ОДМ 218.6.016–2015

ОТРАСЛЕВОЙ ДОРОЖНЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ДОКУМЕНТ



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО
РОСАВТОДОР

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ТРОСОВЫХ ОГРАЖДЕНИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (МКЭ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО
(РОСАВТОДОР)

Москва 2017

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)».

Коллектив авторов: д-р техн. наук И.В. Демьянушко, инж. И.А. Карпов, инж. Б.Т. Тавшавадзе.

2 ВНЕСЕН Управлением научно-технических исследований и информационного обеспечения Федерального дорожного агентства.

3 ИЗДАН на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 12.05.2015 № 852-р.

4 ИМЕЕТ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР.

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ.

Содержание

1 Область применения ... 1
2 Нормативные ссылки ... 1
3 Термины и определения ... 1
4 Основные расчетные случаи ... 3
5 Выбор расчетной схемы и метода решения задачи ... 5
6 Рекомендации по созданию конечно-элементной сетки (КЭ сетки) ограждения ... 6
7 Рекомендации по заданию моделей материалов и типов конечных элементов ... 16
8 Задание граничных условий ... 22
9 Задание карт контроля ... 24
10 Пример создания модели ограждения ... 27
Приложение А Карты секций и материалов моделей троса ... 35
Приложение Б Карты секций и материалов моделей стойки и грунта ... 39
Приложение В Карты контроля ... 41
Библиография ... 44

Рекомендации по применению компьютерного моделирования для анализа тросовых ограждений методом конечных элементов (МКЭ)

1 Область применения

1.1 Настоящий отраслевой дорожный методический документ (далее – методический документ) содержит рекомендации по расчетному симуляционному анализу различных конструкций тросовых дорожных ограждений безопасности, а также их элементов на базе расчетно-теоретических и экспериментальных исследований методом конечных элементов с использованием мультидисциплинарного программного комплекса нелинейной динамики на основе этого метода. В нем приведены методы построения расчетных моделей тросовых дорожных ограждений, позволяющих оценивать эффективность работы их отдельных компонентов (анкерных устройств, тросов, стоек).

1.2 Настоящий методический документ применим к расчетному анализу тросовых дорожных ограждений, используемых для обеспечения безопасности дорожного движения, и может быть использован организациями, занимающимися проектированием дорожных ограждений и их контролем при эксплуатации.

2 Нормативные ссылки

В настоящем методическом документе использованы нормативные ссылки на следующие документы:

ГОСТ 33128–2014 Дороги автомобильные общего пользования. Ограждения дорожные. Технические требования

ГОСТ 33129–2014 Дороги автомобильные общего пользования. Ограждения дорожные. Методы контроля

ГОСТ Р 52721–2007 Технические средства организации дорожного движения. Методы испытаний дорожных ограждений

3 Термины и определения

В настоящем методическом документе применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **выбег автомобиля после прекращения контакта с ограждением:** Процесс неуправляемого движения транспортного средства после прекращения контакта с ограждением.

3.2 **динамический прогиб ограждения:** Наибольшее горизонтальное смещение лицевой поверхности ограждения в поперечном направлении относительно лицевой поверхности недеформированного ограждения при наезде на него транспортного средства (автомобиля).

3.3 **индекс тяжести травмирования:** Показатель, характеризующий инерционные перегрузки, действующие на пассажиров транспортных средств при взаимодействии транспортного средства с ограждением.

3.4 **метод конечных элементов:** Метод расчетного инженерного анализа конструкций, позволяющий расчетным путем моделировать их поведение при статическом и динамическом, в том числе ударном, нагружениях.

3.5 **ограждения дорожные:** Устройства, предназначенные для обеспечения движения транспортных средств с наименьшими рисками столкновений и съездов с дорог, предотвращения переезда через разделительную полосу, столкновения со встречным транспортным средством, наезда на массивные препятствия и сооружения, расположенные на обочине в полосе отвода дороги, на разделительной полосе, снижения риска возможности падения пешеходов с дороги или мостового сооружения, а также для упорядочения движения.

3.6 **рабочая ширина ограждения:** Максимальное динамическое боковое смещение кузова транспортного средства или фрагмента дорожного ограждения (в зависимости от места его установки) относительно лицевой поверхности недеформированного дорожного ограждения.

3.7 **тип элемента:** Совокупность параметров конечного элемента, определяющих базисные функции элемента и его топологию.

3.8 **топология элемента:** Совокупность параметров конечного элемента, определяющих его форму.

3.9 **угол наезда на ограждение:** Угол между проекциями на плоскость дороги продольных осей транспортного средства и недеформированного ограждения в начале контакта транспортного средства с ограждением.

3.10 **удерживающая способность ограждения:** Диапазоны значений энергии удара, по которым выбирают конструкции ограждений для применения в тех или иных дорожных условиях.

3.11 **шаг интегрирования по времени:** Приращение времени за одну итерацию.

4 Основные расчетные случаи

Основной целью расчетного анализа является получение требуемых характеристик изделия при минимальном возможном количестве натурных испытаний. Поэтому в начале будут рассмотрены основные потребительские параметры, которым должно удовлетворять тросовое ограждение, а затем – основные расчетные случаи, позволяющие определять эти параметры.

4.1 Полномасштабный краш-тест

4.1.1 Режимы испытаний ограждений

Согласно техническому регламенту [1], ГОСТ Р 52721–2007, ГОСТ 33128–2014, а также методическим рекомендациям [2] все дорожные удерживающие ограждения должны проходить натурные испытания. Одним из основных видов испытаний, определяющих пригодность ограждения для установки на дороге, является полномасштабный краш-тест. Цель этих испытаний состоит в определении фактических показателей потребительских характеристик: удерживающей способности, динамического прогиба, рабочей ширины ограждения, а также безопасности этого ограждения для людей, находящихся в удерживаемом автомобиле, в первую очередь – индекса тяжести травмирования. Испытание осуществляется путем наезда на ограждение, установленного на испытательной площадке, транспортного средства (ТС) определенной массы, с определенной скоростью движения под заданным углом. Основные режимы испытаний и соответствующие им уровни удерживающей способности приведены в ГОСТ Р 52721–2007, ГОСТ 33128–2014, ГОСТ 33129 – 2014.

4.1.2 Критерии оценки дорожных ограждений

4.1.2.1 Работа ограждения в процессе испытания должна удовлетворять следующим основным критериям:

- безопасности:
  - пассажиров,
  - транспортного средства,
  - пешеходов;
- надежности работы ограждения.

4.1.2.2 Оценку безопасности людей (пассажиров и водителя), находящихся в автомобиле при наезде на ограждение, проводят по обобщенному показателю инерционной перегрузки в центре масс автомобиля, которым является показатель индекса тяжести травмирования И

$$И=\left[\left(\frac{N_x}{12}\right)^2+\left(\frac{N_y}{9}\right)^2+\left(\frac{N_z}{10}\right)^2\right]^{0,5}, \qquad (1)$$

где N_x, N_y, N_z – средние значения инерционных перегрузок на рассматриваемом участке вдоль соответственно продольной, поперечной и вертикальной осей автомобиля, проходящих через его центр масс.

Как следует из формулы (1), индекс И будет определен, если известны ускорения в центре масс автомобиля.

4.1.2.3 Безопасность транспортного средства, являющуюся еще и экономической характеристикой, оценивают по деформации салона (кабины) через коэффициенты сохранности внутренних размеров. Получение этого параметра возможно при изменении геометрии кабины в случае, если расчетная модель автомобиля будет деформируемой. В случаях, когда значение этого параметра не определять не требуется, возможно применение твердотельной модели автомобиля.

В ГОСТ Р 52721–2007, ГОСТ 33128–2014 и ГОСТ 33129–2014 установлены основные потребительские характеристики дорожных ограждений при наезде:

- не должно быть разрыва рабочих элементов;
- не должны происходить разрушения оснований стоек или их вытягивание из земляного полотна, а также повреждения плиты в месте анкеровки ограждений, разрывы анкеров закладных деталей;
- не должно происходить отрыва и вылета тяжелых частей ограждения на проезжую часть.

4.1.2.4 На основе проведенных испытаний выделены следующие основные потребительские характеристики дорожных ограждений: удерживающая способность, динамический прогиб, рабочая ширина и индекс тяжести травмирования.

Поэтому в задаче расчетного симуляционного моделирования полномасштабного краш-теста ограждения можно выделить следующие его основные параметры, которые необходимо получить в результате расчета:

• прогиб ограждения ($Д_п$);

- ускорения в центре масс автомобиля (N_x, N_y, N_z);
- деформацию салона автомобиля;
- выбег автомобиля;
- рабочую ширину ограждения.

4.2 Моделирование наезда тележки на ограждение

В некоторых случаях в соответствии с ГОСТ 33129–2014 проводятся испытания не всего ограждения, а только его частей. При этом обычно используется наезд ударной тележкой (рисунок 1).

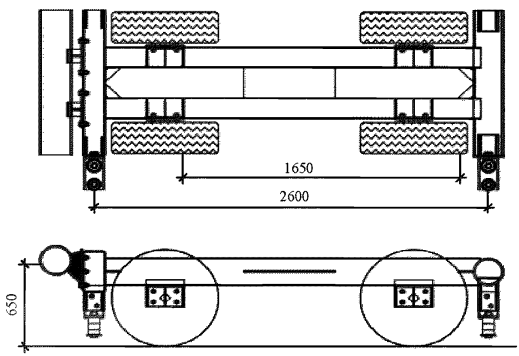


Рисунок 1 – Ударная тележка
(размеры даны в миллиметрах)

Наиболее типичным случаем использования тележки является замена одной конструкции стойки на другую или установка ограждения в грунт, отличный от того, в котором проводились его натурные испытания.

5 Выбор расчетной схемы и метода решения задачи

5.1 Процесс столкновения автомобиля с ограждением характеризуется сложной геометрической формой ударяющихся объектов и сложными граничными условиями, высокими степенями геометрической и физической нелинейности, скоростью протекания процесса. Поэтому в качестве метода решения задачи выбран численный метод – МКЭ. Основные уравнения метода представлены в работах [3, 4]. Базовое уравнение МКЭ следующее:

$$[m]\{\ddot{x}\}+[c]\{\dot{x}\}+[k]\{x\}=\{F\}, \quad (2)$$

где m – матрица масс модели;

F – матрица сил;

c – матрица вязкости;

k – матрица жесткости;

$x, \dot{x}, \ddot{x}$ – матрицы соответственно перемещений, скоростей и ускорений.

5.2 Из существующих методов решения уравнения (2) был выбран явный метод, в котором решение этого уравнения имеет следующий вид:

$$x_{n+1} = x_n + \Delta t \times \dot{x}_n + \frac{\Delta t^2}{2}\ddot{x}_n, \quad (3)$$

$$\dot{x}_{n+1} = \dot{x}_n + \frac{\Delta t}{2}\left(\ddot{x}_n + \ddot{x}_{n+1}\right), \quad (4)$$

где Δt – шаг по времени, с;

n – номер шага.

Среди существующих программ, реализующих явный метод, обычно используется программный комплекс Ls-Dyna [5] (все дальнейшие данные и карты приведены именно для него).

Альтернативами Ls-Dyna могут быть программные комплекты MSCDytran, Altair Radioss, Abaqusexplicit, Nastranexplicit, Pamcrash. При использовании этих и других программных комплексов все приведенные в настоящем методическом документе подходы моделирования остаются актуальными.

6 Рекомендации по созданию конечно-элементной сетки (КЭ сетки) ограждения

Создание конечно-элементных моделей (КЭ моделей) ограждений и их элементов состоит из нескольких основных последовательно выполняемых этапов: построения геометрической модели ограждения и КЭ сетки, задание моделей материала, типов элементов, граничных условий и карт контроля. Рассмотрим процесс задания КЭ сетки на основных элементах ограждения.

Объектами расчета являются тросовые ограждения – это один из видов дорожных ограждений, основным рабочим элементом которых выступает трос. Типичная схема такого ограждения включает следующие основные компоненты: тросы, стойки, гильзы и якорные (анкерные) устройства (рисунок 2).

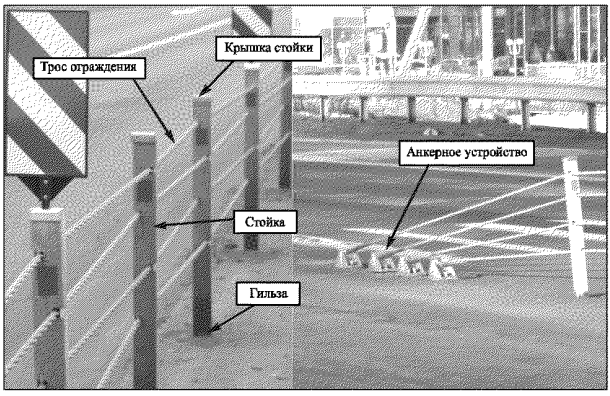


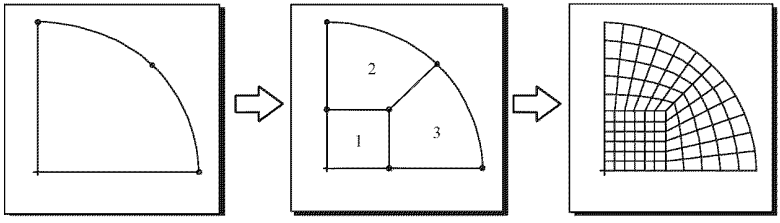
Рисунок 2 – Основные элементы тросового ограждения

Характерными особенностями работы тросовых ограждений являются небольшие перегрузки, воздействующие на водителя в процессе удара о них, и высокая энергопоглощающая способность ограждения. В качестве конструкции для создания расчетных моделей выбрана конструкция ограждения, разработанная МАДИ совместно с ООО «НПО «Медиана» [6].

6.1 Общие требования к КЭ модели

6.1.1 Требования к геометрии КС модели

Геометрическую модель ограждения необходимо подготовить для разбиения на конечные элементы. Из модели должны быть удалены мелкие отверстия и фаски, существенно не влияющие на жесткость конструкции и форму потери устойчивости. Поверхности сложной формы следует разбить на более простые. Пример такого разбиения приведен на рисунке 3.



1, 2, 3 – номера плоскостей

Рисунок 3 – Выделение простых фигур при построении КЭ сетки

В результате такого упрощения поверхности сетка получается регулярной, так как каждая из полученных поверхностей имеет четыре грани. Регулярные сетки уменьшают продолжительность расчетов, а также лучше отображают формы потери устойчивости, поэтому там, где это возможно, необходимо максимально упрощать разбиваемые поверхности.

6.1.2 Требования к размеру элемента КС сетки

Конечно-элементная сетка определяет как качество решения, так и время расчета. Основным условием, обеспечивающим стабильность решения явным методом, является условие Куранта – Фридрикса – Леви. Для стабильности решения в этом методе шаг по времени должен быть меньше времени прохождения волны возмущения (деформаций) по элементу

$$\Delta t=\frac{l_c}{c}, \qquad (5)$$

где l_c – характерный размер элемента, м;

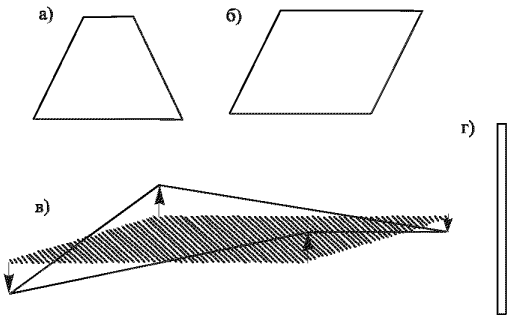
c – скорость звука в среде, м/с.

Из формулы (5) следует, что уменьшение размеров элемента, с одной стороны, ведет к существенному увеличению длительности процесса счета (без изменения других параметров). С другой стороны, грубая сетка не отображает потери устойчивости детали или резкое изменение напряжений в рассматриваемой зоне. Рекомендуемый размер оболочечного элемента при моделировании ограждений 10 мм, в этом случае шаг по времени составит 10^{-6}с.

6.1.3 Требования к форме элементов

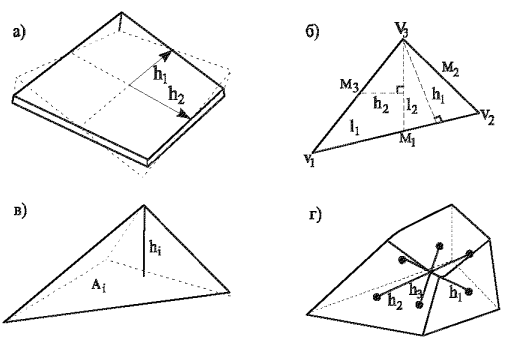
Для оценки качества сетки рассматриваются пять основных параметров: параметр соотношения сторон (ПОС) элемента, якобиан, конусность, скошенность, коробление. Искажения формы элемента, которые характеризуют эти параметры, приведены на рисунке 4.

Параметр соотношения сторон элемента характеризует степень отклонения его формы от идеальной (квадрата, равнобедренного треугольника, куба, правильной пирамиды и т.д.). Оптимальным значением параметра ПОС является 1, он определяется как отношение максимального характерного размера элемента к минимальному с учетом коэффициента формы. Характерные размеры основных элементов представлены на рисунке 5.



а – конусность, б – скошенность, в – коробление, г – ПОС

Рисунок 4 – Дефекты формы элементов



а – прямоугольный; б – треугольный; в – трапециевидный;
г – восьмиузловой элементы

Рисунок 5 – Характерные размеры элементов различных типов

Например, для прямоугольного элемента

$$ПОС=h_2/h_1, \quad (6)$$

где h_1, h_2 – соответственно меньшее и большее из расстояний между серединами сторон.

Якобиан формируется для каждого элемента в процессе вычислений и непосредственно влияет на точность результатов. Рекомендуемое значение этого параметра равно 0,6.

Рекомендуемые значения параметров, характеризующих качество сетки, приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1 – Параметры качества сетки

Параметр качества сетки	Рекомендуемое значение
ПОС	Не более 10
Якобиан	Не менее 0,6
Конусность	Не более 45
Скошенность	Не более 0,7
Коробление	Не более 10

Количество треугольных элементов должно составлять менее 10% от общего числа элементов в модели, так как они придают дополнительную жесткость системе.

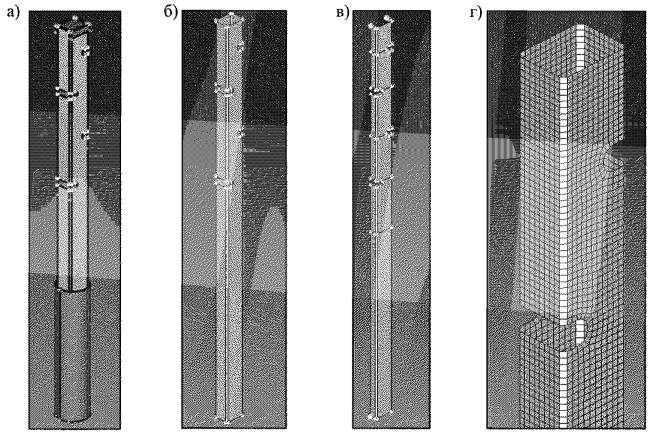
6.1.4 Общие требования к КЭ сетке

Основные требования к КЭ сетке:

- сетка должна иметь регулярную структуру там, где это возможно; линии сетки должны быть параллельны или перпендикулярны границе поверхности;
- параметры, характеризующие качество сетки, должны укладываться в диапазон, указанный в таблице 1;
- размер элемента должен быть такой, чтобы шаг по времени без масштабирования не превышал 10^{-6} с;
- количество треугольных элементов не должно превышать 10%.

6.2 Рекомендации по созданию КЭ сетки на основных элементах ограждения

Выбираются базовые геометрические элементы ограждения – геометрические модели частей (элементов) ограждения, в результате копирования которых можно получить все ограждения. В рассматриваемом примере моделирования тросового ограждения базовыми элементами были выбраны стойка ограждения, ее крышка и гильза (рисунок 6, а).



а – геометрическая модель; б – оболочечная модель; в – геометрия стойки, упрощенная с целью разбиения; г – КЭ сетка стойки

Рисунок 6 – Модели стойки ограждения

6.2.1 Создание КЭ сетки стойки ограждения

6.2.1.1 Стойка тросового ограждения обычно представляет собой тонкостенный профиль различного очертания [2]. Ее оптимально моделировать оболочечными элементами. Оболочку из твердого тела получают путем выделения срединной поверхности с помощью операции midsurface [5]. В результате этой операции будет получена геометрия модели стойки без толщины, используемая для построения 2D сеток (рисунок 6, б).

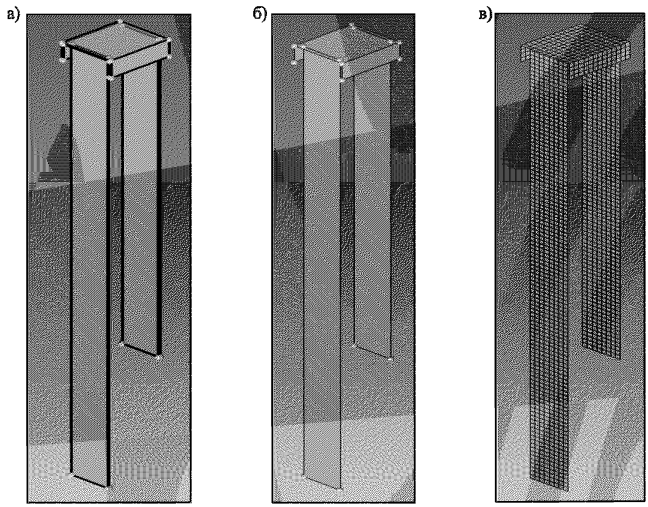
Если стойки, как в рассматриваемом примере, симметричны относительно центральной плоскости, проходящей через отверстия, для получения более равномерной сетки ее необходимо разрезать вдоль и разбивать только оставшуюся половину. Для разделения поверхностей используется инструмент редактирования геометрии – split. Пример геометрической модели, оптимизированной для построения сетки, показан на рисунке 6, в.

6.2.1.2 Для получения регулярных сеток на окружности вокруг вырезов были спроецированы середины их вершин на противоположные плоскости и поверхности разрезаны по этим точкам. В данном случае скругления отверстий не убирались, так как они достаточно велики и по значению близки к выбранному размеру элемента (в приведенном

примере 7 мм). Но если для их отображения необходим слишком маленький размер элемента (по сравнению с выбранным шагом), отверстия необходимо убрать. На рисунке 6, г представлена КЭ сетка рассмотренного элемента. Следует отметить, что для точного описания процесса разрушения детали сетка должна быть достаточно мелкая, что является одним из наиболее важных критериев подбора ее размера наряду с отображением форм потери устойчивости.

6.2.2 Создание КЭ сетки крышки стойки ограждения

Крышка стойки тросового ограждения также, как и стойка, изготавливается из тонколистовой стали, ее модель рассматривается как оболочка. Один из вариантов модели крышки и ее срединная поверхность показаны на рисунке 7.



а – геометрическая; б – упрощенная геометрическая; в – КЭ модель

Рисунок 7 – Модели крышки стойки ограждения

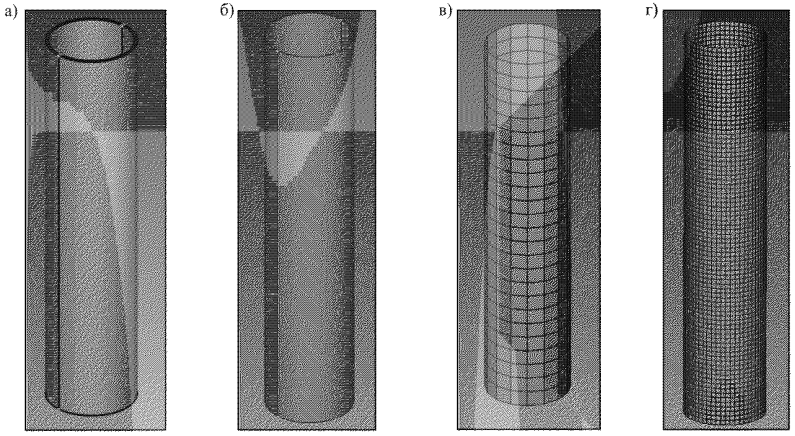
Последовательность разбиения крышки на конечные элементы следующая: первоначально нужно разбить крышку на несколько простых поверхностей, для этого целесообразно провести разрезы по линии присоединения нижних частей крышки и попробовать построить сетку. Если построитель не справляется, то необходимо дальнейшее упрощение поверхности.

6.2.3 Создание КЭ сетки гильзы ограждения

Модель гильзы ограждения представлена на рисунке 8, а. Так как гильза устанавливается непосредственно в грунт (дорожное покрытие) или размещается на бетонном фундаменте, то возможны различные варианты создания КЭ модели гильзы с окружающим пространством. Ниже рассмотрены два варианта разбиения гильзы на конечные элементы в зависимости от модели грунта.

При моделировании грунта твердотельными элементами необходимо, чтобы грани элементов гильзы и грунта совпадали (см. рисунок 8, а). В случае их несовпадения узлы гильзы будут изначально проникать в грунт и создавать напряжения, фактически несуществующие.

При моделировании ограждения, установленного в капитальную дорожную одежду, сетка гильзы должна быть в несколько раз меньше сетки грунта. В качестве материала гильз используют модель абсолютного жесткого тела.



а – геометрическая; б – упрощенная геометрическая; в – КЭ модель с крупной сеткой; г – КЭ модель с мелкой сеткой

Рисунок 8 – Модель гильзы ограждения

6.2.4 Создание КЭ сетки грунта и бетона

Бетон фундамента или грунт моделируются с использованием восьмиузловых элементов. Модель обоих элементов получается путем «выдавливания» из 2D-сетки при выполнении операции sweep (рисунок 9). Грунт с небольшим значением модуля упругости характеризуется нестабиль-

ностью контакта между грунтом и гильзой. Во избежание этого вокруг модели грунта необходимо создать сетку из оболочечных элементов путем задания элементов на свободных поверхностях. Контакт между грунтом и остальными частями модели необходимо задавать, используя эту же 2D-сетку.

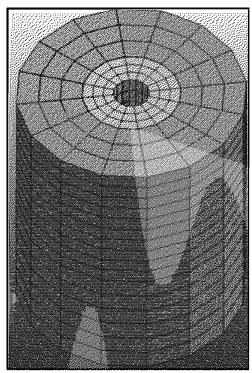


Рисунок 9 – КЭ сетка грунта

6.2.5 Создание КЭ сетки троса

КЭ сетка троса – это цилиндр, внутри которого проходят балочные элементы. Для построения балочных элементов первоначально необходимо провести линию, соответствующую оси троса, а затем разбить ее на требуемое количество элементов. После построения КЭ сетки следует измерить длину элемента (она будет отличаться от заданной, так как не всегда целое число раз уложится в длину троса). Затем, используя инструмент Shapemesher → Cylindermesh, строится оболочечная КЭ сетка вокруг балочных элементов троса. Оболочечные элементы связываются с балочными RBE (Rigid Body Element) элементами, которые способствуют их работе как одно целое.

6.2.6 Построение КЭ сетки концевого участка ограждения

Моделирование концевых участков ограждения принципиально не отличается от построения сетки стойки и троса ограждения. За исключением наличия анкерной плиты, которая представляет цельный

стальной лист или несколько сваренных между собой листов (рисунок 10). В общей модели ограждения рекомендуется пренебречь сварными швами и моделировать анкер как несколько оболочек, соединенных друг с другом по всей поверхности. Концевые болты и гайки не моделируются, а заменяются пружинами эквивалентной жесткости, предварительно натянутыми на величину натяжения тросов. Концы пружин крепятся к анкеру с помощью RBE элементов.



Рисунок 10 – Концевой участок ограждения

6.2.7 Создание КЭ сетки всего ограждения

Объединяя все описанные выше элементы в одну модель, можно создать модель части ограждения, из которой путем копирования (операция Move-Copy) получается модель рабочего участка ограждения (рисунок 11).

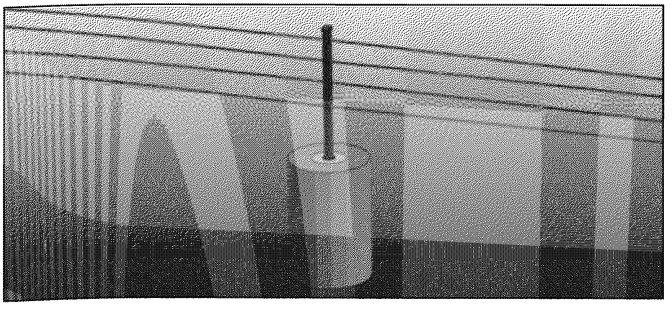


Рисунок 11 – Элементарная модель ограждения

Модель рабочего участка ограждения (без начального и конечного участков) после выполнения операции Move-Copy представлена на рисунке 12.

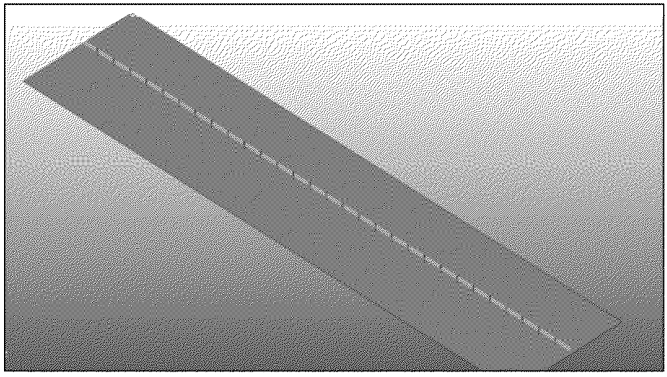


Рисунок 12 – Модель тросового ограждения длиной 90 м

7 Рекомендации по заданию моделей материалов и типов конечных элементов

7.1 Расчетная модель троса

Стальные канаты имеют множество конфигураций и форм, однако в настоящее время для тросовых ограждений в основном применяется только один их вид – трехпрядный сухой трос, состоящий из семи проволок, общим диаметром 19 мм [2, 7, 8].

Основными механическими характеристиками троса являются приведенный модуль упругости (далее – модуль упругости), изгибная жесткость и жесткость на кручение. Трос – сложный физический объект с нелинейными характеристиками, поэтому рассмотрены пять КЭ моделей троса, каждая из которых подходит в тех или иных ситуациях при моделировании ограждений. Код карт программного комплекса Ls-Dyna, необходимых для задания моделей троса, приведен в приложении А.

Уравнения для определения внутренних моментов в сечениях троса имеют следующий вид:

$$M_y = EI_{xx}\left(k_x - k_x^0\right), \quad M_x = EI_{yy}\left(k_y - k_y^0\right), \quad T_z = C\left(\tau_z - \tau_z^0\right), \qquad (7)$$

где M_y, M_x – изгибающие моменты, Н·м;

E – модуль упругости, Па;

значении деформаций 0,005 переходит в пластическую стадию, а модуль упругости выбирается таким образом, чтобы жесткость была как можно ближе к жесткости реального троса, при этом модель не должна терять стабильность (при слишком малом модуле упругости элементы троса могут перекрутиться, что приведет к численной ошибке). Данную модель рекомендуется применять при несложных контактных взаимодействиях.

7.1.3 Балочная модель троса

В программном комплексе Ls-Dyna эта модель материала получила название MAT_166. При задании плотности материала используется масса единицы длины троса, а не плотность стали, равная 7850 кг/м^3, которая находится путем деления погонной массы троса 1,22 кг/м на его фактическую площадь 154,5 мм^2. В этой модели модуль упругости используется только для расчета скорости движения волн деформации при ударе по тросу, поэтому его значение должно быть уменьшено во столько раз, во сколько снижена плотность, чтобы скорость распространения волн деформаций в модели соответствовала скорости их распространения в реальном тросе. Жесткости троса на растяжение, изгиб и кручение в этой модели определяются по экспериментальным кривым. Такую модель троса рекомендуется использовать как основную.

7.1.4 Балочно-оболочечная модель троса

Балочно-оболочечная модель троса состоит из трех компонентов: балки круглого поперечного сечения диаметром 19 мм, оболочных элементов и RBE связи. В модели предполагается, что трос работает в упругой области, поэтому в качестве модели материала троса использовался MAT_001.

Рассматриваемая модель представляет балку с круглым поперечным сечением, работающую на изгиб с кручением, однако трос такой балкой не является. Жесткость на изгиб балочно-оболочечной модели будет в несколько раз больше, чем реального троса, поэтому необходимо снизить значение модуля упругости на 30%. Также в этой модели отсутствует жесткость на кручение.

Такую модель рекомендуется использовать как основную при малых расчетных мощностях для ускорения процесса расчета.

7.1.5 Сравнение эффективности различных КЭ моделей троса

В таблице 2 приведены различные модели тросов в зависимости от времени расчета для разных длин и погрешности перемещений, полученной при сравнении с экспериментальными данными. За единицу

было принято время расчета с использованием балочно-оболочечной модели при длине элемента 40 мм и величине модели в 301 элемент. Время расчета составило 50 с. Рекомендованная длина элемента троса при моделировании ограждения не должна превышать 20 мм, так как при большей длине возрастает погрешность вычисления.

Т а б л и ц а 2 – Сравнение моделей троса по времени расчета

Название модели	Относительное время расчета при длине элемента, мм				Перемещение троса, мм	Погрешность перемещений, %
	5	10	20	40		
Балочная	61,3	15,3	7,2	4,7	144	2,70
Балочно - оболочечная	6,3	2,3	1,2	1,0	117	20,95
Стержневая (нить)	7,0	5,9	4,8	2,1	136	8,11
Балочно - твердотельная	24,2	6,3	5,4	3,7	134	9,46

Сводная таблица рассмотренных моделей исходя из используемых материалов, типов элементов и необходимых параметров представлена в таблице 3.

Т а б л и ц а 3 – Сводная таблица моделей троса

Название модели	Компоненты	Материал	Площадь, мм	Модуль упругости, ГПа	Изгибная жесткость, (Н*м)
Стержневая (нить)	Дискретная балка (тип 6)	MAT_071	154,84	155	0
Балочно-твердотельная	Дискретная балка (тип 6)	MAT_071	154,84	155	0
	Шестиузловой твердотельный элемент (тип 15)	MAT_024	255,27	155/0,02	104
Балочная	Элемент Белычно – Шер (тип 2)	MAT_166	154,84	155	32
Балочно-оболочечная	Балка Хьюса – Лу (тип 1)	MAT_001	255,27	120	650,84
	Элемент Белычно – Шер (тип 2)	MAT_009	0	0	0

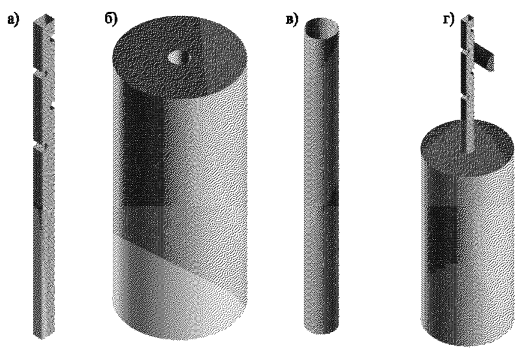
Примечание – В числителе приведен модуль упругости модели длябалки, в знаменателе – для твердотельного элемента.

7.2 Расчетная КЭ модель стойки в сборе

7.2.1 Расчетная модель стойки и гильзы

Модель стойки включает стойку, грунт и гильзу. Стойки помещаются в гильзу, которая в свою очередь устанавливается в бетонный фундамент либо в грунт (рисунок 14). Податливость этой системы, особенно при установке в грунт, определяет ее работу и требует отдельного рассмотрения [9]. Основные карты секций и материалов стойки приведены в приложении Б.

В процессе работы стойка испытывает значительные пластические деформации вплоть до разрушения, поэтому в качестве ее материала был выбран MAT_024 с заданием диаграммы деформирования стали Ст3, из которой выполнена стойка, и возможностью разрушения [9].



а – стойка; б – грунт; в – гильза; г – общий вид

Рисунок 14 – КЭ модель стойки

Условия работы гильзы достаточно близки к условиям работы стойки, поэтому способ ее моделирования и используемый материал (MAT_024) будут аналогичными.

7.2.2 Расчетная КЭ модель грунта и бетона

7.2.2.1 Для моделирования грунта в программном комплексе Ls-Dyna применяются три материала: MAT_005, MAT_147, MAT_193. Материал MAT_147 специально разрабатывался для моделирования ударных взаимодействий грунта и дорожных конструкций. Основным достоинством этого материала является то, что, несмотря на нелинейную постановку, требуемые параметры модели совпадают с основными параметрами механических свойств грунтов (углом внутреннего трения,

удельным сцеплением и т.д.) и поэтому могут быть взяты из соответствующих справочников. Недостаток этого материала заключается в том, что он остается стабильным только при небольших деформациях модели, и поэтому модель применима только для уплотненных грунтов.

7.2.2.2 Материал MAT_193 – стандартная модель материала грунта Друкера – Прагера. Основным ее достоинством является легкодоступность параметров, основной недостаток состоит в том, что модель материала всегда остается линейной, поэтому не рекомендуется к применению в случаях деформаций, превышающих 5 %.

7.2.2.3 Материал MAT_005 – модель материала грунта, предназначенная для моделирования больших деформаций. Ее рекомендуется использовать в случаях, когда имеются существенные перемещения элементов грунта. Следует отметить, что материал подходит для моделирования бетона, так как позволяет задавать кривую деформирования на сжатие и предельное значение напряжений на растяжение. Основной проблемой применения этого материала является сложность получения экспериментальных данных.

7.2.2.4 Основная информация о моделях грунтов и стоек приведена в таблице 4.

Т а б л и ц а 4 – Сводная таблица основных компонентов стойки

Название детали	Компоненты	Материал	Необходимые данные
Стойка и гильза	Элемент Бельчно –Шер (тип 2)	MAT_024	Кривая деформирования материала, плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона
Грунт и бетон	С постоянными напряжениями (тип 1)	MAT_005	Модуль сдвига и объемный модуль, кривая трехосного сжатия, плотность
	Элемент Бельчно – Шер (тип 2)	MAT_009	Модуль упругости

7.3 Моделирование транспортного средства

7.3.1 Деформируемая модель

Создание деформируемой модели ТС достаточно сложно, поэтому рекомендуется использовать готовые модели автомобилей. Стандартные модели ТС (автомобиль массой 900 кг, грузовые автомобили массой 10, 16, 38 т, а также автобус массой 12 т), необходимых для проведения расчетного анализа конструкции, даны на сайте [10].

7.3.2 Абсолютно жесткая модель автомобиля

В случаях когда основным интересующим исследователя параметром является прогиб тросового ограждения, возможно использование твердотельной модели ТС. Для ее создания необходимо построить геометрическую модель контура автомобиля, которым будут совершать наезд на ограждение. Затем на внешней поверхности этого контура следует построить сетку из оболочечных элементов, из которой путем выдавливания получить твердотельную модель ТС. Распределение масс по осям задают с помощью сосредоточенных масс на уровне центра масс реального автомобиля. Рекомендуется, чтобы у модели автомобиля не было острых граней, во избежание ошибок при контакте. Данную модель следует применять при определении прогиба ограждения.

8 Задание граничных условий

8.1 При моделировании наезда автомобиля на ограждение используются следующие граничные условия: задание ограничения на перемещения узлов, начальной скорости узлов, контактного взаимодействия между элементами, усилия гравитации, начального усилия в элементах.

8.2 Задание граничных условий на ограничение перемещений узлов по всем шести степеням свободы осуществляется с помощью карты SPC. Основное использование карты – ограничение перемещения узлов, неподвижных относительно земли. Ее рекомендуется применять для ограничений перемещений внешней поверхности грунта или бетона.

8.3 Задание начальной скорости узлов осуществляется с помощью карты initial_velocity, которая позволяет задавать начальную угловую или линейную скорость. Ее рекомендуется использовать для задания скорости движения автомобиля в начальный момент времени.

8.4 Контактное взаимодействие накладывает ограничения на проникновение одной поверхности в другую. Существует множество типов контактов, но наиболее широкое применение получили automatic_single_surface_contact, general_contact, general_interior_contact.

Основные отличия первого и второго контактов состоят в способе поиска узлов и определении контактной жесткости. General_contact «ищет» контакт по всей длине элемента, а не только в узлах. Automatic_single_surface_contact рекомендуется использовать при всех контактах, кроме контакта с кромками элементов и балками. В этом случае применяют general_contact. General_interior_contact обеспечивает стабильный и точный контакт со свободными кромками за счет добавления

null балок на внешней грани. Его рекомендуют использовать в случаях, когда важна точность передачи усилия на грани оболочки, например при взаимодействии грани оболочки стойки (отверстия в стойке) с тросом. Следует учитывать, что контакт добавляет по 0,5 мм к грани, поэтому необходимо редактировать начальную геометрию модели. При контакте абсолютно твердых тел и оболочек возможно использование node_to_surface contact, который требует меньше машинного времени и при величине сетки менее 10 мм стабилен.

8.5 При контакте тел малой жесткости (грунта) рекомендуется создавать контактные оболочки с применением материала MAT_009. Контакт следует задавать между контактными оболочками, а не элементами тела. Этот прием используется для получения более стабильных моделей, так как если жесткость тела мала, в модели будет накапливаться численная ошибка из-за больших перемещений контактных пружин. Оболочки с применением модели материала MAT_009 имеют только контактную жесткость.

8.6 Основные рекомендации по использованию контактов:

- при контакте с балочными элементами по кромке или кромка-кромка следует использовать general contact или general interior_contact;

- необходимо, чтобы толщина в контакте равнялась толщине реального тела;

- плотность сетки должна быть достаточной для стабильной работы контакта (при использовании контактов slave_slave рекомендуемый размер элемента 10 мм, контактов slave_master рекомендуемый размер элемента slave – 10 мм, master – 20 мм);

- следует избегать применения в контакте оболочечных элементов толщиной менее 1 мм (в случае наличия таковых необходимо масштабировать их контактную толщину).

Задание взаимодействий через контакт рекомендуется между следующими элементами.

• Кузов автомобиля и трос. В случае если нет взаимодействий с гранями, следует использовать automatic_single_surface_contact, если такие контакты имеются, необходимо применять general_contact или балки из материала MAT_009.

• Кузов автомобиля и остальные элементы ограждения. При таком взаимодействии используется automatic_single_surface_contact. При наличии абсолютно жестких тел и ограниченности ресурсов возможно применение node_to_surface_contact.

• Элементы автомобиля друг с другом. В этом случае рекомендуется использовать automatic_single_surface_contact.

8.7 Задание гравитации осуществляется с помощью карты inertial_load. Основным параметром гравитации является ускорение свободного падения. Эту карту рекомендуется использовать при любых расчетах ограждений.

8.8 Задание начальных усилий в балочных элементах осуществляется с помощью карты initial_stress_beam. Рассматриваемая карта задает напряжения или усиления в тросе. Напряжения задаются для элементов типа Тсая – Ву, усилия – для элементов типа Белычко-Шер. Продольные усилия определяет параметр SIG11.

9 Задание карт контроля

9.1 Карты контроля – это набор параметров, которые определяют работу той или иной карты. В расчетах ограждений используются следующие карты контроля: contact, coupling, timestep, hourglass, shell, energy. Рассмотрим основные параметры, необходимые для моделирования ограждений. Рекомендуемые значения карт даны в приложении В.

Карта контроля contact определяет основные параметры контактного взаимодействия тел (рисунок 15).

1	SLSFAC	RWPNAL	ISLCHK	SHLTHK	PENOPT	THKCHG	ORIEN	ENMASS
	0.0	0.0	2	2	1	1	1	0
2	USRSTR	USRFRC	NSBCS	INTERM	XPENE	SSTHK	ECDT	TIEDPRJ
	0	0	0	0	4.0000000	0	0	0

Рисунок 15 – Карта контроля contact

Основными настраиваемыми параметрами являются ISLCHK, SHLTHK и PENOPT. Параметр ISLCHK включает поиск начальных проникновений в модели. Его рекомендуется применять, когда есть изначально контактирующие поверхности. При значении параметра, равного 1, начальные проникновения не будут искаться, а при значении 2 поиск будет произведен.

Параметр SHLTHK позволяет учесть толщину оболочек в контактном взаимодействии. При значении этого параметра, равного 0, толщина не рассматривается, 1 – рассматривается только у деформируемых тел, 2 – рассматривается у всех оболочек. Рекомендуемое задаваемое его значение 2.

Параметр PENOPT – это метод подсчета жесткости в контакте. Его рекомендуемое значение 1.

9.2 Карта контроля coupling позволяет переводить единицы измерения модели в любые другие. Рекомендуемые значения параметров карты показаны на рисунке 16.

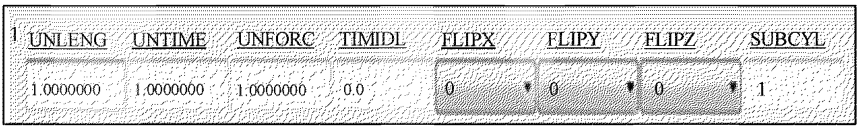


Рисунок 16 – Карта контроля coupling

Основными параметрами этой карты являются UNLENG – масштаб предобразования длины, UNTIME – масштаб времени, UNFORC – масштаб сил.

9.3 Основное назначение карты контроля energy – вычисление различного рода энергий: HGEN – энергии подавлений искажений формы элементов, RWEN – рассеянной энергии при трении об абсолютно жесткие тела, SLNTEN – энергии пружин в контакте, RYLEN – энергии, рассеянной в процессе демпфирования (рисунок 17).

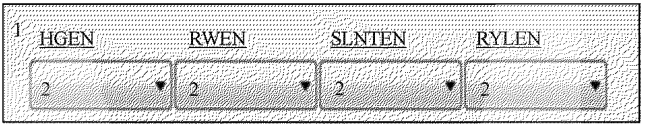


Рисунок 17 – Карта контроля energy

Наиболее важными при расчете ограждений являются первая и третья энергии, характеризующие их потери на численные ошибки, не имеющие физического значения. Рекомендуется, чтобы конечные значения энергии подавлений искажений формы элементов не превышали 10%, а энергии пружин в контакте – 1%–2% от общей энергии системы.

9.4 Существует несколько способов контроля энергии подавлений искажений формы элементов. Все их можно задать с помощью карты control hourglass (рисунок 18). Контроль энергии подавлений искажений формы элементов необходимо задавать элементам, испытывающим сдвиговые нагрузки, например элементам крышки или стойки.

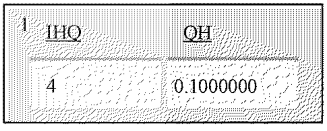


Рисунок 18 – Карта контроля энергии подавлений искажений формы элементов

Карты timestep определяют параметры шага по времени (рисунок 19). Рекомендуется, чтобы этот параметр не превышал 10^{-6} с без масштабирования шага по времени.

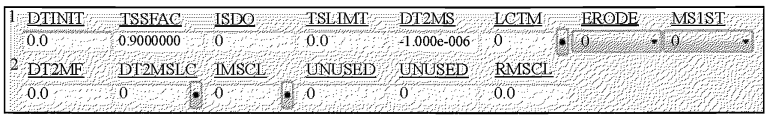


Рисунок 19 – Карта контроля timestep

9.5 Масштабирование шага по времени – процедура изменения плотности элемента, за счет чего меняется скорость прохождения волны возмущения и, как следствие, элемент начинает удовлетворять условию Куранта. Знак минус означает, что данный шаг по времени будет применен только в том случае, если какой-то из элементов не удовлетворяет условию Куранта для автоматически рассчитанного шага. Следует отметить, что в процессе деформации элементы модели изменяют форму, а элементы, изначально удовлетворяющие условию Куранта, могут ему не удовлетворять, поэтому эта карта необходима в случае возникновения больших деформаций.

9.6 Карта контроля shell определяет поведения оболочечных элементов под нагрузкой. Рекомендуемые значения параметров этой карты приведены на рисунке 20.

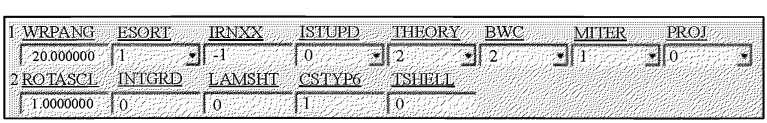


Рисунок 20 – Карта контроля shell

Основным настраиваемым параметром карты является меню THEORY, определяющее связь геометрических параметров элемента. В случае больших сдвиговых нагрузок на элемент рекомендуется использовать тип элемента № 10, а при значительном локальном изменении кривизны детали – № 1.

10 Пример создания модели ограждения

10.1 Пример создания модели ограждения и симуляционного расчета с деформируемым ТС

10.1.1 Ниже приведен пример моделирования наезда деформируемой модели автобуса на четырехтросовое дорожное ограждение. Карты, определяющие модели троса, стоек и грунта, а также карты контроля для этой модели ограждения даны в приложениях А, Б, В.

КЭ модель автобуса приведена на рисунке 21. Его масса составляет 12 т, длина – 12,5 м, колесная база – 6,5 м, габаритная ширина – 2,5 м.

10.1.2 Все элементы автобуса, вступающие в непосредственный контакт с ограждением, деформируемые (обшивка, рама кузова). Элементы конструкции, не вступающие в контакт, были представлены как абсолютно жесткие тела с массой и ее распределением, близкими к реальным.

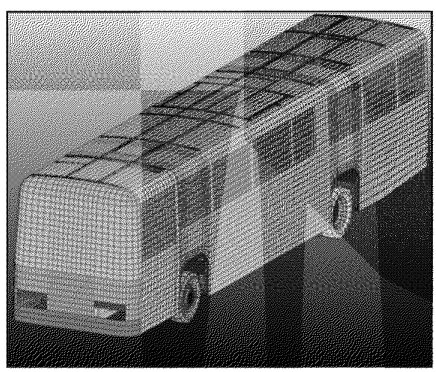
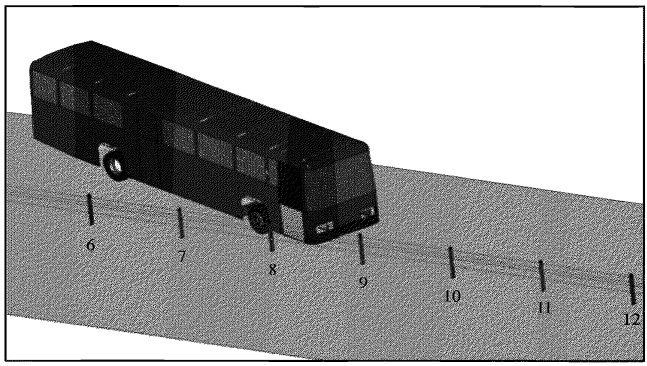


Рисунок 21 – Внешний вид сетки КЭ модели автобуса

Модель автобуса являлась одной из компонент общей симуляционной модели краш-процесса наезда ТС на ограждение (рисунок 22), которая помимо автобуса включала тросы, стойки, гильзы, грунт, землю (задавалась через карту planar rigid wall).



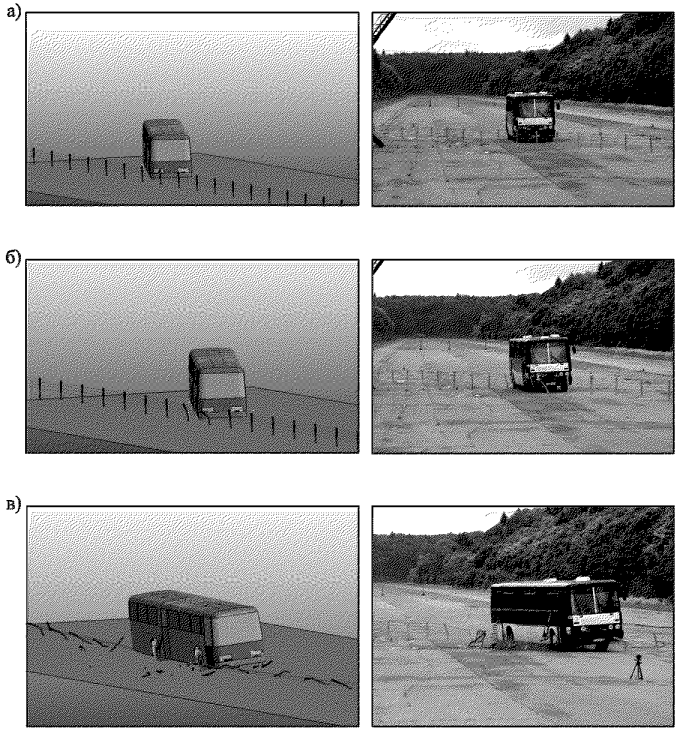
6–12 – номер стойки

Рисунок 22 – Внешний вид КЭ симуляционной модели наезда автобуса на тросовое ограждение

10.1.3 Для моделирования троса использовалась балочно-оболочечная модель, описанная в пункте 7.1.4. Стойки и гильзы моделировались из материала MAT_024 с применением элементов типа 2. Грунт моделировался с использованием материала MAT_005. Контакт задавался между шинами автобуса и поверхностью земли через automatic_single_surface_contact.

10.1.4 В краш-модели наезд на ограждение осуществляется со скоростью 75 км/ч под углом 20 °, что соответствует удерживающей способности У4 с энергией удара 300 кДж. Контакт автобуса и ограждения произошел между 8-й и 9-й стойками на расстоянии 25 м от конца ограждения. В начале взаимодействия 9-я стойка ограждения подмяла под себя два нижних троса, в результате чего они почти не совершили полезной работы по удержанию автобуса, хотя в этом случае, усилия в остальных тросах возрастают и работа по удержанию увеличивается. Основные этапы взаимодействия автобуса и рабочего участка ограждения представлены на рисунке 23.

10.1.5 На первом этапе контакт автобуса и ограждения осуществляется только передней частью автобуса, затем автобус поворачивается и начинает контактировать всей боковой поверхностью, при этом через некоторое время происходит удар задней частью, который и вызывает наибольший прогиб ограждения. И, наконец, ограждение выталкивает автобус (см. рисунок 23, в). Кривая изменения прогиба ограждения в процессе моделирования показана на рисунке 24.



а – начальный; б – промежуточный; в – конечный этапы
Рисунок 23 – Взаимодействие автобуса и ограждения
(слева – расчет, справа – эксперимент)

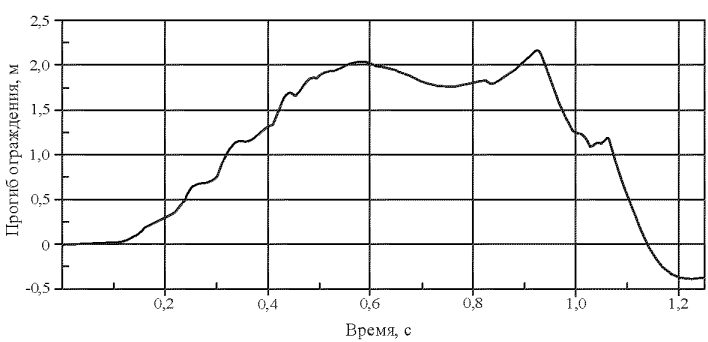


Рисунок 24 – Динамический прогиб тросового ограждения

10.1.6 В результате испытания были получены динамический прогиб тросового ограждения, равный 1,86 м, и рабочая ширина, равная 2,2 м, при моделировании эти величины составили соответственно 2,05 и 2,8 м. Погрешность прогиба составила 18,3%, а погрешность определения рабочей ширины – 22,7%.

10.2 Пример симуляционного моделирования краш-теста при использовании твердотельной модели транспортного средства

10.2.1 Помимо описанной выше модели, ниже рассмотрен пример симуляционного моделирования краш-теста для тросового ограждения с переплетенными тросами и твердотельной моделью автобуса. Известно, что переплетение тросов повышает удерживающую способность ограждения и уменьшает динамический прогиб за счет увеличения площади поверхностей трения. КЭ модель ограждения показана на рисунке 25.

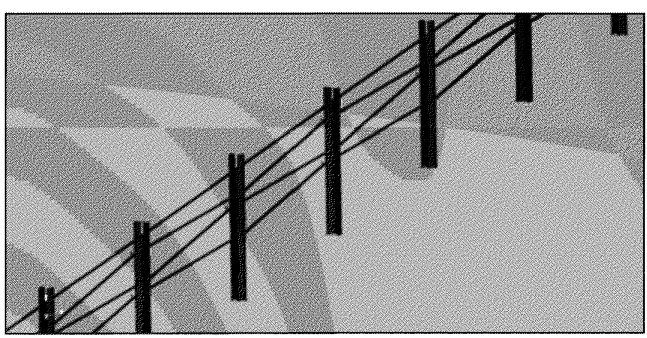
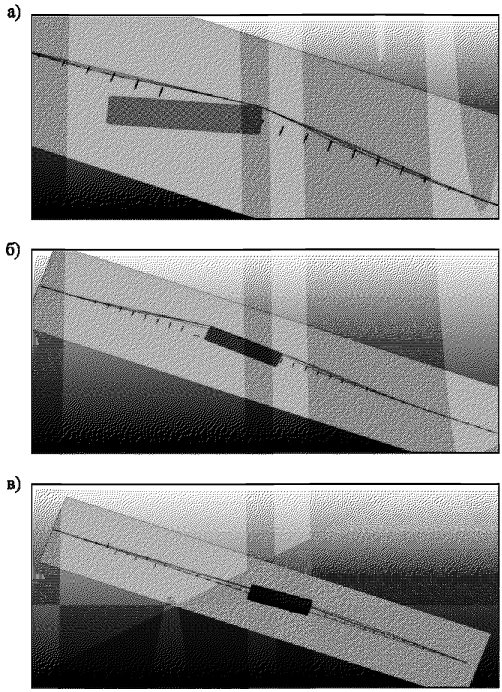


Рисунок 25 – КЭ модель ограждения с переплетенными тросами

10.2.2 Для снижения времени расчета автобус в этом примере был заменен на твердотельную модель. Такое допущение возможно ввиду того, что подсчет будет произведен по наихудшему случаю – автобус не поглощает энергию удара и усложняет условия работы конструкции.

10.2.3 Основные этапы работы модели приведены на рисунке 26. На первом этапе взаимодействия автобуса и тросового ограждения сработали все четыре троса. На втором этапе автобус равномерно скользил по тросу. Прогиб от удара на первом этапе составил 1,5 м. Наибольший прогиб получился за счет удара задней частью автобуса на втором этапе и составил 2,76 м. Во время третьего этапа произошел незначительный наклон автобуса.



а – начальный; б – промежуточный; в – конечный этапы

Рисунок 26 – Взаимодействие автобуса и тросового ограждения

10.2.4 На рисунке 27 представлен динамический прогиб тросового ограждения во времени. Как можно видеть из этого рисунка, максимальный прогиб в процессе удара составил 2,76 м.

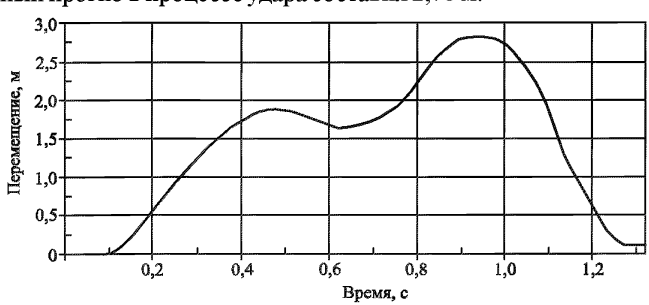


Рисунок 27 – Динамический прогиб тросового ограждения

10.2.5 На рисунке 28 представлен график зависимости величины продольной силы от времени. Максимальное усилие составило 16,1 т, а в соответствии с методическими рекомендациями [2] максимально допустимое значение усилия разрыва троса – 18 т.

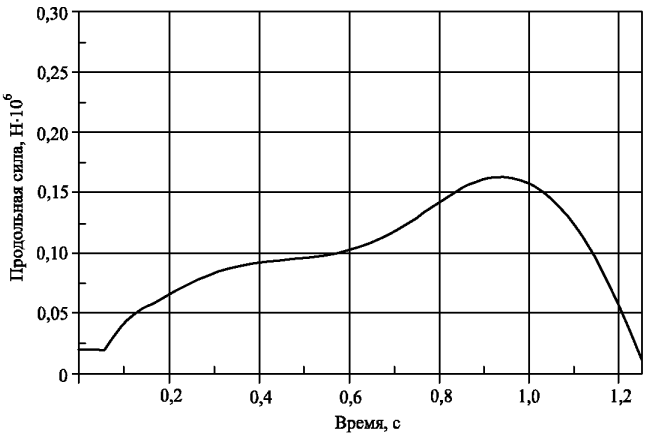


Рисунок 28 – Продольное усилие в тросе

10.2.6 На рисунке 29 представлен график ускорений в центре масс автобуса.

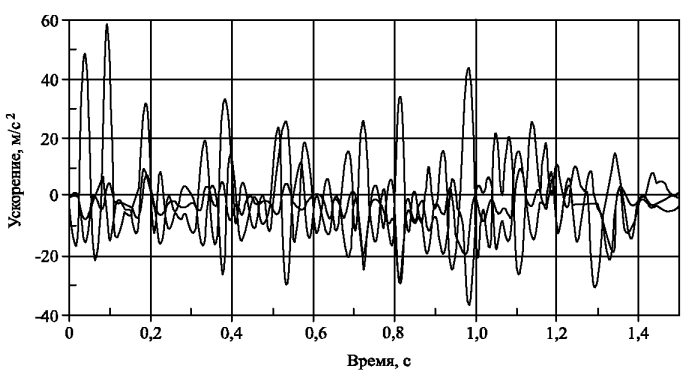


Рисунок 29 – Ускорение в центре масс автобуса

Средние величины инерционных перегрузок «а» (импульсы самых высоких перегрузок длительностью 50 мс) составляют:

10.2.5 На рисунке 28 представлен график зависимости величины продольной силы от времени. Максимальное усилие составило 16,1 т, а в соответствии с методическими рекомендациями [2] максимально допустимое значение усилия разрыва троса – 18 т.

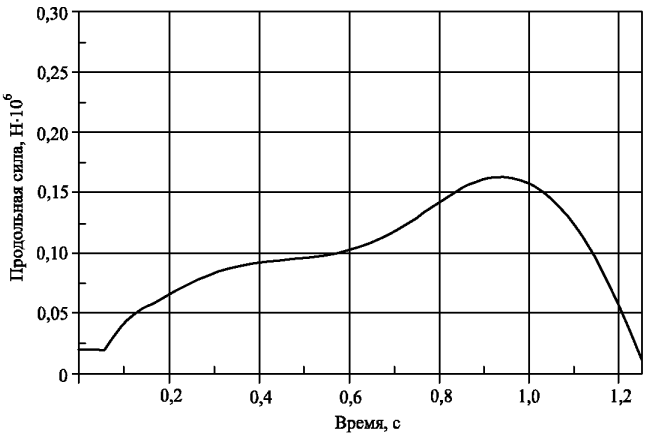


Рисунок 28 – Продольное усилие в тросе

10.2.6 На рисунке 29 представлен график ускорений в центре масс автобуса.

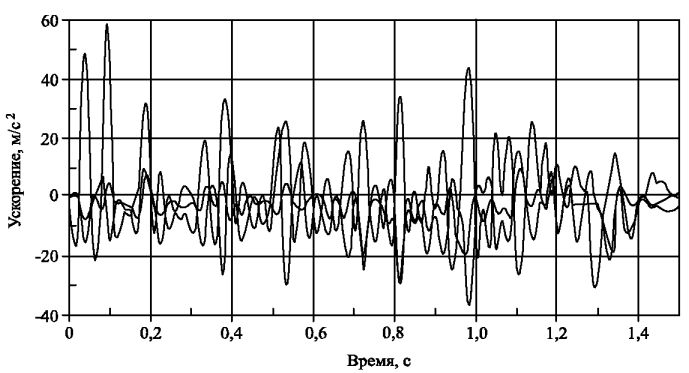


Рисунок 29 – Ускорение в центре масс автобуса

Средние величины инерционных перегрузок «а» (импульсы самых высоких перегрузок длительностью 50 мс) составляют:

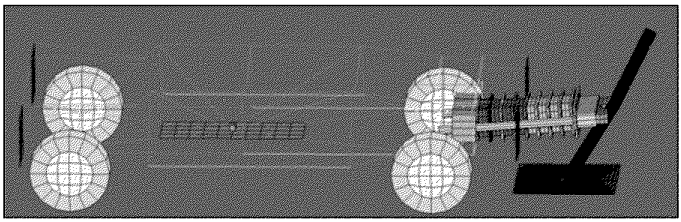


Рисунок 31 – Наезд тележки на стойку

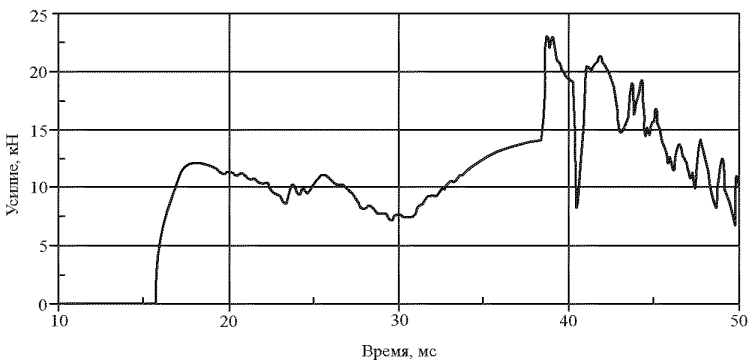


Рисунок 32 – Зависимость усилия, возникающего при контакте тележки со стенкой, от времени

Приложение А
Карты секций и материалов моделей троса

А.1 Общие сведения

Единицы измерения: т, мм, с.

Плотность материала троса была получена в результате лабораторных испытаний и составляет 4.743e-9 т/мм^3 на мм длины.

Модуль упругости троса:
рекомендуемые значения модуля упругости E=1.55e+5 МПа.

Действительная площадь троса и контактная площадь троса:
диаметр троса 19 мм (3x7) по 3 мм каждый, следовательно, реальная его площадь A = 154.84 мм^2, контактная площадь 283.39 мм^2.

А.2 Демпфирование троса

Коэффициент демпфирования равен 0.12 для частот от 4 до 40 Hz.

Уменьшение амплитуды колебаний составляет 0.02.

```
*DAMPING_FREQUENCY_RANGE
cdamp   flow   fhigh   psid
  0.12  0.00400  0.0400  20009*DAMPING_PART_STIFFNESS
pid coef
  20009  0.020
```

А.3 Модели троса

А.3.1 Стрежневая модель троса

Карта материала троса:

```
*MAT_CABLE_DISCRETE_BEAM
    mid      ro       e     lcid      Fo
     1 4.743e-09   126.e+9
```

Карта секции троса:

```
*SECTION_BEAM
   sid   elform
     1       6
   vol     iner      cid       ca   offset    rrcon    srcon    trcon
                   154.84    20e+3
```

А.3.2 Балочная модель троса

Карта материала троса:

```
*MAT_MOMENT_CURVATURE_BEAM_TITLE
[166] MAT_MOMENT_CURVATURE_BEAM_1
!   MID     RO      E    ELAF   EPFLG    CTA     CTB     CTT
    13  4.31E-9 72882.305      3     0.0      1.     0.0     0.0
!    N1      N2      N3      N4      N5      N6      N7      N8
    0.0   10000.     0.0     0.0     0.0     0.0     0.0     0.0
! LCMS1  LCMS2  LCMS3  LCMS4  LCMS5  LCMS6  LCMS7  LCMS8
     4       4       4       4       4       4       4       4
! LCMT1   LCMT2   LCMT3   LCMT4   LCMT5   LCMT6   LCMT7
LCMT8
     4       4       4       4       4       4       4       4
!  LCT1    LCT2    LCT3    LCT4    LCT5    LCT6    LCT7    LCT8
     5       5       5       5       5       5       5       5
!   CFA     CFB     CFT   HRULE    REPS   RBETA  RCAPAY
RCAPAZ
   0.970     1.0     1.0     0.0     0.00215     1.0e+20     1.0e+20     1.0e+20
```

Кривая зависимости силы в тросе от перемещения:

```
*DEFINE_CURVE_TITLE
DEFINE_CURVE_1
!  LCID    SIDR     SFA     SFO    OFFA    OFFO   DATTYP
     3       0      1.    1000.     0.0     0.0       0
!        Abcissa          Ordinate
            0.0              0.0
        0.006444         104.86703
        0.009222         126.60401
        0.015949         156.68427
        0.021998         169.21028
        0.025965         175.82259
        0.039924         189.27415
        0.047103         192.60257
        0.061907         196.86096
        0.093021         201.43974
        0.096687         201.60001
```

Кривая зависимости изгибающего момента от кривизны:

```
*DEFINE_CURVE_TITLE
DEFINE_CURVE_2
!  LCID    SIDR     SFA     SFO    OFFA    OFFO   DATTYP
     4       0      1.    1000.     0.0     0.0       0
!        Abcissa          Ordinate
            0.0              0.0
         0.0003              9.8
```

```
        0.00175          30.
         0.005           58.
        0.0095           80.
```

Кривая зависимости крутящего момента от угла поворота:

```
*DEFINE_CURVE_TITLE
DEFINE_CURVE_3
!  LCID    SIDR     SFA     SFO     OFFA     OFFO   DATTYP
      5       0      1.    1000.      0.0      0.0        0
!         Abcissa         Ordinate
            0.0              0.0
          0.001         0.166865
          0.005          0.33373
```

А.3.3 Балочно-твердотельная модель троса

Балочная секция идентична первому варианту троса.

Модель материала твердотельных элементов:

```
*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
    mid       ro        e       pr     sigy     etan     eppf     tdel
     92 4.743E-09   1.26E+5     0.28     1.0E+3
      c        p     lcss     lcsr       vp
```

Кривая деформирования твердотельных элементов:

```
Plastic stress/strain curve
  0.0000   0.5000   1.0000
  0.0100   0.0200   0.9400
```

А.3.4 Балочно-оболочечная модель троса

Материал оболочки троса:

```
*MAT_NULL_TITLE
Null_cable_mat
!   MID       RO       PC       MU    TEROD    CEROD       YM       PR
      3  7.85E-9      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
```

Секция балки троса:

```
*SECTION_BEAM_TITLE
cable_beam
!  SECID   ELFORM     SHRF  QR/IRID      CST    SCOOR      NSM
       5        1       1.       2.       1.      0.0      0.0
!    TS1      TS2       TT1      TT2    NSLOC    NTLOC
     19.      19.       0.0      0.0      0.0      0.0
```

Материал балки троса:

```
*MAT_ELASTIC_TITLE
Calbe_mat
!   MID      RO       E       PR       DA       DB
      4  4.75E-9  100000.    0.27     0.0      0.0
```

Материал оболочки троса:

```
*SECTION_SHELL_TITLE
Cable_shell
!  SECID   ELFORM    SHRF     NIP    PROPT      QR    ICOMP    SETYP
       4        2      1.       2       1.     0.0        0        1
!    T1       T2       T3       T4     NLOC    MAREA     IDOF   EDGSET
      1.       1.       1.       1.      0.0      0.0      0.0      0.0
```

Приложение Б
Карты секций и материалов моделей стойки и грунта

Б.1 Секции и материал стойки

Б.1.1 Материал стойки

Стойка изготовлена из стали Ст3. Все характеристики заданы в соответствии с нормативным документом на этот материал.

Разрушение материала задано при деформациях равных 0,24.

```
*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_TITLE
Steel_3
!   MID      RO       E       PR     SIGY     ETAN     FAIL     TDEL
      1  7.85E-9  200000.      0.3     203.      0.0     0.24      0.0
!     C        P     LCSS     LCSR       VP
    0.0      0.0        1        0        0
```

Кривая деформирования Ст 3:

```
*DEFINE_CURVE_TITLE
Steel_3_Curve
!   LCID     SIDR      SFA      SFO     OFFA     OFFO   DATTYP
      1        0       1.       1.      0.0      0.0        0
!          Abcissa         Ordinate
             0.0             203.
           0.00317             222.
           0.00679             235.
           0.01537             255.
           0.028935            274.
           0.057394            301.
            0.1013             327.
            0.14718            347.
           0.229176            373.
```

Б.1.2 Секция стойки

```
*SECTION_SHELL_TITLE
Post
!  SECID   ELFORM     SHRF      NIP    PROPT      QR   ICOMP    SETYP
       1        2       1.        4       1.     0.0        0        1
!     T1       T2       T3       T4     NLOC   MAREA    IDOF   EDGSET
      3.       3.       3.       3.     0.0     0.0     0.0      0.0
```

Б.2 Материалы грунта

Б.2.1 FHWA материал

Модуль уплотненного грунта K=85; G=48.2.

```
*MAT_FHWA_SOIL_TITLE
Soil
!    mid      ro    nplot   spgrav   rhowat      vn    gammar   intrmx
     1 2.3500E-9       3  2.790000 1.0000E-9  1.100000    0.000       10
!      k        g   phimax     ahyp      coh    eccen       an       et
80.500000 48.299999  1.100000 1.0000E-4 6.2000E-3 0.700000    0.000    0.000
!  mcont     pwd1    pwksk     pwd2   phires     dint    vdfm    damlev
 3.4000E-2    0.000    0.000    0.000    0.000 2.5000E-3 5.000000 1.000000
! epsmax
 1.000000
```

Б.2.2 Высоконелинейный материал

Материал грунта с большой степенью деформации K=18; G=49.5.

```
*MAT_SOIL_AND_FOAM_TITLE
Soil
!    mid      ro       g     bulk       a0       a1       a2       pc
     2 2.2000E-9 49.500000 185.00000 1.2010E-2    0.000    0.000  -0.172390
!    vcr      ref     lcid
    0.000    0.000        0
    eps1     eps2     eps3     eps4     eps5     eps6     eps7     eps8
   0.000 1.0000E-2 1.6000E-2 2.0000E-2 3.0000E-2 0.300000 0.000 0.000
   eps9    eps10
   0.000    0.000
!     p1       p2       p3       p4       p5       p6       p7       p8
   0.000 0.958000 1.875000 2.565000 4.398000 5.398000    0.000    0.000
!     p9      p10
   0.000    0.000
*END
```

Приложение В
Карты контроля

В.1 Карта контроля распространения волн в материале

```
*CONTROL_BULK_VISCOSITY
!    Q1      Q2     TYPE
#     q1      q2     type    btype
 2.000000 0.100000     -1       0
```

В.2 Карта контроля контакта

```
*CONTROL_CONTACT
! SLSFAC  RWPNAL  ISLCHK  SHLTHK  PENOPT  THKCHG  ORIEN
ENMASS
# slsfac   rwpnal   islchk   shlthk   penopt   thkchg   orien   enmass
   0.000    0.000        2        2        1        1        1        0
! USRSTR  USRFRC  NSBCS  INTERM  XPENE  SSTHK  ECDT
TIEDPRJ
# usrstr   usrfrc   nsbcs   interm   xpene   ssthk   ecdt   tiedprj
      0        0       0        0 4.000000       0       0       0
!  SFRIC   DFRIC    EDC    VFC     TH   TH_SF  PEN_SF
#  sfric   dfric    edc    vfc     th   th_sf  pen_sf
   0.000   0.000   0.000   0.000   0.000   0.000   0.000
!IGNORE1  FRCENG SKIPRWG  OUTSEG SPOTSTP SPOTDEL SPOTHIN
# ignore   frceng   skiprwg   outseg   spotstp   spotdel   spothin
      0        0        0        0        0        0     0.000
!  ISYM  NSEROD  RWGAPS  RWGDTH  RWKSF  ICOV  SWRADF
ITHOFF
#   isym   nserod   rwgaps   rwgdth   rwksf   icov   swradf   ithoff
      0       0        1    0.000 1.000000       0   0.000        0
! SHLEDG
# shledg   pstiff   ithcnt   tdcnof   ftall   unused   shltrw
      0        0        0        0        0            0.000
```

В.3 Карта контроля размерностей

```
*CONTROL_COUPLING
! UNLENG  UNTIME  UNFORC  TIMIDL  FLIPX  FLIPY  FLIPZ
SUBCYL
```

```
# unleng  untime  unforc  timidl  flipx  flipy  flipz  subcyl
 1.000000 1.000000 1.000000  0.000     0      0      0      1
```

В.4 Карта контроля энергии

```
*CONTROL_ENERGY
!  HGEN   RWEN  SLNTEN  RYLEN
#   hgen    rwen   slnten   rylen
      2       2       2       2
```

В.5 Карта контроля энергии подавлений искажений формы элементов

```
*CONTROL_HOURGLASS
!   IHQ       QH
#    ihq       qh
     4 0.100000
```

В.6 Контроль вывода информации

```
*CONTROL_OUTPUT
! NPOPT  NEECHO  NREFUP  IACCOP  OPIFS  IPNINT  IKEDIT
IFLUSH
#  npopt   neecho   nrefup   iaccop   opifs   ipnint   ikedit   iflush
      1       3       0        0   0.000        0      100     5000
!  IPRTF   IERODE   TET10  MSGMAX  IPCURV
#   iprtf   ierode    tet10    msgmax    ipcurv     gmdt  ip1dblt     eocs
       0       0        2        50        0    0.000        0        0
```

В.7 Контроль оболочечных элементов

```
*CONTROL_SHELL
! WRPANG  ESORT  IRNXX  ISTUPD  THEORY  BWC  MITER  PROJ
# wrpang    esort    irnxx    istupd    theory     bwc    miter     proj
 20.000000       1       -1        0        2        2        1        0
! ROTASCL  INTGRD  LAMSHT  CSTYP6  TSHELL  NFAIL1  NFAIL4
# rotascl    intgrd    lamsht    cstyp6    tshell
  1.000000        0        0         1         0         0         0         0
! PSSTUPD  IRQUAD
# psstupd   sidt4tu     cntco    itsflg    irquad
       0         0         0         0         2
```

В.8 Карта контроля времени вычисления

```
*CONTROL_TERMINATION
! ENDTIM  ENDCYC  DTMIN  ENDENG  ENDMAS
# endtim  endcyc  dtmin  endeng  endmas
 1.500000      0  0.000   0.000   0.000
```

В.9 Карта контроля шага по времени

```
*CONTROL_TIMESTEP
! DTINIT  TSSFAC  ISDO  TSLIMT  DT2MS  LCTM  ERODE
# dtinit  tssfac  isdo  tslimt  dt2ms  lctm  erode  ms1st
   0.000 0.900000     0   0.000 -5.000E-7     0      0      0
! DT2MSF  DT2MSLC  IMSCL
# dt2msf  dt2mslc  imscl  unused  unused  rmscl
   0.000       0      0                  0.000
```

Библиография

[1]	ТР ТС 014/2011	Технический регламент Таможенного союза. Безопасность автомобильных дорог
[2]	ОДМ 218.6.004–2011	Методические рекомендации по устройству тросовых дорожных ограждений для обеспечения безопасности на автомобильных дорогах
[3]		Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике, 1975
[4]		Bathe K. J. Finite Element Procedures, 1996
[5]		Hallquist J.O. LS-DYNA Keyword User's Manual. – March, 2001
[6]	СТО 11449884–0001–2012	Ограждения дорожные удерживающие тросовые, 2012
[7]		Демьянушко И.В., Общев А.Г., Сторожев С.А. Важная роль тросовых ограждений. В журн. Автомоб. дороги, № 3, 2012
[8]		Демьянушко И.В., Карпов И.А., Сторожев С.А. Устройство тросовых дорожных ограждений: что нужно знать. В журн. Дороги, октябрь, 2013
[9]		Демьянушко И.В., Карпов И.А. Моделирование наезда автомобиля на стойку дорожного ограждения. В журн. Трансп. стр-во, №10, 2013
[10]		gost.e-ecolog.ru ther/vehicle/CME-vehicles.tgz
[11]		gost.e-ecolog.ru .edu/vml/archive/nc ac/vehicle/Bogie_20-V01.tar.gz

ОКС 93.080.00
Ключевые слова: дорога, безопасность движения, дорожное ограждение, метод конечных элементов (МКЭ), КЭ элемент, КЭ модель, тросовое дорожное ограждение, программный комплекс Ls-Dyna, испытания, краш-процессы, энергопоглощение, транспортное средство (ТС), натурные испытания

Руководитель организации-разработчика

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

Проректор по научной работе _____ А.М. Иванов

Подписано в печать 11.05.2017 г. Формат бумаги 60х84 1/16.
Уч.-изд. л. 3,1. Печ. л. 3,4. Тираж 300.

Адрес ФГБУ «ИНФОРМАВТОДОР»:
129085, Москва, Звёздный бульвар, д. 21, стр. 1
Тел.: +7(495) 747-91-00, 747-91-05
E-mail: sif@infad.ru
Сайт:Информавтодор.РФ

gost.e-ecolog.ru