

ООО «НИИ Механики и проблем качества - МАДИ»

Современные методы цифрового виртуального анализа для проектирования и испытаний дорожных конструкций

**Научный руководитель работ
Демьянушко Ирина Вадимовна
Засл. деят. науки и техн. РФ, д.т.н., проф.**

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТ:

I. РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ НАЕЗДА АВТОМОБИЛЕЙ НА ЭЛЕМЕНТЫ ДОРОЖНОГО ОБУСТРОЙСТВА

II. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЖЕСТКИХ И НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД НА ОСНОВЕ СОЗДАНИЯ 3D ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО СТАТИЧЕСКОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

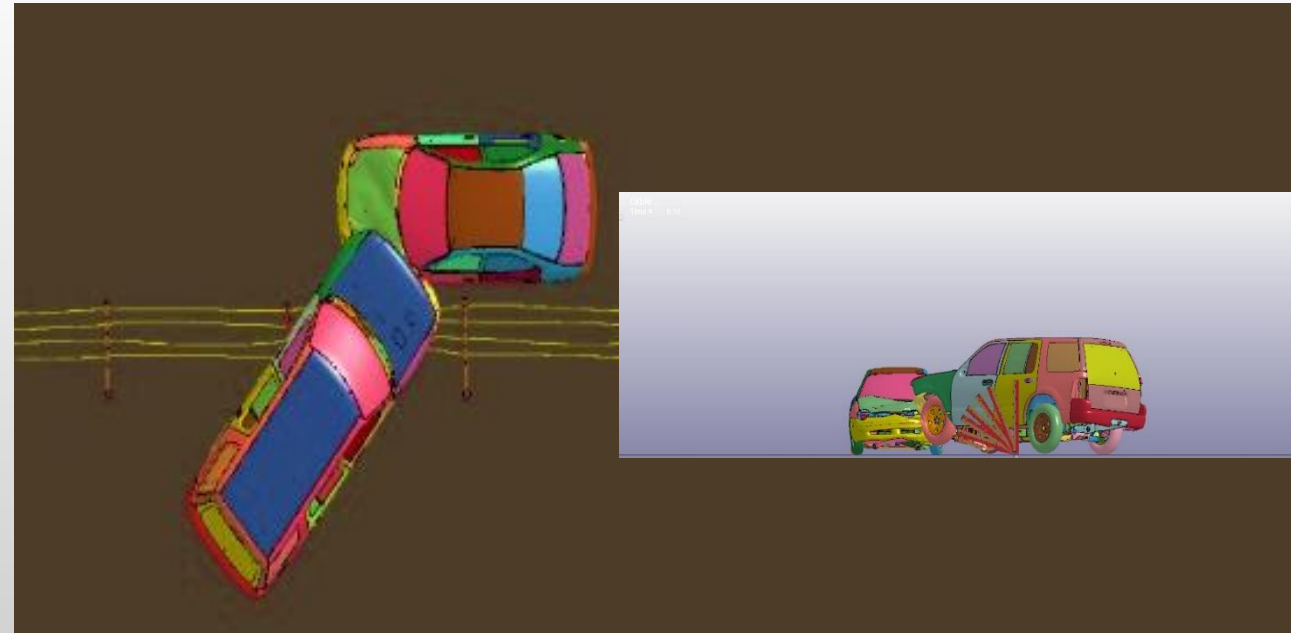
I. РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ НАЕЗДА АВТОМОБИЛЕЙ НА ЭЛЕМЕНТЫ ДОРОЖНОГО ОБУСТРОЙСТВА

- эффективное решение проблем оптимизации дорожной инфраструктуры с целью обеспечения безопасности, снижения расходов на проектирование, испытания, ситуационного анализа ДТП.

ООО «МИП НИИ МиПК» совместно с МАДИ ведутся научно-практические разработки по созданию мультидисциплинарных 3D математических моделей элементов дорожной инфраструктуры - дорожного обустройства -ЭДО (дорожные ограждения безопасности, противотаранные устройства, опоры освещения, знаки, рекламные опоры, переходы, акустические панели и т.п.), моделей различных типов транспортных средств (ТС), а также процессов движения и столкновений, описываемых соотношениями нелинейной динамики с использованием МКЭ, с высоким уровнем адекватности цифровых двойников -Digital Twins.

ЦЕЛЬ РАБОТ:-

- ❖ создание системы испытаний ЭДО,
- ❖ развитие сертификационных испытательных лабораторий (Test Beds),
- ❖ создание информационных баз данных Big Data «Автомобиль – дорога»
- ❖ цифрового обеспечения экспертной оценки безопасности дорожного движения
- ❖ повышение компетенций в области цифровых технологий за счет привлечения студенческого и преподавательского состава ВУЗа.



ПРЕИМУЩЕСТВА РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИХ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ (РАЗРАБОТКА TEST BEDS) ЭЛЕМЕНТОВ ДОРОЖНОГО ОБУСТРОЙСТВА (ЭДО)

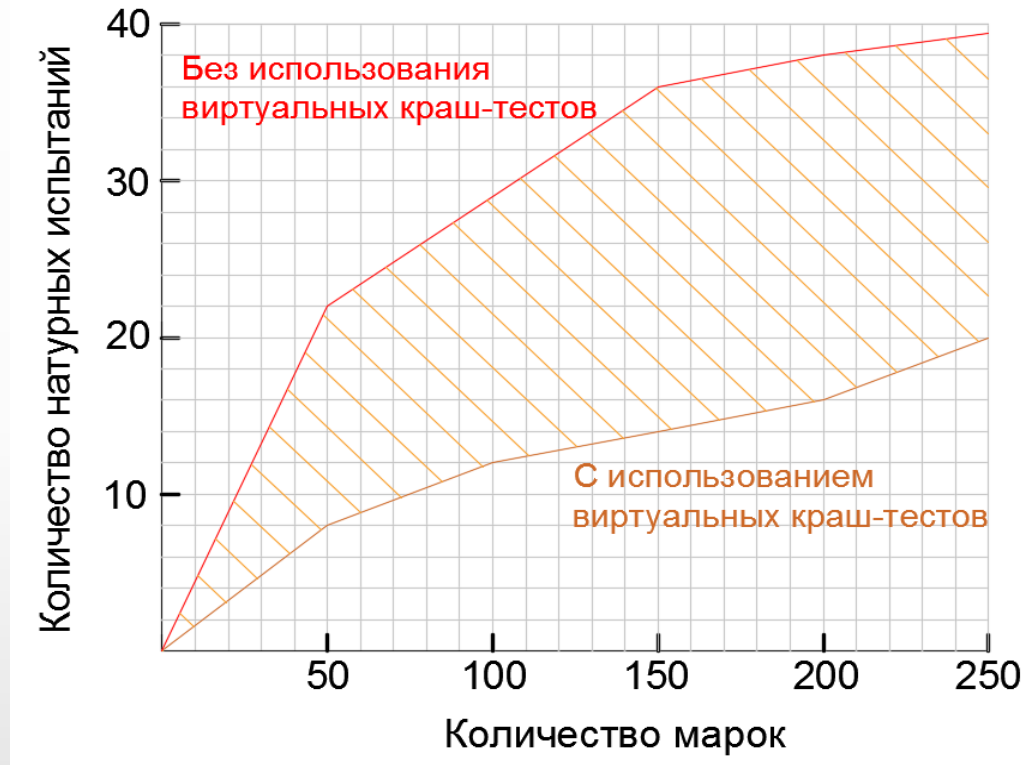


График соотношение количества виртуальных испытаний и натуральных испытаний в зависимости от числа марок дорожных ограждений барьерного типа при сертификации по Техническому регламенту ТР ТС 014/2011

Преимущество использования виртуальных испытаний наряду с натурными состоит в существенной **экономии средств и времени** на доводку и оценку конструкций ЭДО. Для дорожных ограждений безопасности предварительные оценки показывают не менее чем **8-ми кратную экономию затрат**.

Ни в коем случае не следует считать, что виртуальные испытания могут полностью заменить натурные.

Проведение виртуальных испытаний требует валидации (оценки соответствия) цифровых моделей, причем не только геометрии, но и свойств материалов, учета технологии и т. п. При проведении виртуального цифрового анализа следует постоянно сверяться с данными испытаний, как натуральных полноразмерных, так и стендовых.

ЭДО ДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ, ПОДЛЕЖАЩИХ ПОДТВЕРЖДЕНИЮ СООТВЕТСТВИЯ В ФОРМЕ СЕРТИФИКАЦИИ В СООТВЕТСТВИИ С ТЕХНИЧЕСКИМ РЕГЛАМЕНТОМ ТАМОЖЕННОГО СОЮЗА «БЕЗОПАСНОСТЬ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ» ТР ТС 014/20011

Дорожные ограждения различных типов



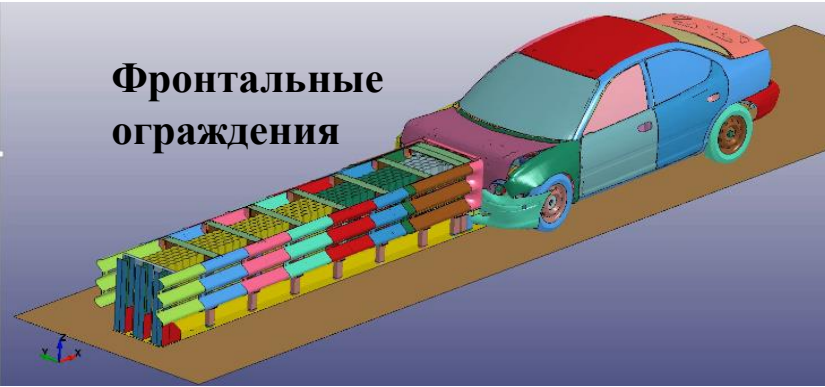
**Опоры для монтажа технических средств организации дорожного движения и
стационарного электрического освещения. Светильники для стационарного
электрического освещения, акустические экраны**



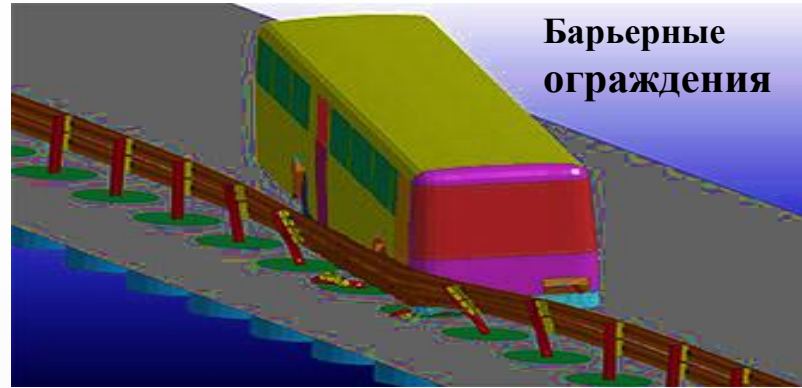
**Ограждения и другие
устройства защитного
назначения, в том числе,
антитеррористические –
болларды, габионы и др.**

ПРИМЕРЫ РАЗРАБОТОК 3D ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ (DIGITAL TWINS) ДЛЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ДОРОЖНОГО ОБУСТРОЙСТВА И ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

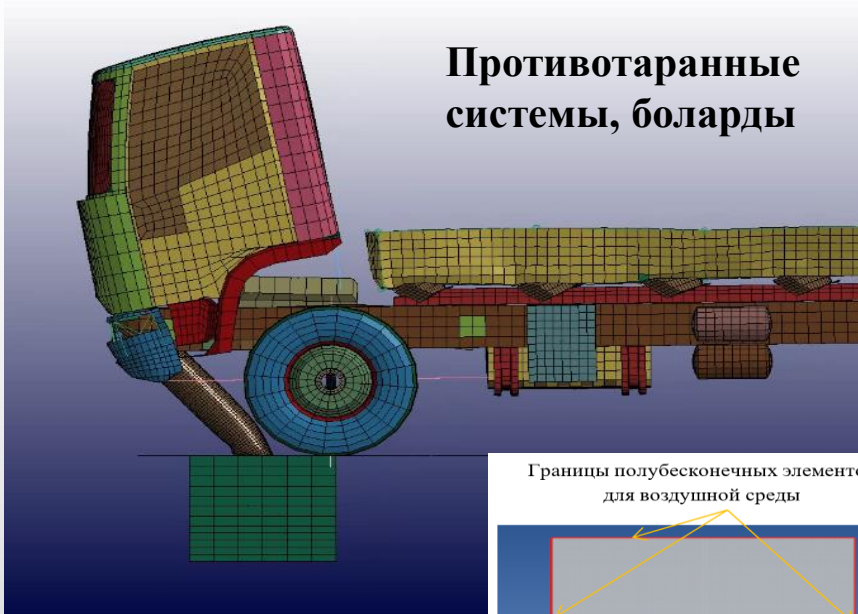
Фронтальные
ограждения



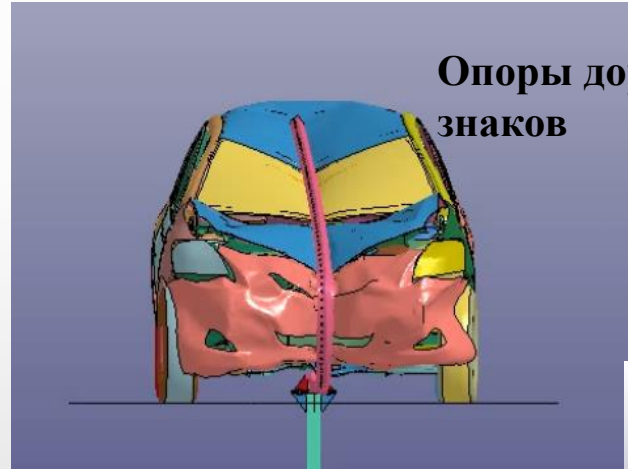
Барьерные
ограждения



Противотаранные
системы, боларды



Опоры дорожных
знаков



Столбы
освещения

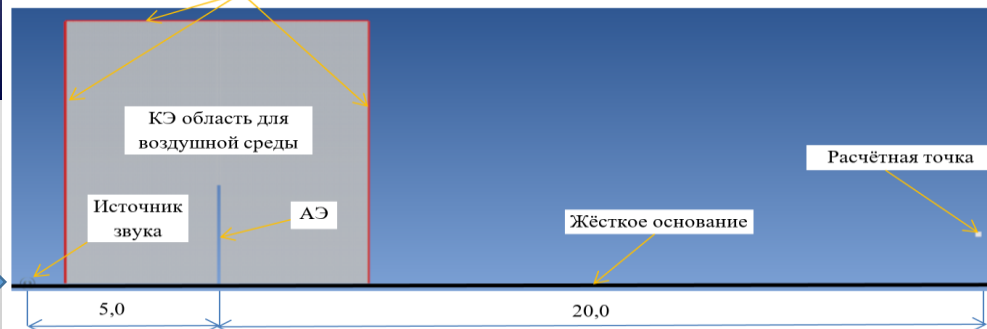


Тросовые
ограждения



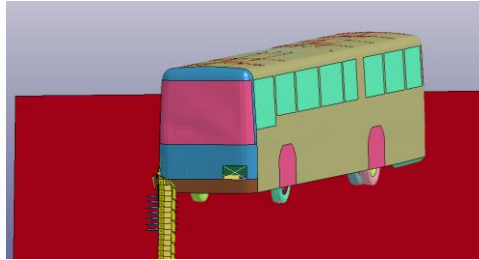
Акустические
экраны оценка
акустической
эффективности

Границы полубесконечных элементов
для воздушной среды

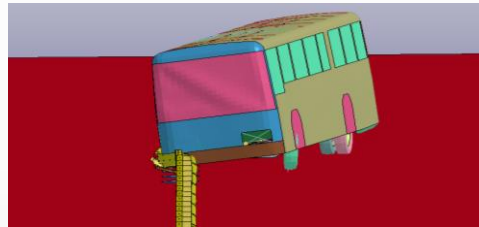


СИСТЕМА ВАЛИДАЦИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ – СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РАЗНЫХ ТИПОВ КОНСТРУКЦИЙ С РЕЗУЛЬТАТАМИ НАТУРНЫХ И СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

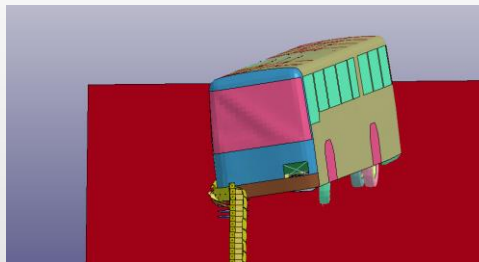
Пример моделирования испытаний на
наезд автобуса на барьерное
металлическое ограждение



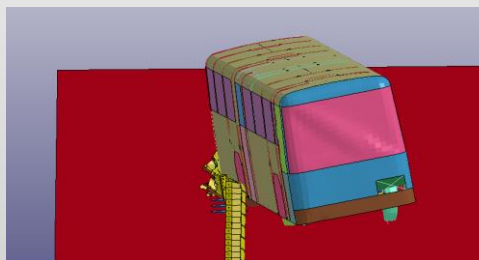
0,3 с



0,5с

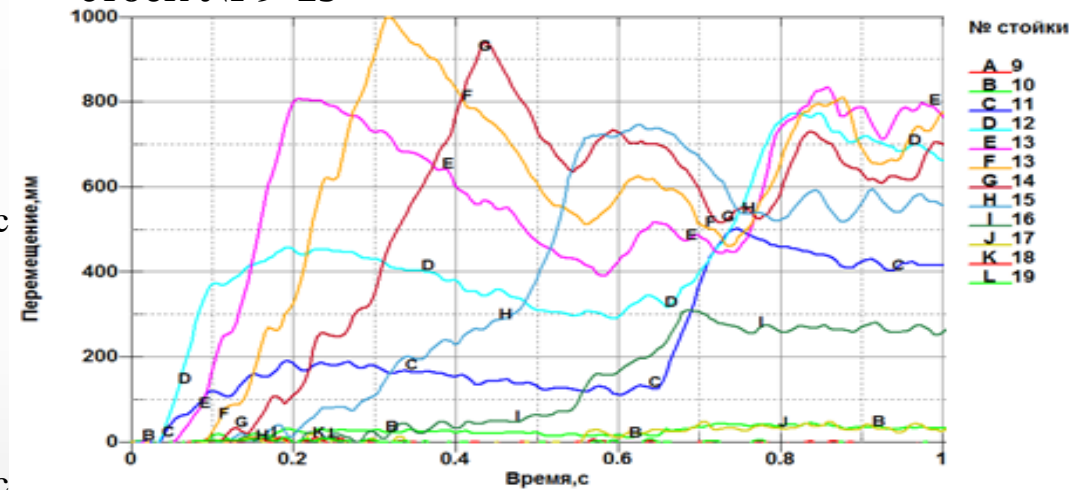


0,7с



0,9 с

Поперечные перемещения верхней
кромки балки ограждения напротив
стоек № 9-19



Расчетный динамический прогиб – 0,99 м
Дин. прогиб по натурным испытаниям – 1,03 м
Различие в результатах составило:

$$\Delta = \frac{1,03 - 0,99}{1,03} = 4,0\%$$

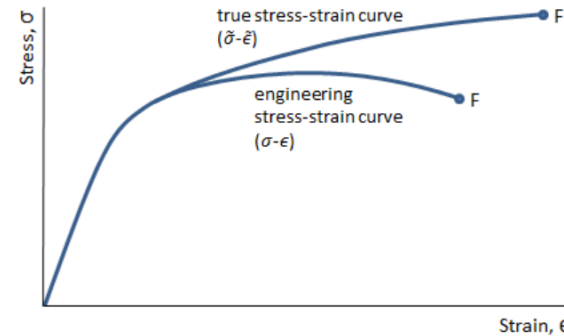
Цифровой двойник – различие ≤ 10%

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ И ВАЛИДАЦИИ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

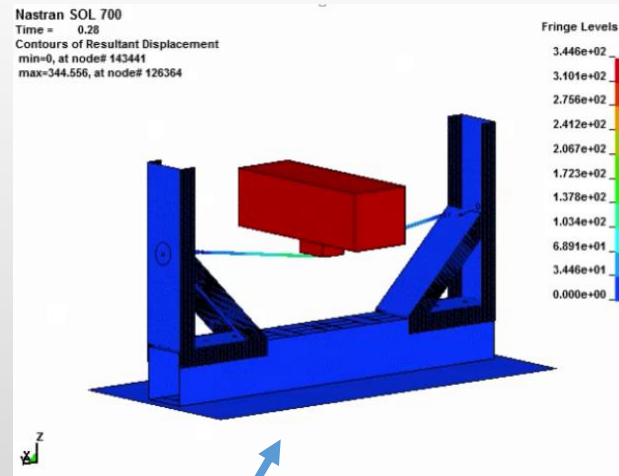
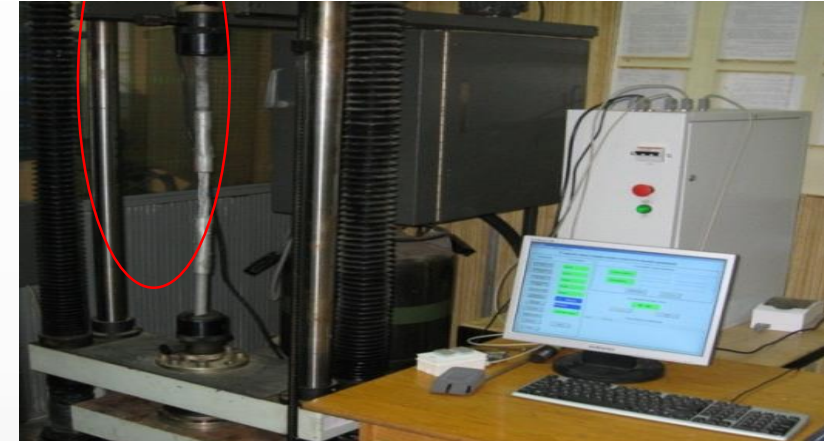


Разработка моделей процессов требует создания банка цифровых двойников для всего спектра материалов и элементов конструкций

- Испытание образцов из материала конструкций для создания цифровых моделей материалов
- Испытание тросов для дорожных ограждений с целью проверки и построения моделей



Учет скорости деформирования

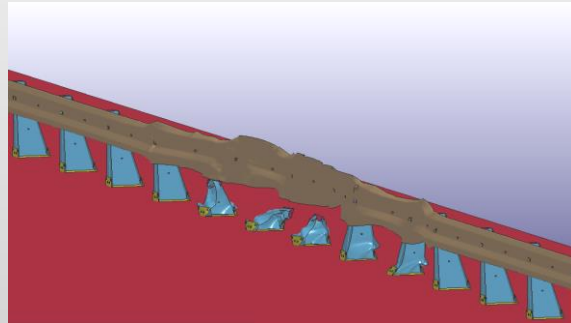
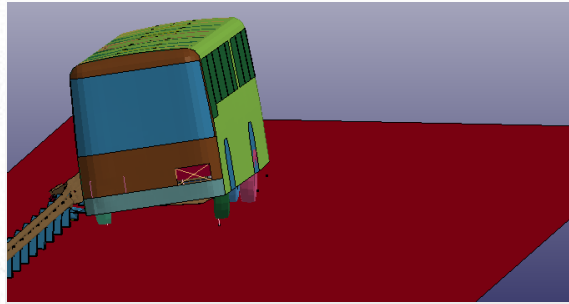
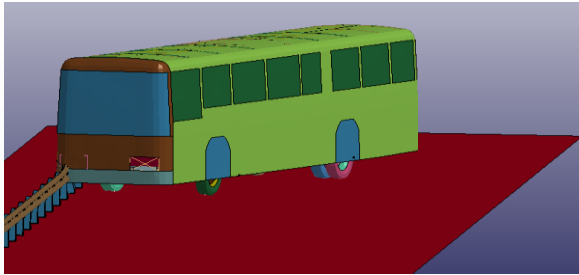


- Испытание грунтов для создания моделей дорожного покрытия

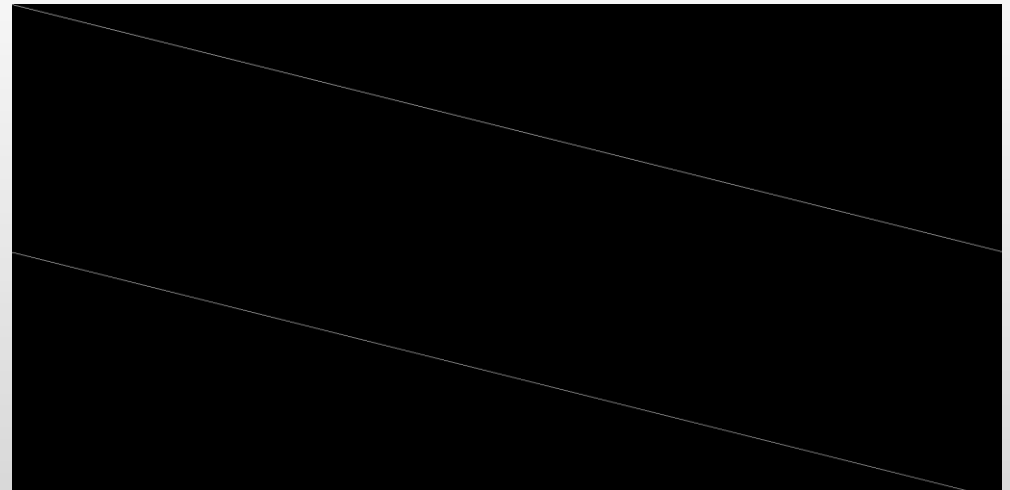


Испытания тросов на удар и цифровой двойник

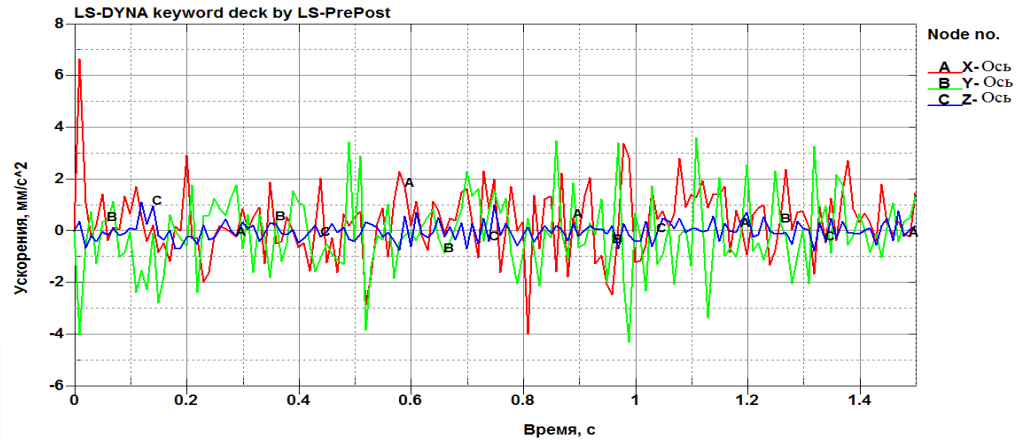
Барьерное дорожное ограждение в процессе и после наезда ТС в те же моменты процесса



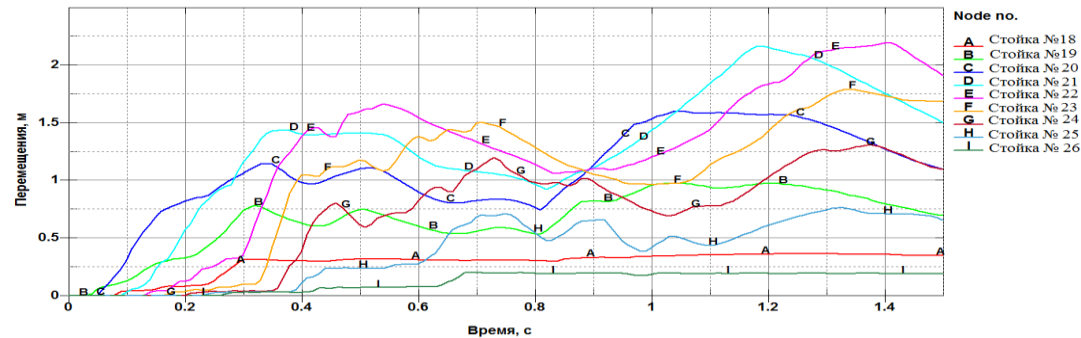
- ❖ визуализация процесса,
- ❖ возможность цифровой оценки всех конструктивно- технологических характеристик конструкций ЭДО,
- ❖ Оценка поведения конструкций ЭДО в процессе краш-теста,
- ❖ нагрузки на пассажиров – оценка травмоопасности!
- ❖ оценка потребительских характеристик ЭДО



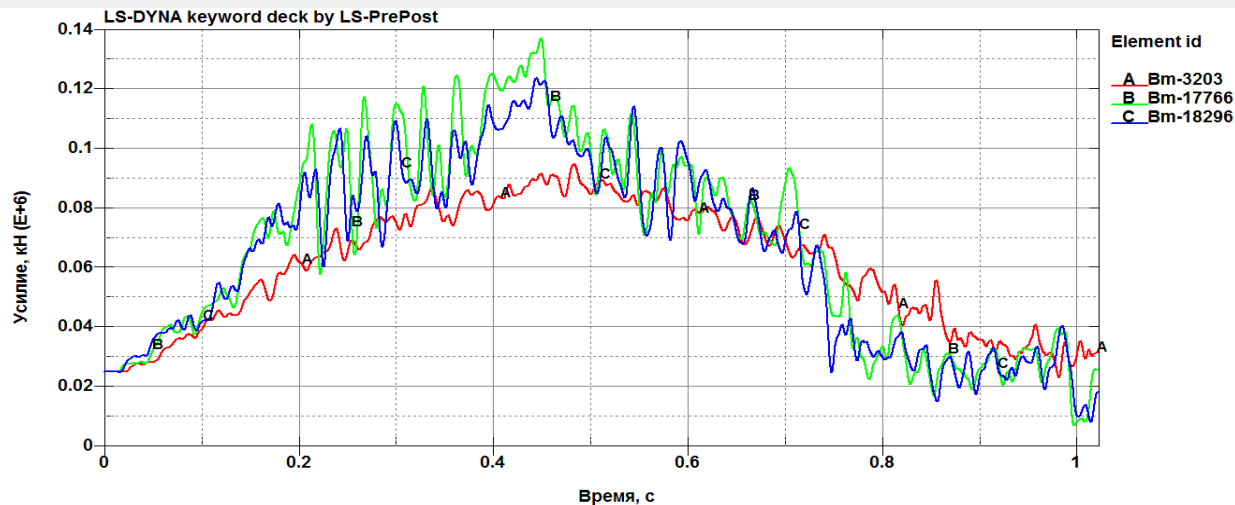
ПРИМЕРЫ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДО, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ ПРИ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЯХ



Ускорения в центре тяжести
ТС во время удара
(отфильтрованные по
частоте 180Гц)



Перемещения в точках
тросов тросового
ограждения в процессе
столкновения с ТС



Изменение продольного
усилия в тросе в
процессе столкновения
с ТС

ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ, СВЯЗАННЫЕ С НОВЫМИ ВЫЗОВАМИ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫМИ РАСШИРЯЮЩИМСЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В АВТОМОБИЛЯХ И В ЭЛЕМЕНТАХ ДОРОЖНОГО ОБУСТРОЙСТВА

- ❖ **необходимость разработки (переработки) стандартов по ЭДО** (технических требований, методов контроля, правил применения и эксплуатации), связанной:

с новыми вызовами, определяемыми расширяющимся использованием искусственного интеллекта, как в автомобилях, так и в элементах дорожной инфраструктуры (дорожного обустройства),

с широким внедрением цифровых технологий – двойников , включая технологии разработки цифрового полигона (test bed) для виртуальных сертификационных испытаний



- ❖ **необходимость разработки на базе цифровых технологий:**

системы ситуационного анализа возможных ДТП с учетом вероятностной природы трафика, спектра автомобилей, характера и категории дорог,



- ❖ **необходимость системных исследований механики столкновений ТС с ЭДО** с учетом расширения спектра моделей отечественных образцов ТС с целью:

- ❖ **создания модулей баз данных, ориентированных на ситуационный анализ ДТП и на использование для проведения виртуальных сертификационных испытаний, с разработкой баз цифровых двойников ЭДО и цифровых двойников отечественных автомобилей по типу DATE BASE NCAC**, с учетом необходимости разработки баз данных материалов конструкций.

РАЗРАБОТКИ ЦИФРОВОГО ПОЛИГОНА (TEST BED) ДЛЯ ВИРТУАЛЬНЫХ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭДО ПО АНАЛОГИИ С ПОЛИГОНОМ ДЛЯ НАТУРНЫХ ПОЛНОРАЗМЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ



Введение виртуальных испытаний как инструмента сертификации продукции в стандарты.

В настоящее время в очень маленьком объеме и очень осторожно виртуальных испытания вводятся в нормативную документацию

Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 014/2011 «О безопасности автомобильных дорог ГОСТы и др. стандарты

Документация:

Обязательным условием сертификации является аккредитация испытательных сертификационных лабораторий

Регулярное (раз в год) проведение сличительных испытаний

На основании Приказа РОСАККРЕДИТАЦИИ Аа-814 от 28.12.2018:

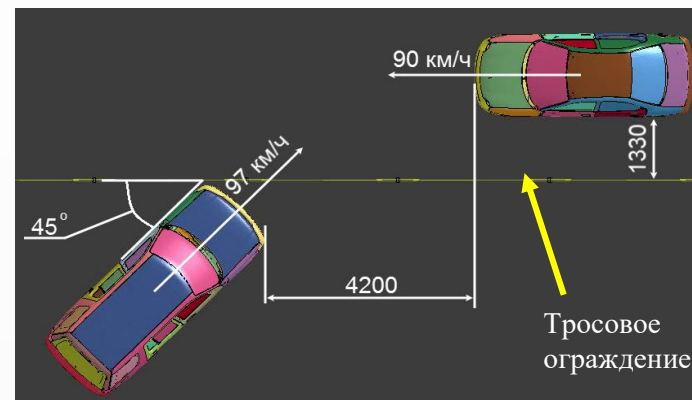
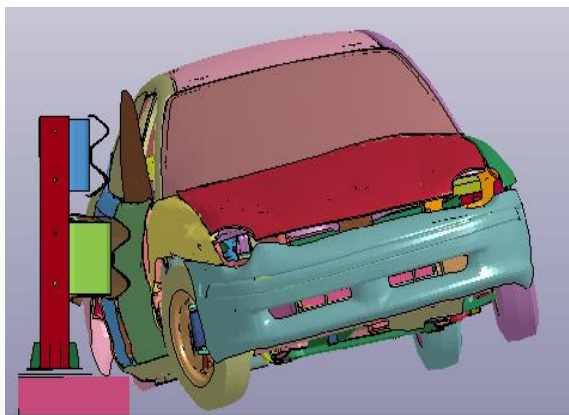
Испытательная лаборатория виртуальных испытаний элементов обустройства дорог ООО «НИИ Механики и проблем качества»

аккредитована в национальной системе аккредитации,
аттестат №RA.RU21HH88

- СТО 45029946-001-2018 «МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ БОКОВЫХ ДОРОЖНЫХ УДЕРЖИВАЮЩИХ ОГРАЖДЕНИЙ»
- ОДМ 218.2.001 – 2014 РОСАВТОДОР «РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ТРОСОВЫХ ОГРАЖДЕНИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (МКЭ)
- ГОСТы 33128 и 33129 ДОРОГИ АВТОМОБИЛЬНЫЕ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ. ОГРАЖДЕНИЯ ДОРОЖНЫЕ. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ И ПРОБЛЕМЫ

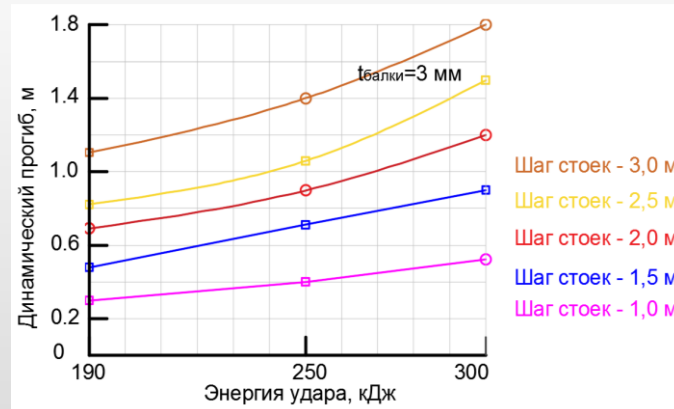
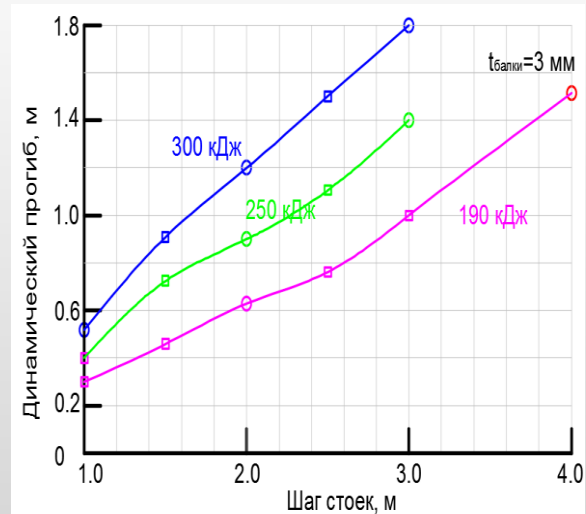
Применение цифровых двойников при оптимизации конструкций ЭДО на примере дорожных ограждений



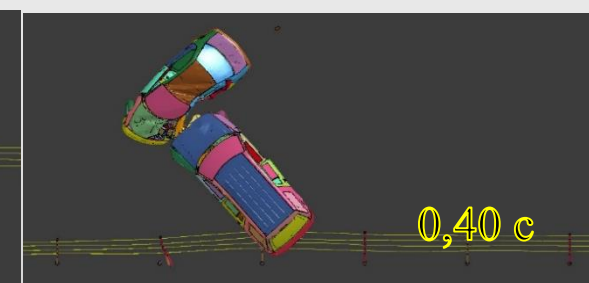
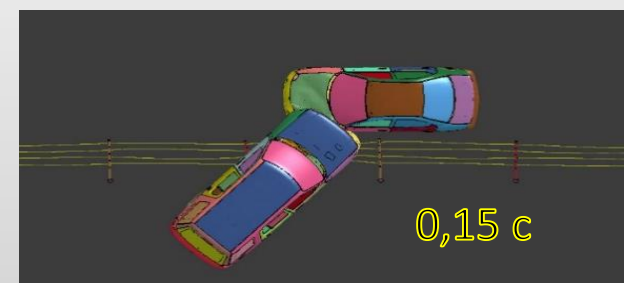
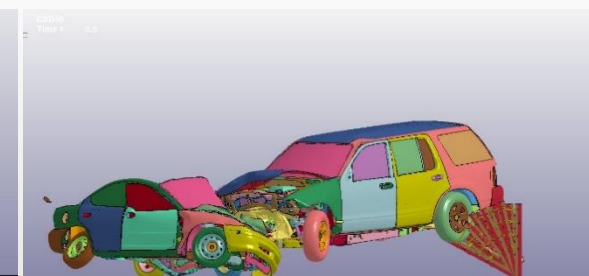
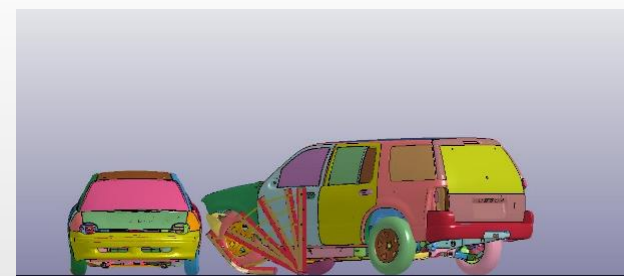
цифровой макет наезда

Развитие:

- ❖ применение средств видеофиксации в ТС и ДО,
- ❖ создание базы 3D моделей ТС



Исследования влияния шага стоек и энергии удара на прогибы



Ситуационные двойники этапов ДТП

II. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЖЕСТКИХ И НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД НА ОСНОВЕ СОЗДАНИЯ 3D ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ С УЧЕТОМ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СЛОЕВ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИЯХ

Дорожные покрытия являются многослойной композитной конструкцией, включающей в себя слои материалов различной толщины, свойства которых существенно нелинейные.

Воздействия на дорожные покрытия включают подвижные и неподвижные нагрузки, сезонные и суточные изменения температуры, осадки основания и т.д. **В настоящее время расчет таких конструкций за рубежом выполняется либо с помощью проблемно-ориентированных программных комплексов, основанных на МКЭ (ISLAB2000), либо с использованием мульти - дисциплинарных комплексов МКЭ, таких как ABAQUS, ANSYS, FLAC_3D и др.**

В России МКЭ для расчета конструкций дорожных покрытий используются эпизодически, как правило, в рамках диссертационных работ для решения небольших по объему конкретных задач.

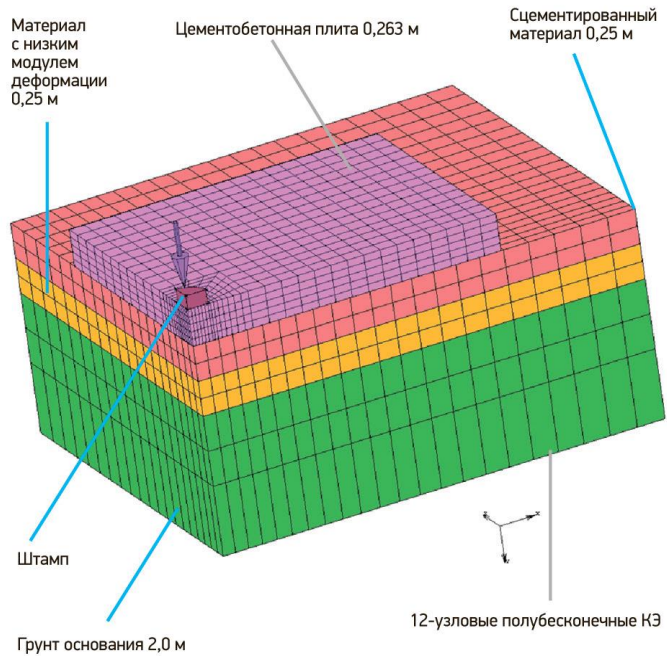
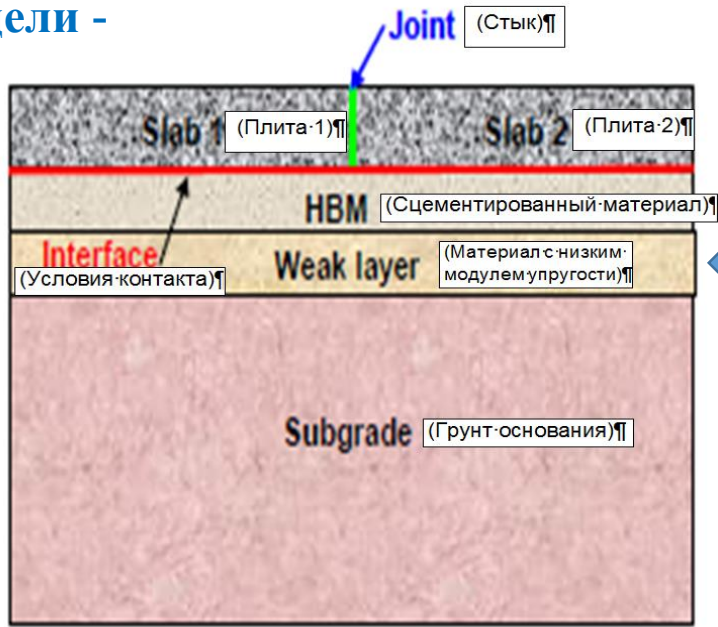
ОБЫЧНО ПРИМЕНЯЮЩИЕСЯ РЕШЕНИЯ:

- **плита на упругом основании (гипотеза Винклера – Циммермана),**
- **плита или покрытие на упругом полупространстве,**
- **решения для многослойных конструкций в упругой постановке**

Задача –

создать комплекс адекватных КЭ-моделей и решений, с анализом по экспериментальным данным и имеющимся расчетам и в дальнейшем создать базы данных моделей для решения практических задач и исследований дорожных одежд

Первые КЭ модели -
валидация

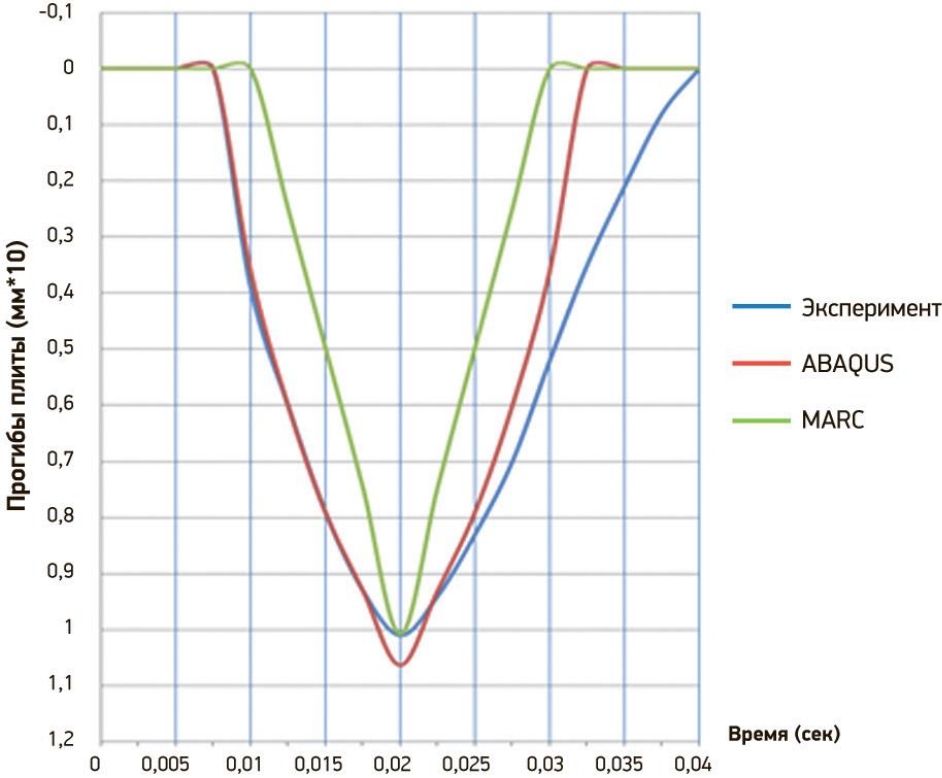


Валидация моделей

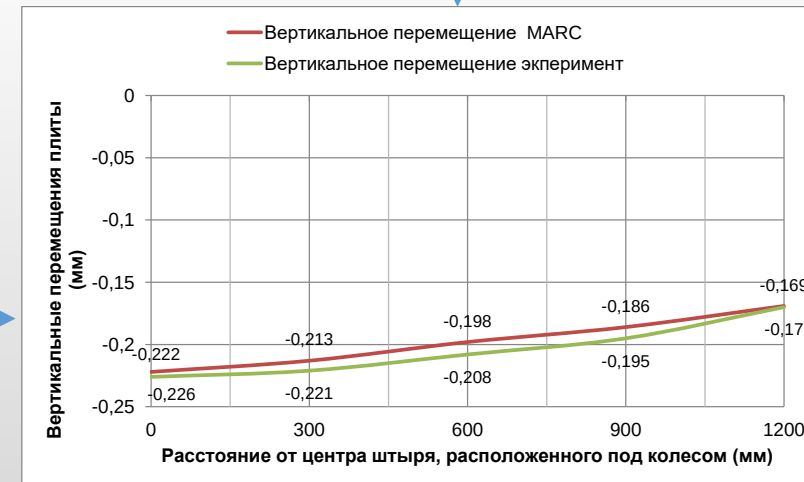
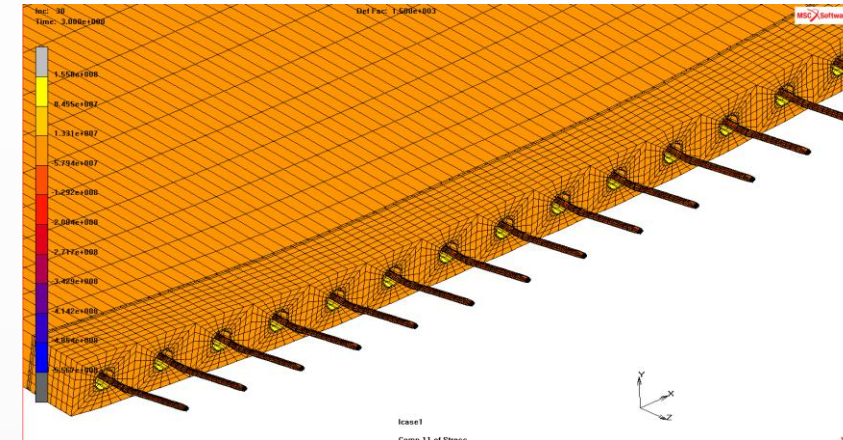
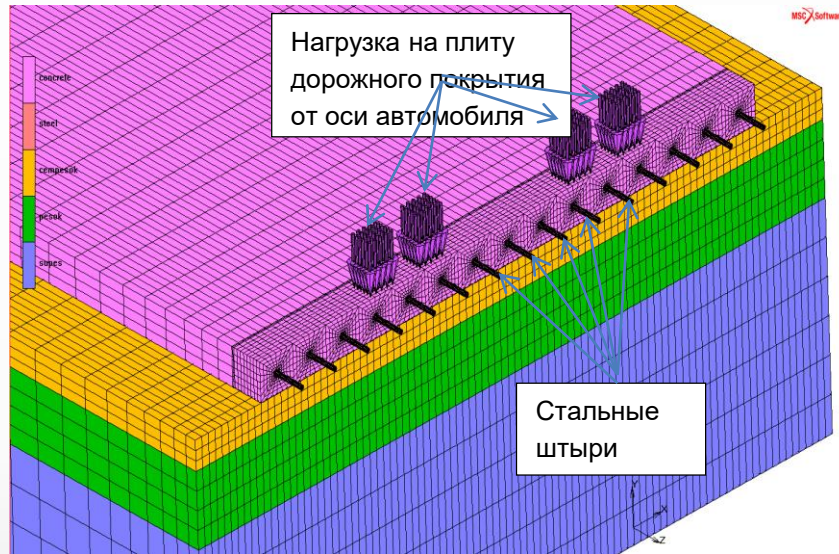
Layer	Thickness (mm)	E (MPa)		ν
		Initial values	Modified	
Concrete	263	54700	48000	0.2
HBM	250	7500	7000	0.25
Weak material	250	105.5	105.5	0.35
Subgrade	2000	300	200	0.45

путем сравнения с экспериментом (TRL, the UK's Transport Research Laboratory with Falling Weight Deflectometer (FWD), и расчетами на комплексе ABACUS

перемещения центральной точки верхней грани плиты в зависимости от времени



РАСЧЁТНО-ПРОЕКТИРОВОЧНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ (ЖЁСТКИХ И НЕЖЁСТКИХ), АРМИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

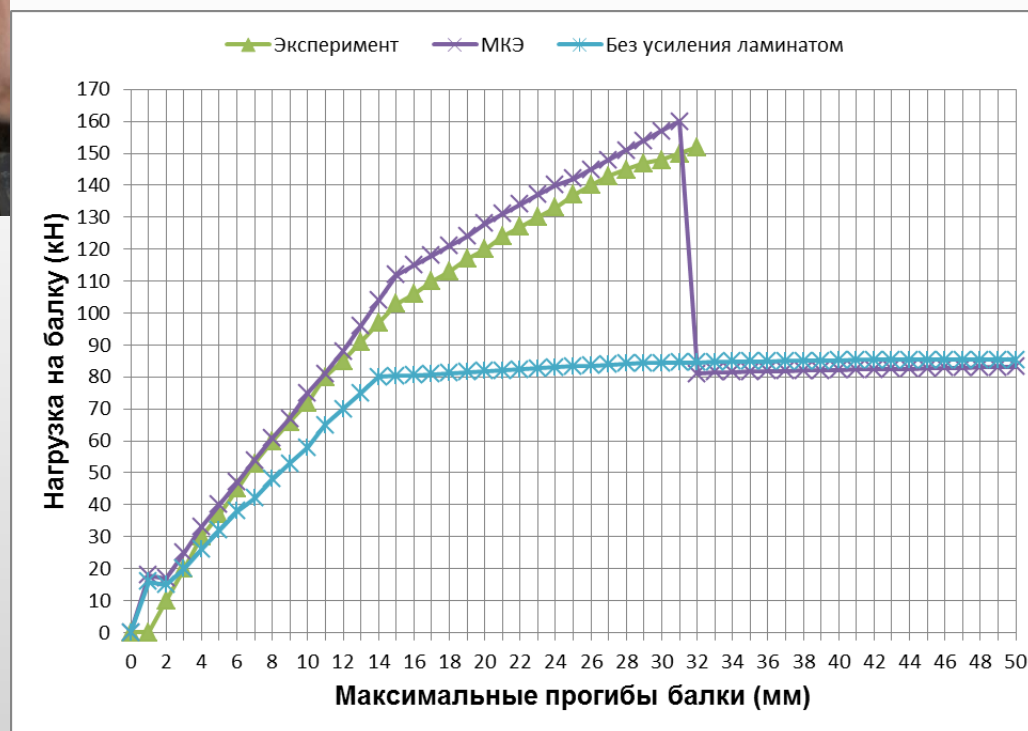
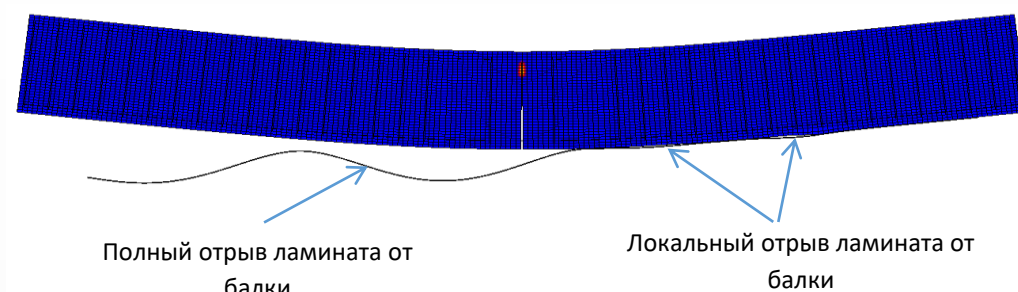


РАСЧЕТ СТРОИТЕЛЬНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УСИЛЕНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ



**АРМИРОВАНИЕ БАЛКИ МОСТА
УГЛЕРОДНОЙ ЛЕНТОЙ**

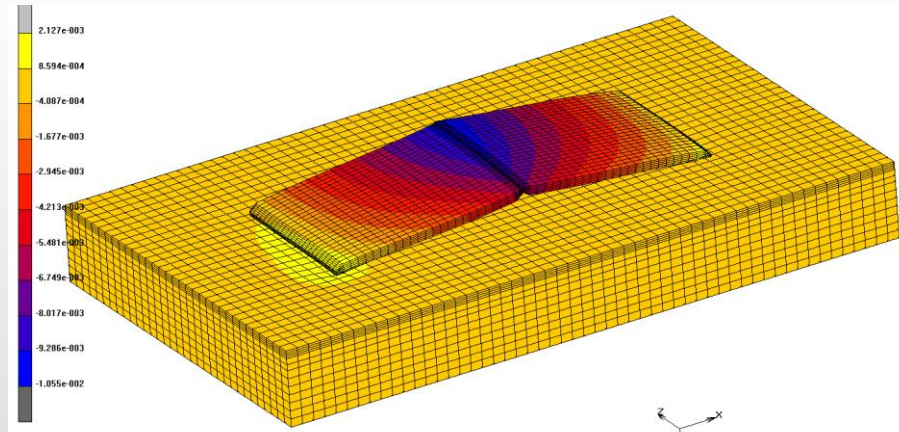
**КЭ – модель двух
опорной балки,
армированной
углеродной лентой**



МОДЕЛИРОВАНИЕ МКЭ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ ПРОДОЛЬНОЙ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛИТ ЖЕСТКИХ ПОКРЫТИЙ



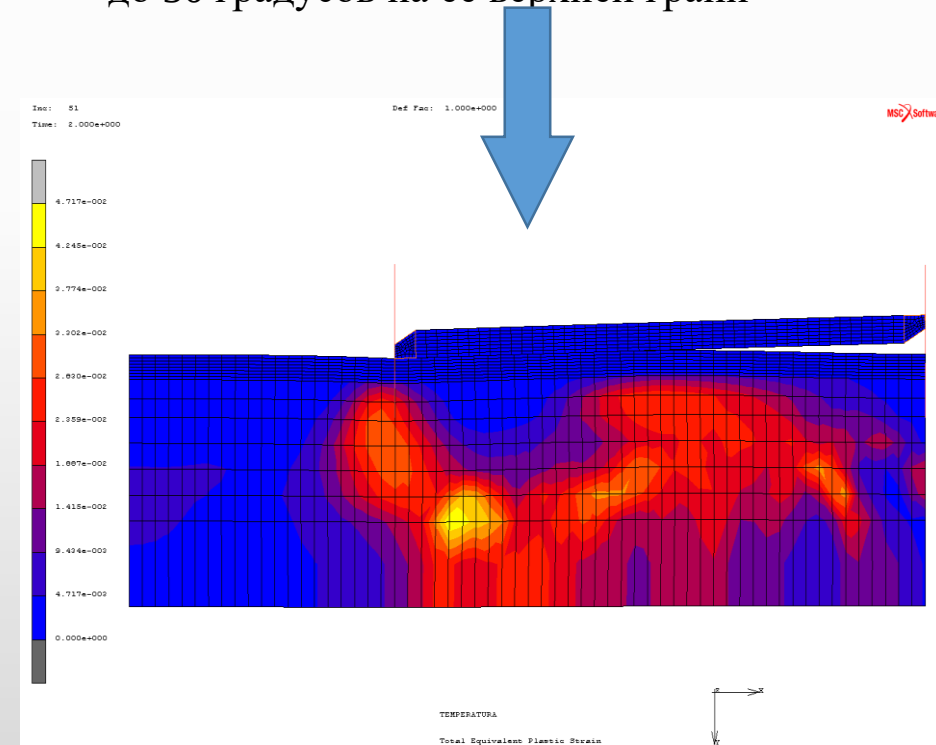
Потеря продольной устойчивости дорожного покрытия со значительным разрушением бетона в окрестности поперечного шва



Вертикальные перемещения плит покрытия от температурного воздействия и давления от колёс задней оси автомобиля

Цементобетонные дорожные покрытия

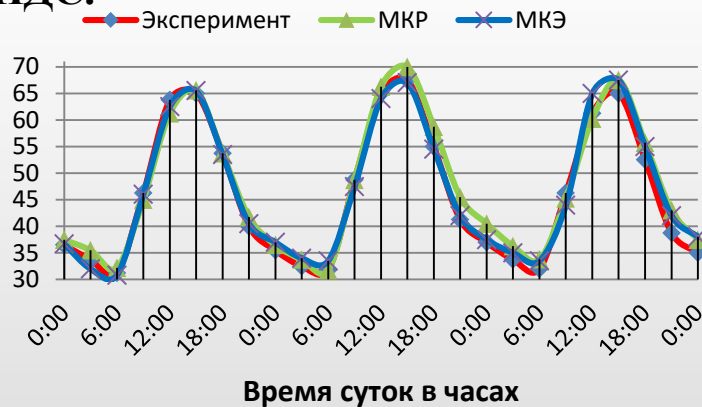
Распределение полных эквивалентных пластических деформаций в плите и основании от действия собственного веса плиты и её неравномерного нагрева от 20 градусов на нижней грани плиты до 50 градусов на её верхней грани



РАЗРАБОТКА КЭ МОДЕЛИ АНАЛИЗА НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ДОРОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ

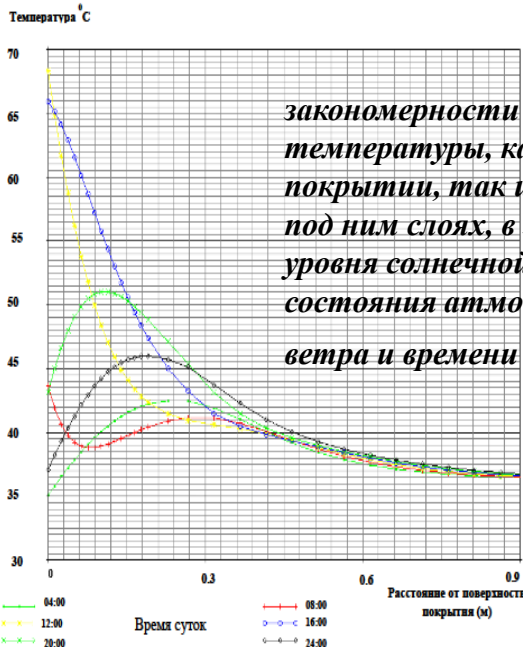
Температурное состояние по толщине конструкции принимается в большинстве расчетных методов стационарным, и температура - линейно меняющейся по толщине слоев дорожной одежды. В то же время нестационарность теплового поля существенна для оценки НДС.

Температура покрытия
в град. С



Изменение температуры на глубине 12,7 мм от поверхности покрытия в течение трёх суток, полученные экспериментально и МКР и методом конечных элементов (МКЭ)

Данные Kamil E. Kaloush, Joby D. Carlson and others; Portland Cement Association. — 2008 – Исследования одномерного теплообмена асфальтобетонного покрытия с окружающей средой в течение трёх суток, сравнение решения МКР с результатами эксперимента.



закономерности изменения температуры, как в дорожном покрытии, так и в расположенных под ним слоях, в зависимости от уровня солнечной радиации, состояния атмосферы, скорости ветра и времени суток.

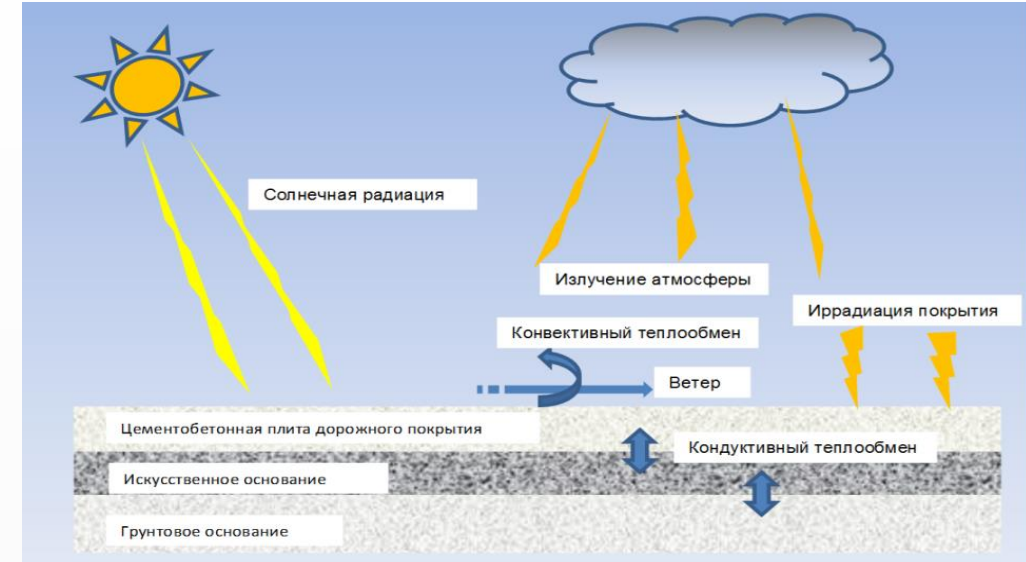
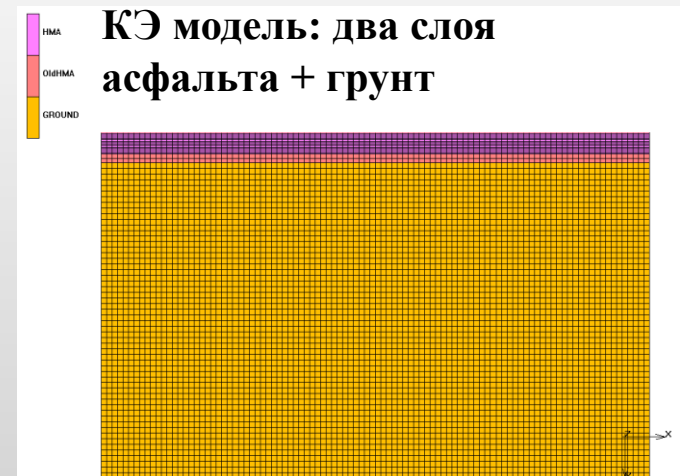


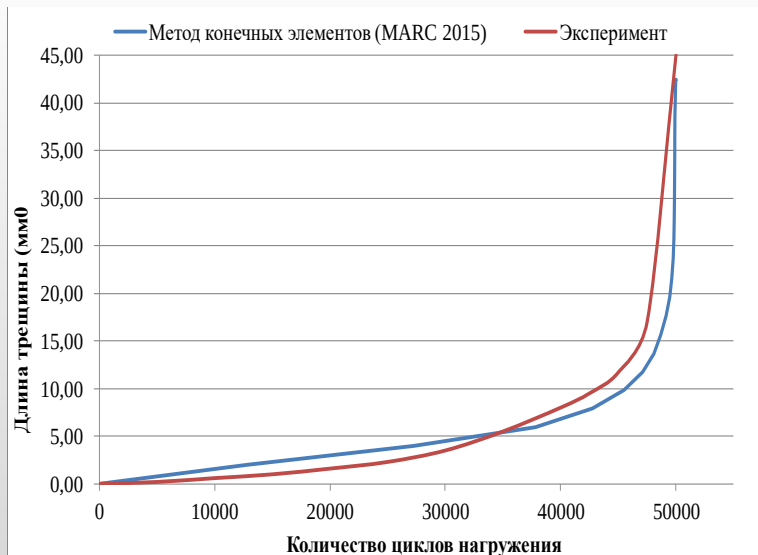
Схема составляющих теплового баланса дорожного покрытия с окружающей средой



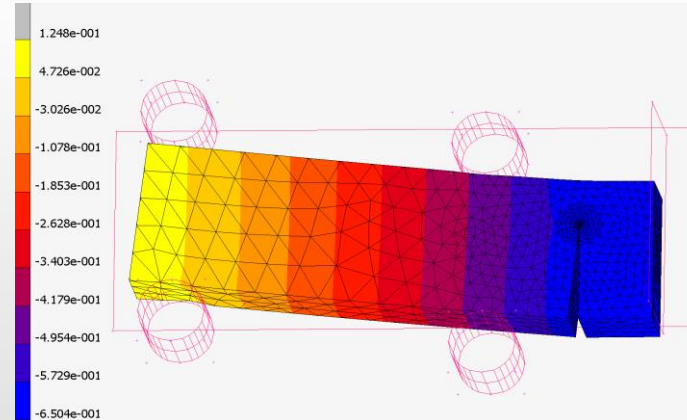
Асфальтобетонные покрытия - КЭ модель для лабораторных испытаний на 4-х точечный изгиб

эмпирическая зависимость между скоростью движения тяжёлого транспортного средства (с нагрузкой на ось равной 10 т) и частотой колебаний асфальтобетонного покрытия (*Mollenhauer K, Wistuba M, Rabe R.*)

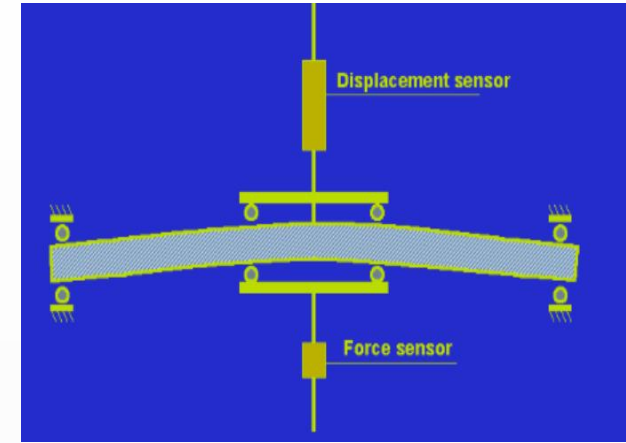
$$f = 0.277 v^{0.944}$$



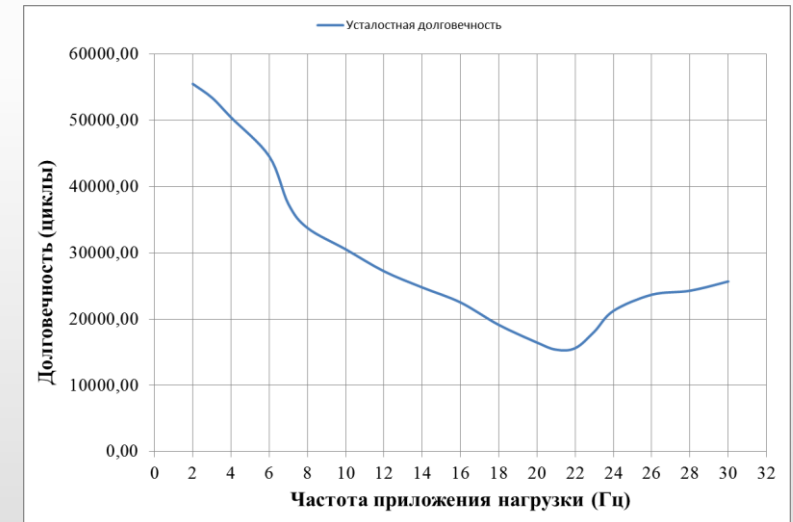
Установка для усталостных испытаний балочного асфальтобетонного образца на 4-х точечный изгиб



перемещения в КЭ модели при частоте нагрузки равной 10 Гц и длине трещины 31,5 мм.



Расчётная схема установки

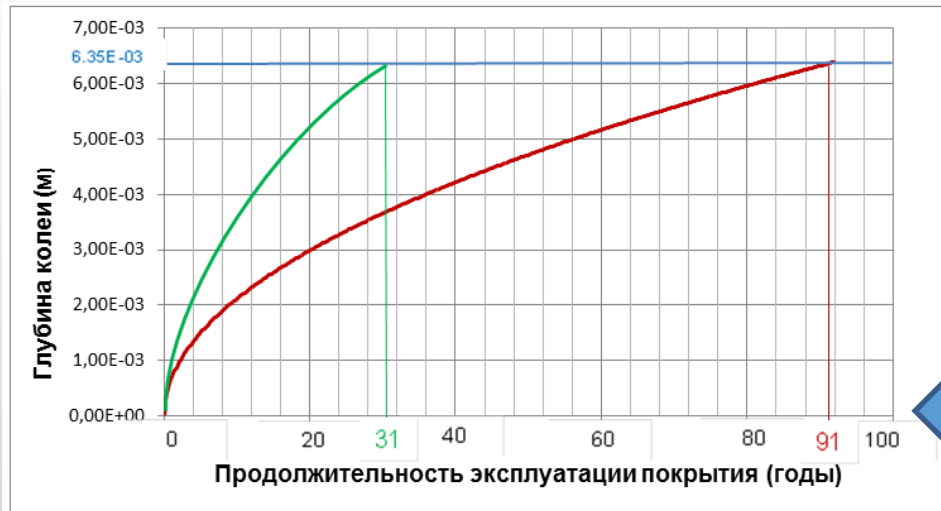


изменение долговечности асфальтобетонного образца в зависимости от частоты приложения нагрузки

РАЗРАБОТКА ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ МОДЕЛИ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ МКЭ



для асфальтобетона
использовалась
обобщённая вязко-
упругая модель
Максвелла

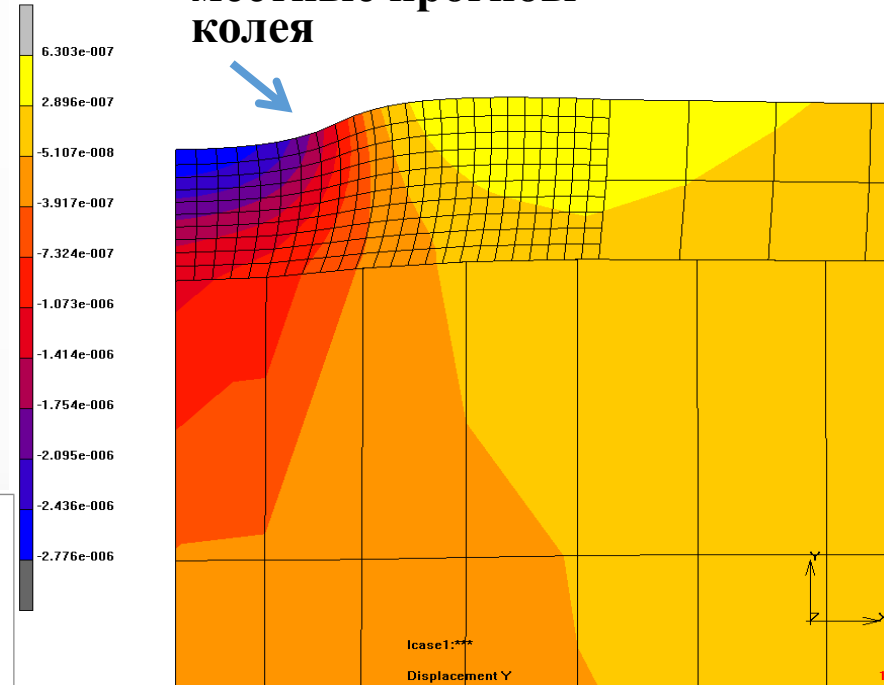


Inc: 100000
Time: 1.000e+003

Def Fac: 1.000e+004

MSC Software

местные прогибы -
колея



Сравнение сроков эксплуатации до образования предельной глубины колеи 6.35 мм, полученное механо-эмпирическим методом (MEPDG, AASHTO) (зелёная кривая) и с помощью КЭ пакета MARC-MENTAT (красная кривая)



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



ООО «НИИ Механики
и проблем качества» (МиПК)



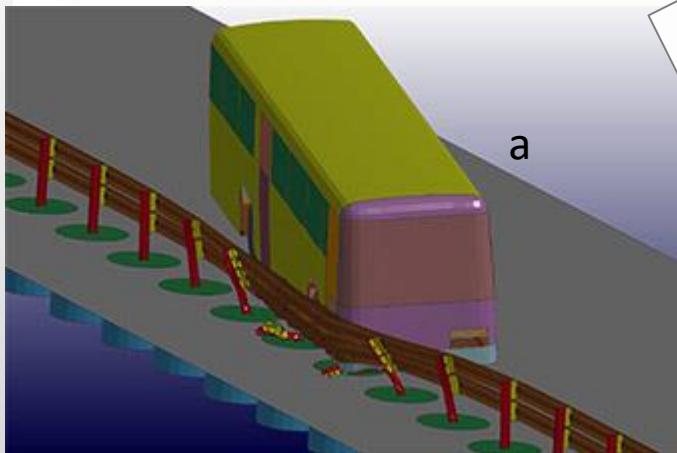
МАДИ

Контакты:

+7 (499) 155-07-23 (общий), +7(499)155 03 03 (секретарь)

www.niimech.ru, demiyanushko@niimech.ru

office@niimech.ru



а

