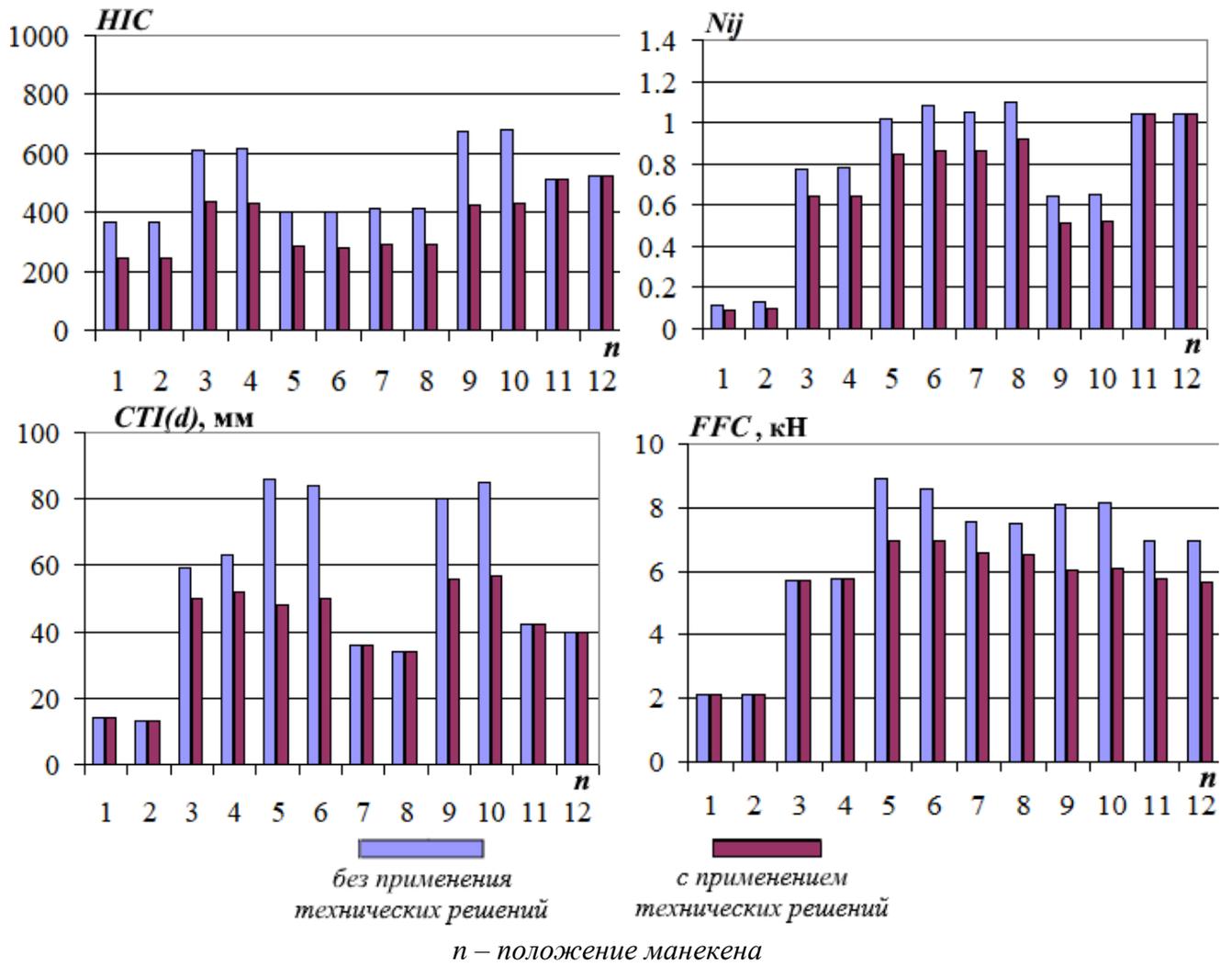


Рисунок К.1 – Величины критериев травмирования, получаемые при опрокидывании на боковую сторону 1 по сценарию 1

Продолжение приложения К

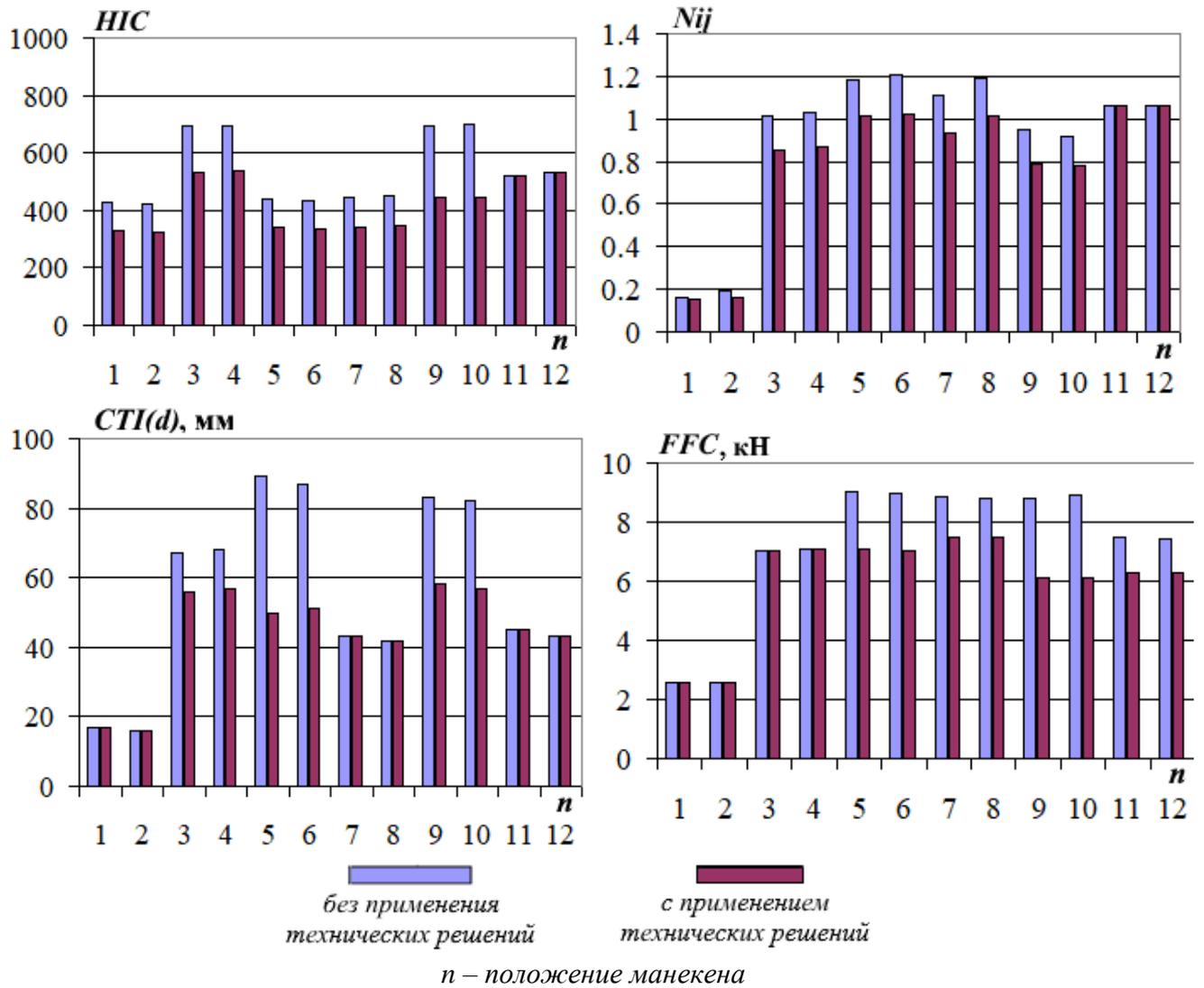


Рисунок К.2 – Величины критериев травмирования, получаемые при опрокидывании на боковую сторону 1 по сценарию 2

Продолжение приложения К

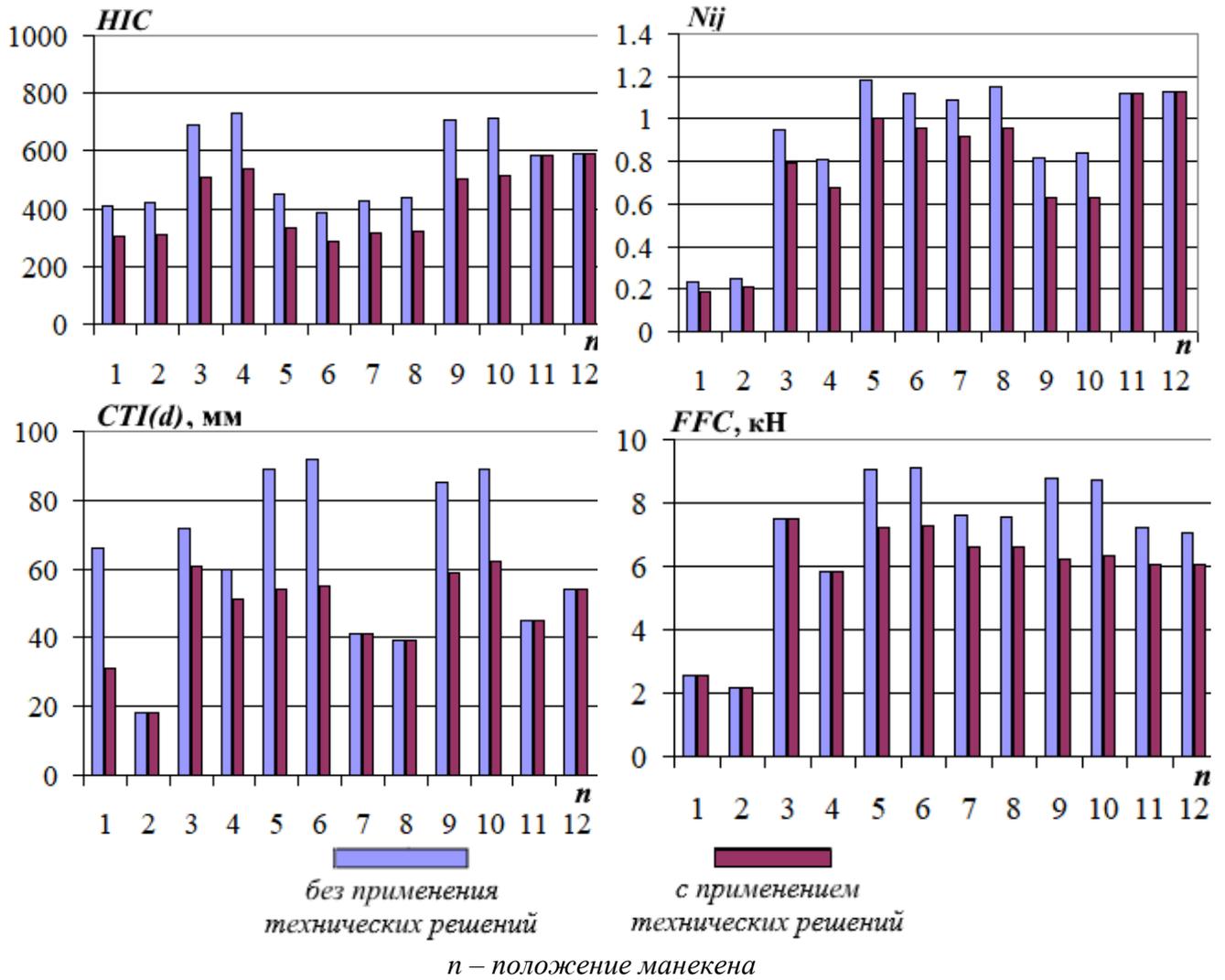


Рисунок К.3 – Величины критериев травмирования, получаемые при опрокидывании на боковую сторону 1 по сценарию 3

ПРИЛОЖЕНИЕ Л


УТВЕРЖДАЮ
 проректор по научной работе
 ФГБОУ ВО «Брянский государственный
 технический университет»

 к.т.н., доц. В.М. Сканцев

АКТ о внедрении

Настоящим подтверждаем, что материалы диссертации аспиранта О.И. Бондаренко «Обоснование технических решений повышения безопасности пассажирских вагонов при опрокидывании» внедрены в учебный процесс на кафедре «Подвижной состав железных дорог».

Результаты теоретических и экспериментальных исследований оценки безопасности пассажирских вагонов при опрокидывании и степени травмирования пассажиров используются при изучении дисциплин «Основы математического моделирования подвижного состава железных дорог», «Промышленные программные комплексы автоматизированного проектирования» и «Основы безопасности подвижного состава».

Зав. кафедрой «ПСЖД»
 ФГБОУ ВО «Брянский государственный
 технический университет»


 к.т.н., доц. А.А. Лагутина

Рисунок Л.1 – Акт о внедрении материалов диссертации в учебный процесс