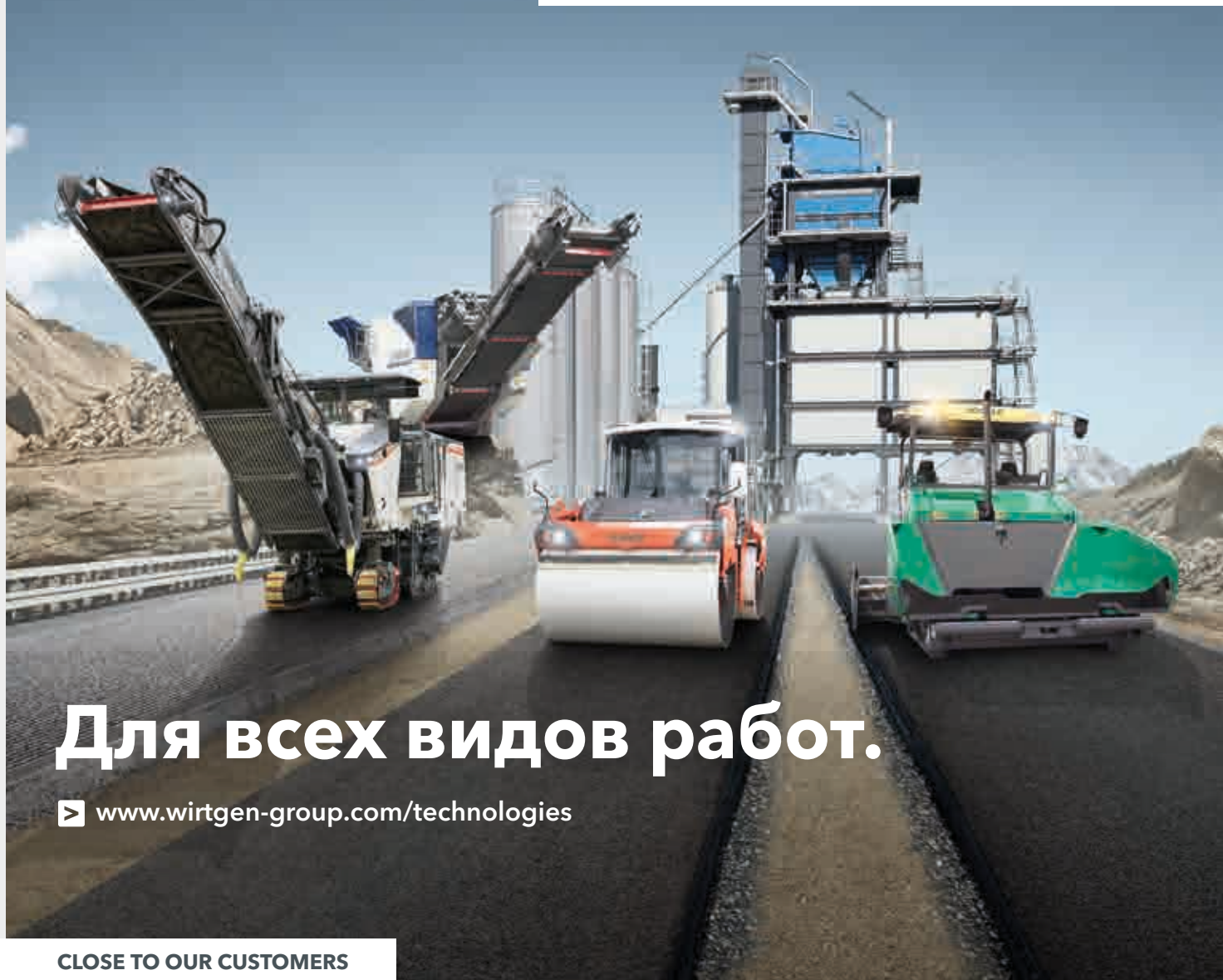



A JOHN DEERE COMPANY

 **WIRTGEN GROUP**



Для всех видов работ.

 www.wirtgen-group.com/technologies

CLOSE TO OUR CUSTOMERS

ROAD AND MINERAL TECHNOLOGIES. Благодаря современным технологиям от концерна WIRTGEN GROUP Вы сможете выполнить все виды работ в области дорожного строительства, включая переработку материала, производство смеси, укладку, уплотнение и ремонт дорожного покрытия - эффективно и экономично. Доверьтесь команде WIRTGEN GROUP и ее сильным брендам WIRTGEN, VÖGELE, HAMM, KLEEMANN и BENNINGHOVEN.

ООО "Виртген-Интернациональ-Сервис" • Тел.: +7 / 495 / 221 71 26
E-mail: info.russia@wirtgen-group.com

 www.wirtgen-group.com

МЕТОДЫ ЦИФРОВОГО ВИРТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЙ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Широкое внедрение цифровых технологий виртуальных цифровых испытаний по оценке безопасности при столкновениях транспортных средств, выездов на встречную полосу с симуляционным моделированием наездов на дорожные ограждения и другие элементы дорожного обустройства является одним из основных мероприятий, обеспечивающих снижение смертности на дорогах в результате дорожно-транспортных происшествий (ДТП).

И.В. Демьянушко, д.т.н., профессор, МАДИ, Москва

Разработка так называемого виртуального полигона, основанного на использовании современных мирового уровня программных продуктов и численных методов механики для цифрового моделирования краш-ситуаций с наездом транспортных средств на элементы дорожного обустройства (ЭДО), позволяет в настоящее время решать сложные проблемы анализа новых конструкций ЭДО, поведения автомобилей при ДТП с наездом на конструкции.

В целях реализации и выполнения приоритетной программы «Безопасные и качественные дороги» в Московском автомобильно-дорожном государственном университете (МАДИ) силами сотрудников кафедры «Строительная механика» и малого инновационного предприятия при МАДИ — ООО «МиПК», ведутся научно-практические разработки по элементам дорожного обустройства (ЭДО — дорожные ограждения безопасности, опоры освещения, знаки, рекламные опоры, переходы, акустические панели, противотаранные устройства и т.п.), направленные на создание системы виртуальных цифровых испытаний, цифрового информационного моделирования и проектного анализа, а также экспертной оценки обеспечения безопасности дорожного движения. Следует сказать, что аналогичные систематические исследования проводятся научными коллективами о всем мире, наиболее близкий подход реализован в George Washington University, FHWA/NHTSA National Crash Analysis

Center (NCAC), USA, близкие исследования проводятся в Department of Mechanical Engineering, The University of Sheffield, Sheffield, UK, в University of Nebraska, Lincoln, Nebraska (USA) и во многих других научных центрах. Наши работы в этом направлении начались намного позже — с 2010 г., когда в МАДИ начались исследования по применению тросовых дорожных ограждений (ТДО). Эти исследования и разработки, которые проводятся в МАДИ общим научным коллективом совместно с ООО «МиПК», позволили сделать существенный шаг в продвижении работ по повышению безопасности на дорогах, создать за относительно короткое время основанные на цифровых технологиях инструменты для проектирования новых инновационных конструкций (фронтальные ограждения, мобильные фронтальные ограждения, новые парапетные и тросовые системы), разработать обоснованные стандарты в области дорожных ограждений безопасности, обеспечить существенное снижение затрат на внедрение новых образцов конструкций.

К настоящему времени эти работы создали основу для формирования «виртуального цифрового полигона» для испытаний ЭДО на наезд транспортных средств (ТС), который может эффективно использоваться, в первую очередь, в целях сертификационной оценки соответствия ЭДО требованиям нормативных документов, в частности ТР ТС 014/2011 «Безопасность автомобильных дорог». Эти работы уже в течение двух лет успешно проводятся с использованием инструментов

виртуального полигона в рамках аккредитованной на проведение виртуальных сертификационных испытаний «Лаборатории испытаний ЭДО» в составе ООО «МиПК» [1]. Виртуальный полигон предназначен также для многочисленных исследований, связанных с разработкой инновационных конструкций ЭДО, экспертиз, проводимых по заявкам различных организаций, и в ряде других случаев. Ниже будут рассмотрены некоторые важные аспекты применения цифрового виртуального анализа различных конструкций ЭДО, примеры цифровых моделей, проблемы и перспективы применения виртуального цифрового анализа ЭДО в дорожно-строительной отрасли с учетом внедрения новых материалов и интеллектуальных технологий.

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

Применение традиционных инженерных подходов для определения механики работы конструкций ЭДО в настоящее время не дает необходимой точности анализа, что связано с учетом упругопластического деформирования при ударе, больших деформаций, контактных процессов. Решение этих задач требует использования современных численных методов пространственного нелинейного динамического моделирования. При ударе во время столкновения автомобиля с ЭДО, детали ЭДО и наезжающего с ударом транспортного средства (ТС) подвергаются действию динамических нагрузок высокого уровня, из-за чего они начинают перемещаться и деформироваться. Геометрия ЭДО в процессе

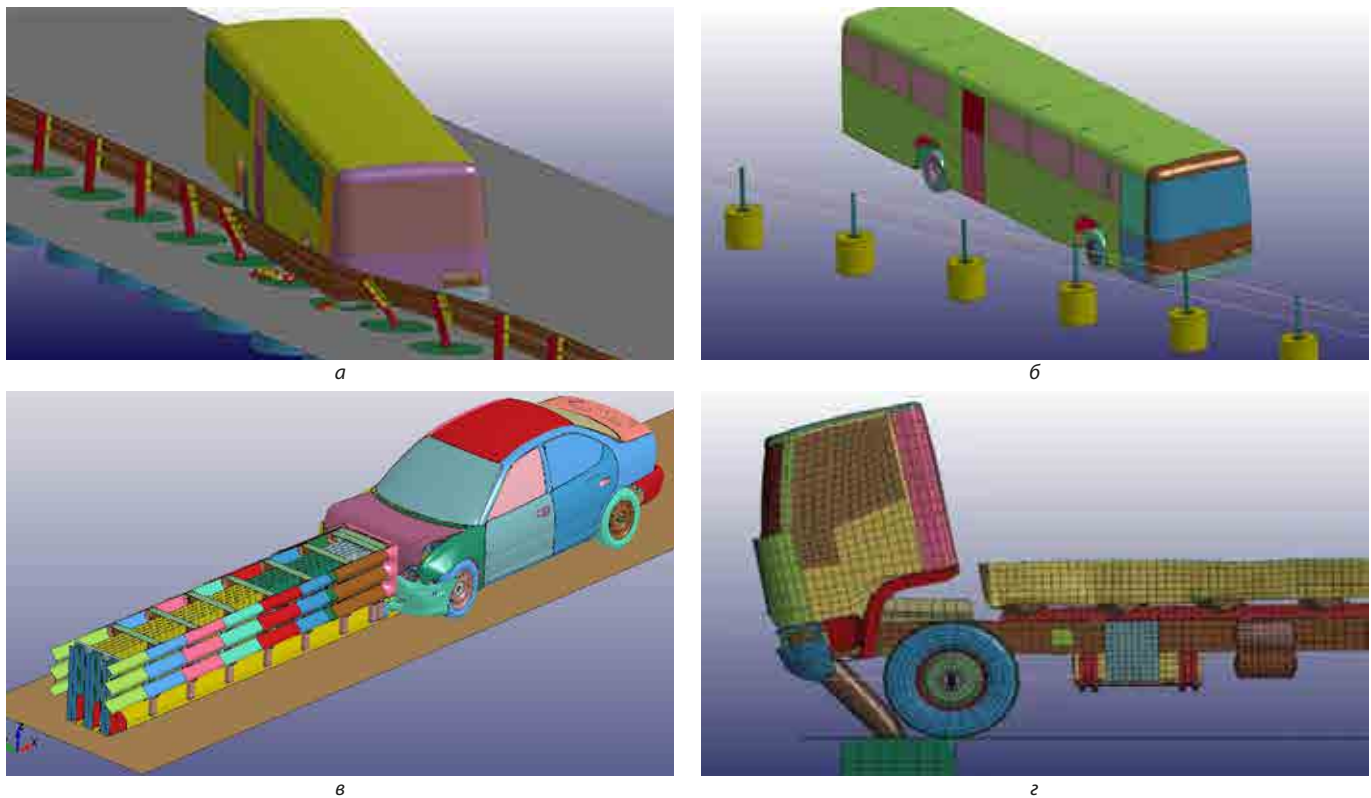


Рисунок 1. 3D цифровые КЭ-модели цифровых виртуальных краш-тестов с наездом различных автомобилей на ЭДО (а — наезд автобуса на барьерное дорожное ограждение, б — наезд автобуса на тросовое дорожное ограждение, в — наезд легкового автомобиля на фронтальное ограждение, г — наезд автомобиля на боллард)

деформации при ударе в каждый момент времени уникальна и не повторяется во времени. Такие задачи относятся к области нелинейной динамики переходных процессов. Научно-практические разработки по созданию мультидисциплинарных 3D математических моделей элементов дорожной инфраструктуры — дорожного обустройства, моделей различных типов транспортных средств (ТС), а также процессов движения и столкновений, описываемых соотношениями нелинейной динамики с использованием методов численной линейризации, в частности, МКЭ, направлены на обеспечение высокого уровня адекватности цифровых двойников — Digital Twins. Разработки проводятся с использованием современных программных комплексов динамического анализа высокоскоростных процессов, основанных на методе конечных элементов (КЭМ, FEM), в большинстве моделей используется лицензированный комплекс Ls-Dyna [2], а также продукты MSC Software. Примеры 3-мерных конечно-элементных (КЭ) моделей некоторых типов ЭДО с наездом ТС в рамках виртуального испытательного полигона показаны на *рисунке 1* (а-г). В настоящее

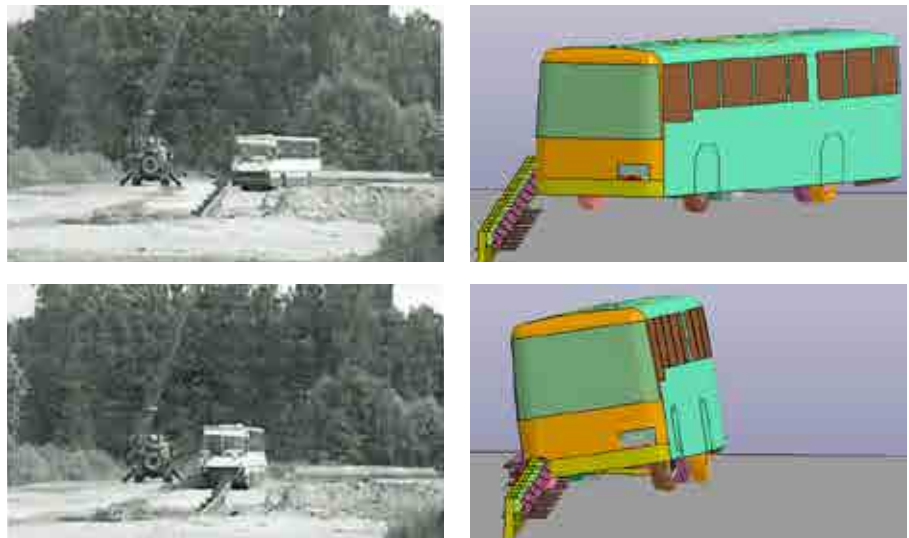


Рисунок 2. Моменты удара автобуса о барьерное ограждение, справа — КЭ-модель в Ls-Dyna, слева — натурные испытания, проведенные на испытательной площадке ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», рассматриваются одни и те же моменты времени

время нами выполнено свыше тысячи виртуальных испытаний конкретных объектов ЭДО различного применения и конструкций, материалы исследований изложены в многочисленных статьях, в частности, [3-5]. При моделировании работы ЭДО при ударе необходимо учитывать ряд проблем, которые связаны с нетривиальностью задачи: особенности построения сеток МКЭ для различных конструктивных элементов, описание моделей различных

материалов в конструкциях с учетом скоростей деформаций, описание процессов нелинейного трения и потерь в контактах. На последнем стоит остановиться особо, от правильного учета поглощения энергии удара в элементах сталкивающихся конструкций зависит основной результат расчета. Учет потерь на трение в контактах: шины — дорожное покрытие, в переменных контактах ударного и скользящего взаимодействия автомобиля во время стол-

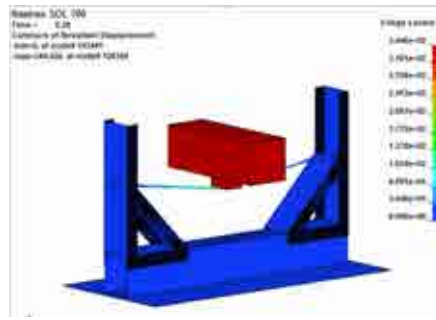


Рисунок 3. Стендовые ударные испытания тросов для ТДО и цифровой двойник

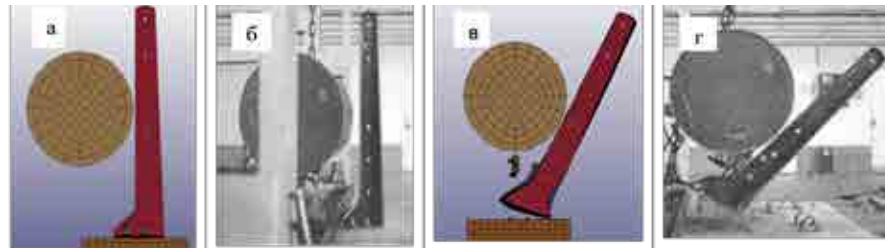


Рисунок 4. Пример валидационного анализа модели «стойка — анкерное крепление» барьерного дорожного ограждения — испытания на удар

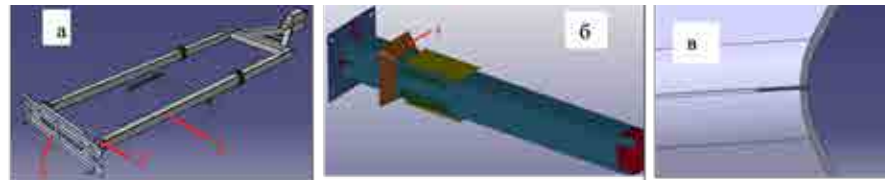


Рисунок 5. Вид конструкции мобильного фронтального ограждения — а, балка ограждения с ножевым устройством переднего абсорбера конструкции — б, расположение специальных концентраторов — канавок, которые определяют направление распространения трещины и делают ее раскрытие предсказуемым — в

кновения с ЭДО, внутренних потерь при трении и деформации элементов конструкций, например, в тросах, существен особенно правильный учет при использовании неметаллических материалов в элементах ограждений — пластика и композитов.

Только проведение этих валидационных исследований позволяет считать созданные модели цифровыми двойниками. Споры о том, что считать цифровым двойником, какие математические модели по праву можно назвать таким образом, не прекращаются сегодня, см., например, [6]. Термин «Digital Twin» в нашем случае оправдан необходимостью при каждом виртуальном испытании доказывать правомочность оценок, так как они используются для сертификации конструкций, и полученные расчетные параметры должны сравниваться с нормативными критериями, от чего зависит в конечном итоге безопасность конструкций, устанавливаемых на дорогах.

Определению, как и во всех случаях краш-тестов, подлежат ускорения в фиксированных точках автомо-

биля наезда, что позволяет оценить безопасность пассажиров, а также траекторию его выбега после удара. В настоящее время в связи с тем, что при натурных испытаниях при определении степени травмируемости при наезде ТС используется индекс травмирования в виде значения ASI, в виртуальном анализе также используется этот индекс. В то же время виртуальный краш-тест позволяет оценивать различные показатели, и это направление нуждается еще в развитии.

Работы по валидации разработанных моделей ведутся нами систематически, и включают сравнительный анализ параметров и результатов натурных полигонных испытаний и виртуальных испытаний тех же конструкций, а также многочисленных стендовых испытаний отдельных элементов конструкций и материалов.

ВАЛИДАЦИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАТУРНЫХ И СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Сравнение данных полномасштабных натурных испытаний и вирту-

альных, с одной стороны, является важным, так как позволяет оценить качество полной цифровой модели краш-теста. С другой стороны, очень ограниченное количество параметров — обычно это основные стандартизованные величины, так называемые потребительские характеристики, так, для дорожных ограждений это прогибы, удерживающая способность, характер разрушений, поведение автомобиля и др. — не дают возможности изучения механики поведения конструкции в процессе удара и не в полной мере могут быть использованы для оптимизации конструкций, в первую очередь — из-за длительности испытаний и высокой стоимости. Кроме того, при анализе результатов испытаний имеется значительная субъективная составляющая. В то же время валидация моделей требует подробного исследования всех параметров, что характеризует их основное преимущество — высокую информативность. На рисунке 2 показаны два обычных эпизода сравнения поведения дорожного барьерного ограждения при наезде автобуса при натурных испытаниях (использованы данные испытательного центра ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»), которое проводится в одинаковые моменты времени и позволяет оценить достаточно точно работу модели. По основным потребительским характеристикам для дорожных ограждений на основе практики многочисленного анализа нами определен допустимый уровень совпадения параметров, которые приведены в стандартах, в частности ГОСТах по дорожным ограждениям [7, 8]. Так, по большинству параметров цифровое отличие результатов не должно превышать 10%. Эти требования к результатам виртуальных полномасштабных испытаний изложены в стандартизованной методике [9] — СТО ООО «МиПК». Экспериментальные исследования материалов конструкций ЭДО и отдельных элементов позволяют более обоснованно выбирать модели материалов и вид КЭ-моделей для элементов конструкций. Так, испытания материалов из элементов ЭДО дают возможность учесть реальные (истинные диаграммы деформирования), а не инженерные характеристики сталей, учесть скорость дефор-

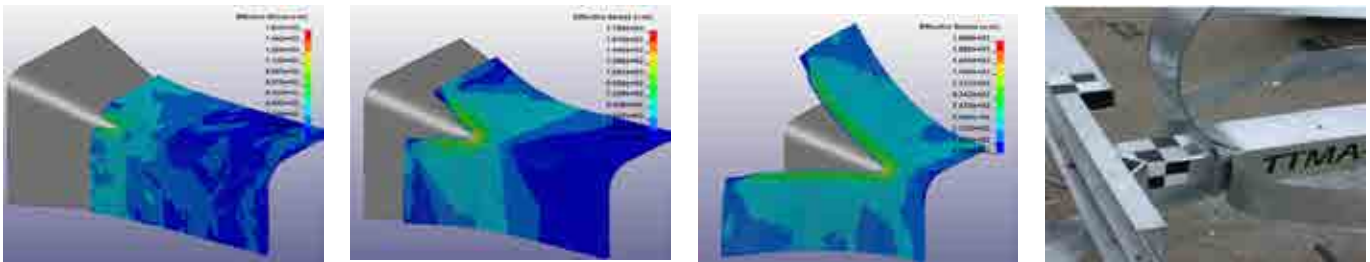


Рисунок 6. Моделирование направленного разрушения энергопоглощающего элемента

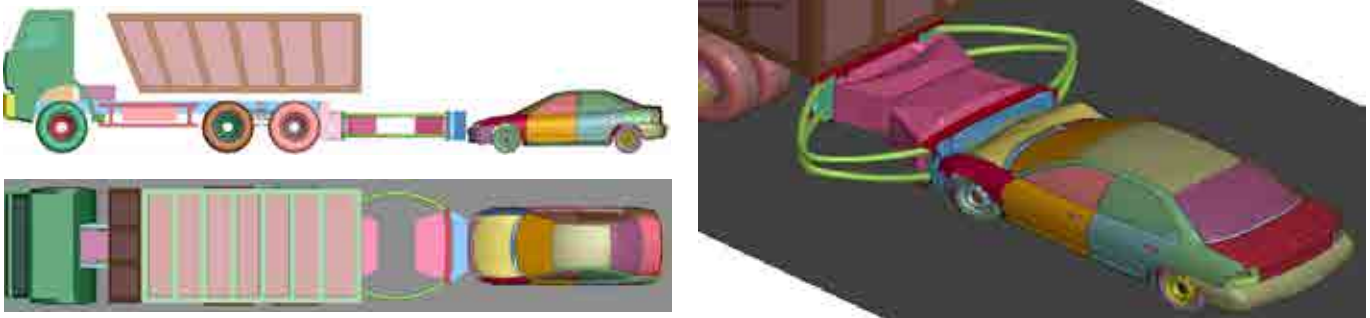


Рисунок 7. Виртуальный краш-тест наезда автомобиля на прицепное фронтальное ограждение [6]

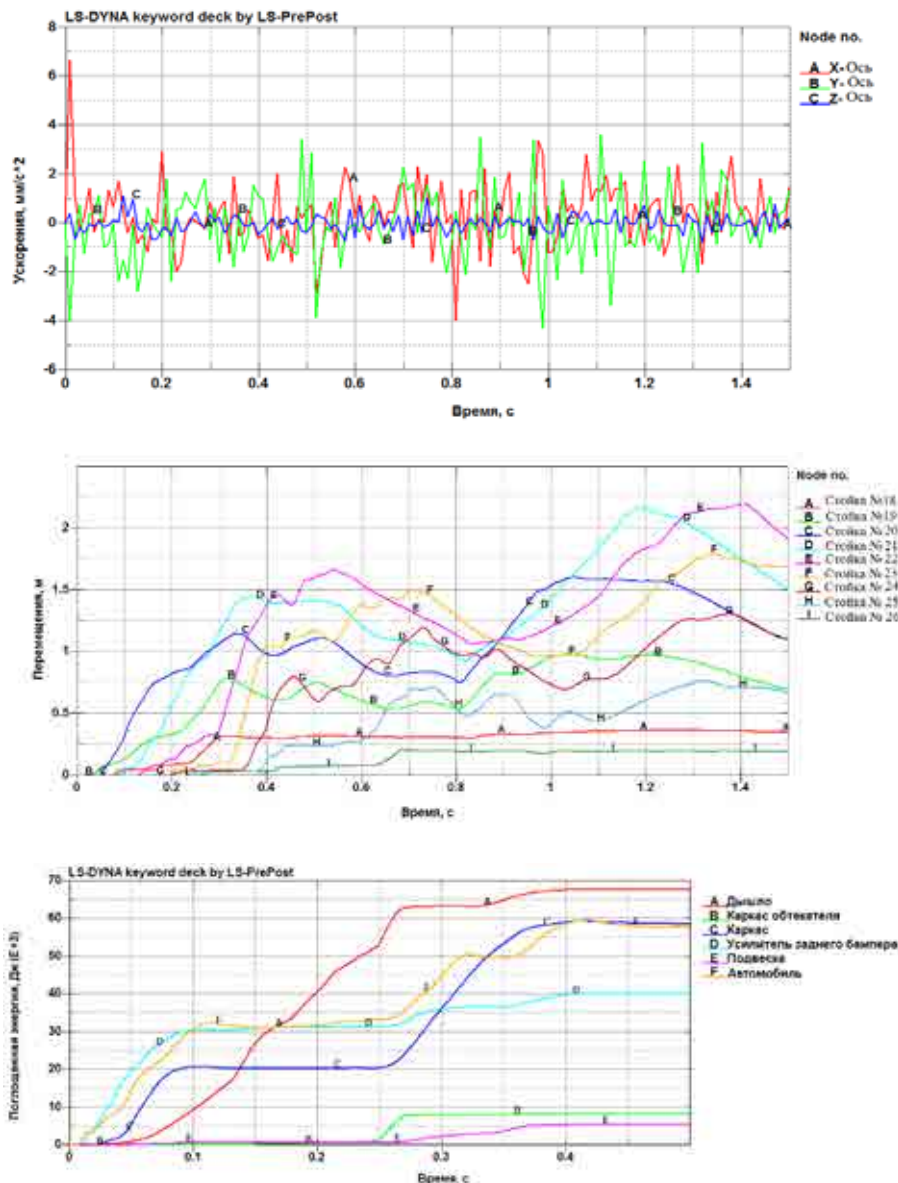


Рисунок 8. Пример графиков изменения различных важных для анализа характеристик во времени при виртуальных столкновениях ТС с ЭДО

мирования материала в модели, что важно, если учесть ударный характер деформирования при столкновении — как для материалов самого ЭДО, так и для материала контактирующих элементов автомобиля. Испытания стоек ЭДО, тросов ТДО, элементов креплений также позволяет правильно построить КЭ-модели отдельных элементов, что важно, так как кроме требований обеспечения точности необходимо экономично расходовать вычислительные ресурсы, что особенно важно, учитывая итерационный характер решений. На рисунке 3 показан один из видов новых разработанных нами валидационных испытаний тросов для тросового дорожного ограждения — испытания на удар, которые позволили определить рациональный выбор КЭ-модели для троса при виртуальных испытаниях ТДО. На рисунке 4 показан пример разработки схемы валидации элемента барьерного дорожного ограждения «стойка — анкерное крепление» при стендовых виртуальных и натурных испытаниях. Здесь особенностью было использование так называемых «химических анкеров» для крепления стоек ограждения, т.е. анкеров с клеевым креплением. Результаты испытаний показали соответствие поведения моделей натурным образцам. Учет механики разрушения существен для всех ЭДО, особенно важен он для оценки работы конструкций

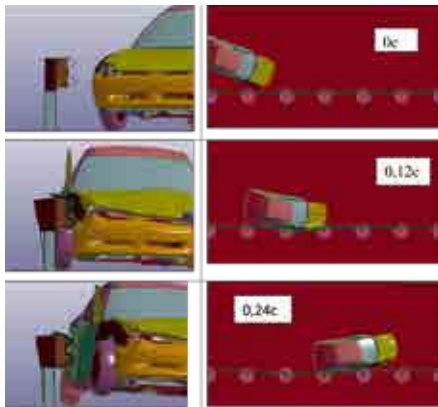


Рисунок 9. Фрагменты кинограммы наезда автомобиля на барьерное дорожное ограждение при виртуальных испытаниях

из бетона, где характер трещин и повреждений при наезде автомобиля нормируется. Одной из наиболее важных и показательных задач является задача моделирования мобильных фронтальных ограждений [10, 11], работа которых основана на прогнозируемом разрушении, за счет которого происходит основное поглощение энергии удара. Кинетическая энергия при ударе тратится на образование свободных поверхностей в процессе роста трещины, трение специального ножа с поверхностью трубы, пластическую деформацию листов трубы, а также пластическую деформацию передней рамы и опорной части ограждений (рисунок 5 — вид конструкции разрушаемого направленно при ударе элемента МФО).

Валидация проводилась путем рассмотрения поведения вырезанного элемента с выточкой при движении в процессе удара (рисунок 6).

Комплекс работ по созданию и валидации моделей ЭДО позволяет считать, что разрабатываемые с использованием описанной методики модели в полной мере могут считаться цифровыми двойниками ЭДО.

ОСНОВНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ (DIGITAL TWINS) И ВИРТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ЭДО

Основное преимущество виртуального цифрового анализа с использованием 3-мерных КЭ-моделей уже упоминалось выше — это высокая информативность, что важно, в первую очередь, при проектировании новых конструкций, особенно инновационных, по которым отсутствует еще достаточный опыт разработки и эксплуатации. Так,

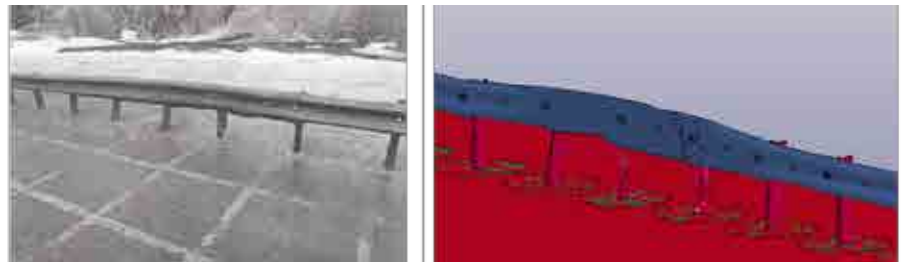


Рисунок 10. Вид дорожного барьерного ограждения после натуральных и виртуальных испытаний



Рисунок 11. Съемка с видеорегистратора и воспроизведенная первоначальная схема наезда



Рисунок 12. Фрагмент виртуального наезда автомобиля на тросовое ограждение и далее на автомобиль, двигавшийся по встречной полосе

преимущества виртуального анализа были продемонстрированы при создании первых отечественных образцов мобильных фронтальных ограждений (МФО), другое название — «Attenuator Support Vehicle». Подробно проблемы, которые возникли и были решены при создании моделей краш-тестов МФО, описаны в работе [10]. Особенностью моделей здесь является многотельность общей системы. Вся система модели краш-теста для анализа работы МФО состоит из автомобиля сопровождения (обычно грузовой автомобиль), прицепного устройства с МФО и, наконец, наезжающего автомобиля. На рисунке 7 показана разработанная виртуальная цифровая модель всей системы наезда на МФО для МФО прицепной конструкции. При виртуальных испытаниях определяются подробно все характеристики поведения системы во времени, что открывает значительные возможности для подробного анализа. Так, на рисунке 8 приведены примеры получаемых в расчетах при виртуальных столкновениях различных ТС с ЭДО графиков изменения таких важных для анализа характеристик систем, как: а) ускорения в

центре тяжести ТС во время удара; б) перемещений в точках элементов (здесь — для тросов тросового ограждения в процессе столкновения с ТС); в) составляющие поглощения энергии в элементах системы МФО и автомобиля в процессе столкновения и многие другие. Важным преимуществом виртуального анализа является также подробная визуализация процессов наезда и деформирования элементов при столкновении, что в равной степени относится как к самим ЭДО, так и к ТС. Очевидно, что с целью экономии времени и вычислительных ресурсов приходится в ряде случаев жертвовать подробностью моделей. Так, при исследовании деформирования ЭДО в большинстве случаев в модели автомобиля подробно моделируется передняя часть — бампер, передние кузовные детали (крылья, капот), передняя подвеска с колесами, переднее стекло, во время как задние части автомобиля моделируются в основном твердыми телами. То есть модели не являются заранее определенными и их реконструкция зависит от задачи анализа. На рисунке 9 даны характерные результаты виртуального испытания

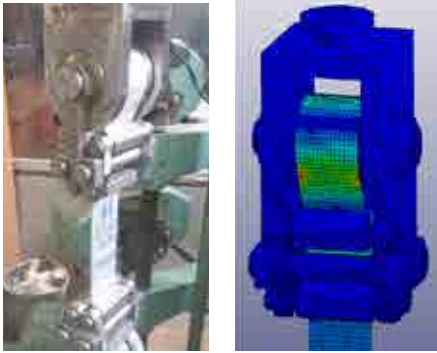


Рисунок 13. Фрагменты исследований инновационного тросового элемента — ленты из ВСМПЭ — для дорожного ограждения: слева — испытания ленты из ВСМПЭ на разрыв, внизу — испытания на удар, справа — вид КЭ-модели с узлом крепления ленты в модели виртуальных испытаний

барьерного дорожного металлического ограждения наездом легкового автомобиля в отдельные моменты времени (фрагменты кинограммы виртуальных испытаний), такая симуляция позволяет проследить весь высокоскоростной процесс деформирования и поведения сталкивающихся объектов, который обычно при краш-тестах длится 200-300 мс. Важна также возможность оценить последствие — остаточное деформирование и разрушение конструкций. На *рисунке 10* показан типичный вид ограждения после наезда автомобиля при натурных и при виртуальных испытаниях. Существенным преимуществом виртуального анализа является экономия средств при использовании этих инструментов при дизайн-проектировании, при оценке соответствия стандартам и последующей сертификации, а также при экспертизе и анализе причин ДТП. Опыт показывает, что для одного предприятия, выпускающего однотипные дорожные боковые ограждения, количество натурных испытаний, необходимое для сертификации этой продукции, уменьшается в 6-8 раз при использовании виртуальных сертификационных испытаний, что приводит к 25÷35-кратному уменьшению затрат на сертификацию.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВИРТУАЛЬНОГО ЦИФРОВОГО АНАЛИЗА ЭДО

Конечно, в статье нет возможности рассмотреть все аспекты идеи создания виртуального полигона и дальнейшего развития виртуального цифрового анализа ЭДО. Однако мы остановимся на основных, уже в определенной степени проработанных направлениях.

Использование возможностей цифрового виртуального анализа для реконструкции дорожно-транспортных происшествий (ДТП).

При очевидной важности задачи реконструкции ДТП, известные исследования носят, в основном, существенно прикладной характер, и их результаты предназначены для упрощенной экспертизы, методы которой достаточно подробно уже рассматривались в ряде работ [12, 13]. Основные программные продукты, применяемые даже в углубленных экспертизах столкновений автомобилей, используют, в основном, подходы многотельной динамики (Multibody System), например, VCRASH 4, когда сталкивающиеся конструкции (в основном автомобили) рассматриваются в движении, как твердые тела. Оценке же ДТП с проникновением или столкновением ТС с элементами дорожного обустройства посвящено относительно мало исследований, и они носят конкретный характер — например, столкновение с определенным видом ограждения [14,15], причем исследование заканчивается на определении скорости выбега автомобиля после столкновения с ограждением. Цифровое моделирование возможных ситуаций наезда автомобиля (начальная скорость, траектория движения) на дорожное ограждение и вариантный анализ позволяют достаточно точно реконструировать процесс ДТП и определить причины, долю участия дорожного ограждения (или любого ЭДО), его элементов и материалов в поглощении энергии удара, индексы травмирования для автомобилей наезда и, что важно, для автомобилей, попавших на пути его движения по встречной полосе. Так, фактически, создается цифровой двойник происшествия (ДТП) с наездом на дорожное ограждение на основе полной информации о

ДТП. Пример такой реконструкции с использованием инструментов цифрового виртуального анализа приведен сокращенно на *рисунках 11 и 12*. Показана съемка с видеорегистратора (*рисунок 11*), позволившая установить начальное положение наезжающего на тросовое дорожное ограждение автомобиля, расчетная схема модели наезда, фрагменты кинограммы виртуального наезда (*рисунок 12*) автомобиля на ТДО, проникновение на встречную полосу и наезд на автомобиль, движущийся по встречной полосе. Окончательные ситуационные результаты хорошо совпадают с результатами ДТП.

Использование цифрового виртуального анализа для проектирования новых конструкций и разработки нормативных требований — базы данных.

Опыт применения виртуального анализа оказался неопределимым при обновлении ГОСТов на дорожные ограждения и разработке новых стандартов, а также, как уже упоминалось выше, при создании новых инновационных конструкций. Особое место среди них занимают конструкции с использованием элементов из полимерных и композитных материалов. Для этих конструкций в первую очередь необходим обстоятельный эксперимент, позволяющий создать валидированные модели материала и отдельных элементов конструкций. Опыт применения элементов из современного высокопрочного полимера — сверхмолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) — для тросовых ограждений показал, что без виртуального моделирования испытаний невозможно было бы практически найти конструктивные решения, в частности, для элементов крепления троса-ленты. На *рисунке 13* показаны фрагменты исследований троса-ленты из ВСМПЭ: на разрыв, на удар и КЭ-модель узла крепления [16], использованная в анализе. Однако такой анализ уже становится затруднительным в связи с многообразием конструкций (как самих ЭДО, так и ТС), что очевидно требует разработки баз данных (БД), структура и содержание которых базируются, в первую очередь, на материалах виртуального цифрового полигона.

В совокупности такие базы могут быть объединены в единый комплекс (BIG DATA), который может эффективно использоваться как в упомянутых приложениях, так и при реконструкции ДТП, а также входить в общую систему баз данных, организованных при использовании BIM-технологий в системе цифровой дороги. Развиваемая нами в настоящее время структура БД включает данные по конструкциям, 3D-модели, протоколы натуральных и виртуальных испытаний, отчеты по испытаниям и целый ряд технических данных, необходимых для различных пользователей. Естественно, что такие базы являются многоуровневыми, чтобы удовлетворять требованиям различных по степени необходимости пользователей.

Выводы

Приведенные в настоящей работе результаты исследований в области цифровых технологий решения задач ударных взаимодействий деформируемых сложных конструкций, происходящих на дорогах и именуемых дорожно-транспортными происшествиями, представляются важными как с научной, так и с практической сторон. Комплексность подхода к решению задач наезда автомобилей на препятствия в виде элементов дорожного обустройства, накопленный значительный опыт симуляционных валидированных расчетов определяют возможность создания цифрового виртуального полигона для виртуальных испытаний ЭДО, по аналогии с полигонами для натуральных испытаний. Это дает возможность обобщения данных с целью их анализа не только для понимания механики сложного ударного взаимодействия элементов, но и для формулирования требований к конструкциям, проектирования новых устройств безопасности. Как показывает опыт исследований, развитие численных методов нелинейного динамического анализа ударного взаимодействия деформируемых систем должно быть, в первую очередь, направлено на развитие валидированных математических моделей поведения конструктивных мате-

риалов при больших деформациях и разрушении, на создание соответствующих баз данных материалов и конструкций, а также их анализа. Развитие методов экспериментальных исследований для валидации виртуальных цифровых моделей, направленных на исследования демпфирования в элементах конструкций, построение уточненных математических моделей материалов и конструктивных элементов является одной из важнейших задач для развития систем безопасности на дорогах. Не следует думать, что внедрение интеллектуальных систем является панацеей в решении вопроса обеспечения безопасности — отказы этих систем также вероятны, так как абсолютной надежности не существует, и виртуальный цифровой анализ и испытания являются необходимым

и эффективным инструментом в системе обеспечения безопасности на дорогах.

Благодарности. Автор благодарит всех своих учеников и коллег, результаты исследований которых и бесценный опыт обсуждений использованы в этой работе.

Финансовая поддержка. Работе во многом способствует финансирование по Программе «Развитие — Цифровые технологии» при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонд содействия инновациям) (№47ГРЦТС10-D5/56182)», а также поддержка работ по созданию и переработке нормативных документов по безопасности ЭДО со стороны ФДА (Росавтодор) РФ. ■

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демьянушко И.В. Оценка компетентности и квалификации лабораторий, проводящих испытания элементов дорожного обустройства (Демьянушко И.В., Скобелев К.Д., Чернова А.П., Мухометова А.А.) //Дороги. Инновации в строительстве. — 2019. — №82. С. 82-86.
2. LS-DYNA® Keyword User's Manual. Livermore Software. Technology Corporation, Livermore, CA, 2016.
3. Демьянушко И.В., Карпов И.А., Тавшвадзе Б.Т. Использование виртуального эксперимента для определения технических параметров боковых удерживающих дорожных ограждений. //«Транспортное строительство». — 2017. — № 6. — С. 05-08.
4. Демьянушко И.В., Карпов И.А. Виртуальный краш-тест. //Мир дорог. — 2017. — ноябрь. — С. 49-50.
5. Демьянушко И.В. Применение численных методов нелинейной динамики к решению проблем столкновений при наезде транспортных средств на дорожные барьеры безопасности //«IV School-NDM 2017» / М.: ИМАШ РАН, — 2017. — 482 с. -<https://elibrary.ru/item.asp?id=29130118>
6. L.Wright, S.Davidson . How to tell the difference between a model and a digital twin / Adv. Model. and Simul. in Eng. Sci. (2020) 7:13; <https://doi.org/10.1186/s40323-020-00147-4>
7. ГОСТ 33 128-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Ограждения дорожные. Технические требования. <http://www.gostinfo.ru/catalog/gostlist>
8. ГОСТ 33 129-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Ограждения дорожные. Методы контроля. <http://www.gostinfo.ru/catalog/gostlist>
9. СТО 45029946-001-2018. Методика проведения виртуальных испытаний боковых дорожных удерживающих ограждений. ООО «МиПК», <http://www.niimech.ru>
10. Демьянушко И.В. Повышение безопасности дорожного движения при проведении ремонтных работ //Демьянушко И.В., Тавшвадзе Б.Т., Михеев П.С., Карпов И.А./ Мир дорог. — 2020, №131. С. 102-108.
11. TTMA-100 Innovative, Flexible and Affordable. Gregory. 2010. — 34.
12. Никонов В.Н. Реконструкция обстоятельств ДТП: Введение в современные методы экспертных исследований. Использование краш-тестов / Издательские решения, 2018. — 136 с. ISBN 978-5-4485-8175-5
13. Fricke, L. B. Traffic accident reconstruction: Traffic accident investigation manual (Vol. 2). Evanston, IL: Northwestern University, -1990. Press.
14. Coon, B. A., & Reid, J. D. Crash reconstruction technique for longitudinal barriers. Journal of Transportation Engineering, 131(1), 54–62. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X (2005) 131:1(54).
15. Mojdeh Asadollahi Pajouh, Jennifer D. Schmidt, Curt L. Meyer, Karla A. Lechtenberg & Ronald K. Faller . Crash reconstruction technique for cable barrier systems, Journal of Transportation Safety & Security, DOI: 10.1080/19439962.2017.1386251; <https://doi.org/10.1080/19439962.2017.1386251>
16. HYPERLINK "<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37358762>" Концевой захват для плоских канатов и тросовых изделий из высокопрочных пленок, нитей из СВМПЭ, полученных твердофазным методом. Демьянушко И.В., Озерин А.Н., Голубев Е.К., Куркин Т.С., Путивский И.А., Романов Е.В., Титов О.В. Патент на изобретение RU 2683045 С1, 26.03.2019.