

УДК 741.625

**И.А. Карпов**

асс., МАДИ,

тел.: 8(499)155-08-48,

e-mail: ilya.karpov@outlook.com

**РАЗРАБОТКА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ ТРОСОВЫХ  
ДОРОЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА LS-DYNA**

**Аннотация.** В статье рассмотрена важная проблема, возникающая при численном моделировании процесса столкновения автомобиля с тросовым дорожным ограждением с использованием программного конечноэлементного комплекса нелинейной динамики Ls-Dyna – выбор вида элементов для описания работы тросов. Подробно анализируются различные конечноэлементные модели тросов, и проверяется их адекватность путем сравнения с экспериментом. Во второй части работы показаны результаты работы всей модели ограждения с использованием вышеописанных моделей троса.

**Ключевые слова:** тросовые дорожные ограждения, полномасштабные краш-тесты, метод конечных элементов (МКЭ), КЭ модель, Ls-Dyna, безопасность движения.

**Введение**

Среди всех видов дорожно-транспортных происшествий (ДТП) одними из наиболее опасных являются лобовые столкновения транспортных средств, и съезды автомобилей с проезжей части. Эффективным способом снижения тяжести таких ДТП является установка дорожных удерживающих ограждений. В отечественной практике

дорожного строительства наиболее широко применяются барьерные (рис. 1а) и парапетные дорожные ограждения (рис. 1б). В то же время за рубежом (США, Канада, Австралия, Скандинавские страны) в некоторых случаях используют тросовые ограждения (рис. 1в). С недавнего времени эти ограждения, разработка которых ведется в МАДИ [1], стали устанавливать на Российских дорогах.



а

б

в

Рис. 1. Дорожные ограждения: а – барьерные; б – парапетные; в – тросовые

Основными преимуществами тросовых ограждений являются: низкое значение индекса тяжести травм (ASI) [2], относительно низкая стоимость, отсутствие снегозадержания. В частности, для типового автомобиля типа пикап среднее ASI при ударе о тросовое ограждение составляет 0,26, в то время, как для барьерных – 0,54 и для парапетных – 0,87.

Процесс столкновения автомобиля и тросового ограждения характеризуется сложной механикой взаимодействия при ударе: тросы обладают высокой степенью геометрической нелинейности, стойки и грунт характеризуются большой степенью физической нелинейности, при этом почти все процессы переходные. Поэтому для моделирования, как самого тросового ограждения, так и системы краш-теста, используется численный метод – метод конечных элементов (МКЭ) в явной постановке реализуемый в программном комплексе Ls-Dyna.

## Модели троса

### Общее описание КЭ моделей троса

Для тросовых дорожных ограждений применяется сухой трехрядный трос без сердечника (канат) с 7 проволоками, с общим диаметром каната 19 мм. Основными особенностями этого троса является небольшая изгибная жесткость и высокие демпфирующие характеристики. Основные уравнения для внутренних сил в тросе имеют следующий вид:

$$M_y = EI_{xx}(k_x - k_x^0); M_x = EI_{yy}(k_y - k_y^0); T_z = C(\tau_z - \tau_z^0), \quad (1)$$

где  $M$  – момент;  $E$  – модуль упругости;  $I$  – инерции;  $k$  – кривизна;  $T$  – крутящий момент;  $\tau$  – угол закручивания;  $C$  – жёсткость на кручение.

Наиболее простым и естественным (и часто применяемым в большинстве работ [3]) является представление троса как нити – первая конечноэлементная модель (КЭ модель), рис. 2б. До недавнего времени все тросовые системы рассчитывались на основе теории тонких упругих нитей. Для описания поведения нитей в КЭ постановке используется материал, обозначаемый в комплексе Ls-Dyna, как MAT\_071 [4]. Усилие в нити (тросе) определяется в этом случае как:

$$F = \max(F_0 + K\Delta L, 0), \quad (2)$$

где  $F$  – усилие в тросе (нити);  $K$  – жесткость на растяжение;  $\Delta L$  – изменение длины за шаг;  $F_0$  – начальное натяжение в тросе.

Вторая возможная модель троса является логичным развитием первой модели. Как можно видеть из уравнения (2) недостатком первой КЭ модели является отсутствие изгибной жесткости. Жесткость была добавлена путем моделирования поверх балочных элементов твердотельных элементов, а величина жесткости задавалась за счет задания модуля упругости с использованием модели материала MAT\_024.

Третья рассматриваемая КЭ модель – балочная с возможностью задания зависимости изгибающего момента от кривизны и учета жесткости на кручение, зависящей от угла закручивания [5]. Эта модель была построена

на основе прямой дискретизации уравнений (1), поэтому она одна из самых точных. С другой стороны, такая точность требует большого количества экспериментальных данных.

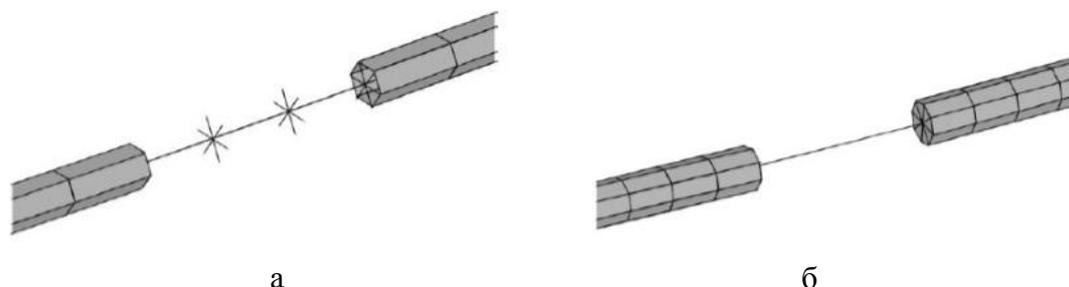


Рис. 2. КЭ модели тросов: а – балочно-оболочечная; б – балочно-твердотельная

В качестве четвертой КЭ модели троса рассматривалась обычная балочная модель с постоянной изгибной жесткостью [4]. Следует заметить, что в этой модели отсутствует жесткость на кручение, но при этом жесткость на изгиб в несколько раз больше, чем у реального троса (табл. 1). Общая информация по всем рассмотренным КЭ моделям приведена в табл. 1.

Таблица 1

Сводная таблица моделей троса

Название модели	Компоненты	Материалы	Площадь, мм	Модуль, ГПа	Изгибная жесткость, (Н·м)
Балочная (нить)	Дискретная балка (Тип 6)	MAT_071	154,84	155	0
Балочно-твердотельная	Дискретная балка (Тип 6)	MAT_071	154,84	155	0
	Шести узловый твердотельный элемент (Тип 15)	MAT_024	255,27	155/0,02	104
Балочная	Элемент Бельчно-Шер (Тип 2)	MAT_166	154,84	155	32
Балочно-оболочечная	Балка Хьюса-Лу (Тип 1)	MAT_001	255,27	120	650,84
	Элемент Бельчно-Шер (Тип 2)	MAT_009	0	0	0

### ***Натурные испытание тросов***

Для верификации рассмотренных КЭ моделей троса и выбора моделей, которые могут быть использованы при краш-тестах в моделях тросовых ограждений, было проведено сравнение с экспериментом при воздействии на трос ударной нагрузки. Эксперимент был поставлен на кафедре «Строительная механика» МАДИ. Суть эксперимента заключается в следующем: трос, длиной 1,68 м, устанавливался на специальный стенд (рис. 3а) с предварительным натягом около 2 т, что соответствует натяжению троса в системе ограждения.

На трос сбрасывается груз массой в 980 кг и фиксируется изменение перемещения троса под грузом во времени. Этот же эксперимент был смоделирован в Ls-Dyna.

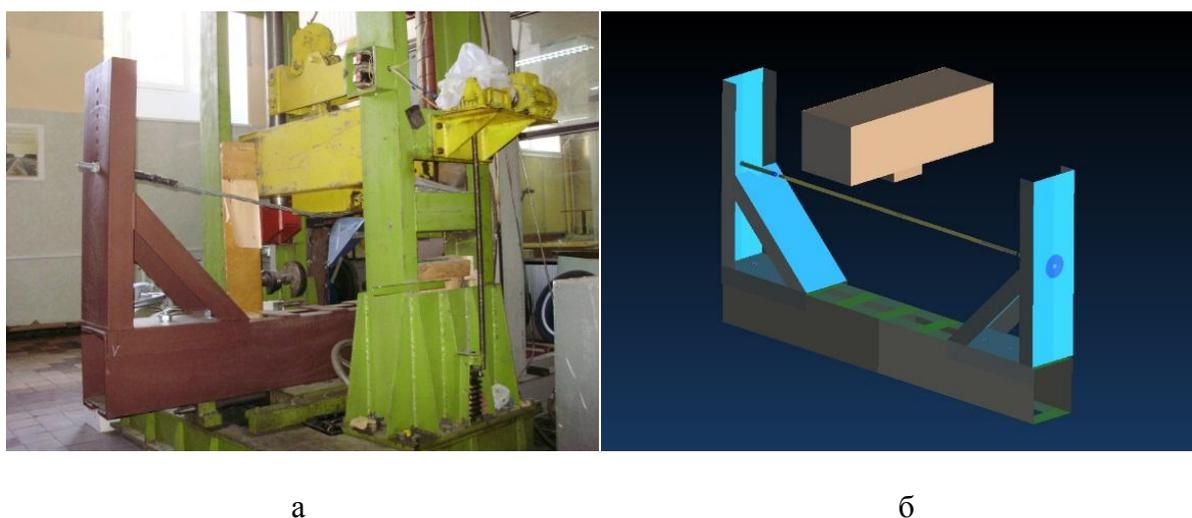


Рис. 3. Испытательный стенд: а – натуральный; б – КЭ модель

Для моделирования троса использовались все модели с различной длиной КЭ элементов: 5 мм, 10 мм, 20 мм и 40 мм. В таблице 2 приведены результаты работы моделей с различной длиной при одних и тех же условиях удара: груз массой 900 кг падал с высоты 380 мм. Помимо перемещений в таблице указано относительное время расчета, которое потребовалось для вычисления этой модели. За единицу было взято время расчета балочно-оболочечной модели, которое составляло 50 сек.

Сравнение различных моделей троса

Тип модели	Размер элемента				Перемещения, мм	Погрешность перемещений
	5 мм	10 мм	20 мм	40 мм		
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%
Балочная (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%

Из таблицы 2 видно, что для моделирования рационально использовать элементы длиной 10–20 мм. Большой размер приводит к увеличению погрешности; в случае 40 мм погрешность перемещений составляла 5%, даже в такой небольшой задаче. Элементы менее 10 мм не повышают точность расчета, но при этом значительно увеличивают время расчета и при очень малом значении размера элемента модели начинают терять стабильность. На рисунке 4 показана зависимость усилий в тросе по времени.

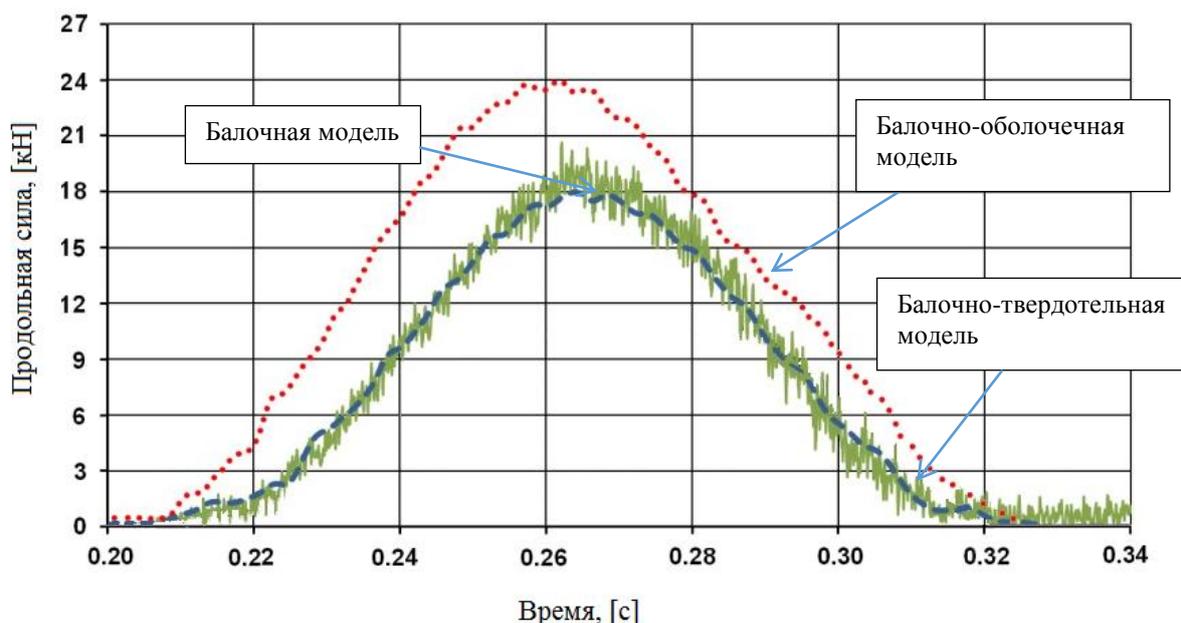


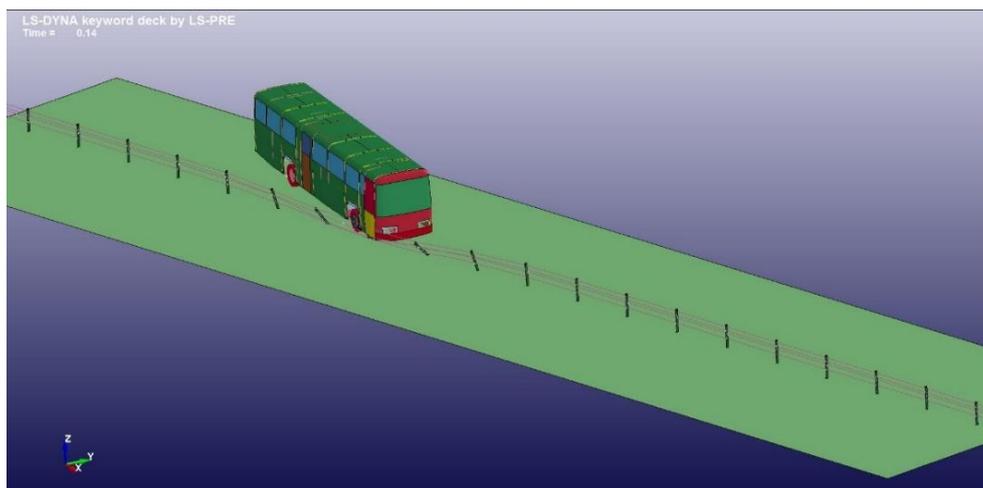
Рис. 4. Продольные усилия в моделях тросов

Как можно видеть из рисунка 4, балочно-оболочечная модель дает значения сил выше, чем две другие модели. Это можно объяснить тем, что, во-первых реальная площадь троса ( $154,84 \text{ мм}^2$ ) меньше, чем площадь балки, которой ее моделировали ( $283,53 \text{ мм}^2$ ), во-вторых жесткость троса на изгиб меньше, чем жесткость балки такого же сечения. Как видно из графиков, первая и вторая модели практически не отличаются друг от друга, различие только в шуме модели нити.

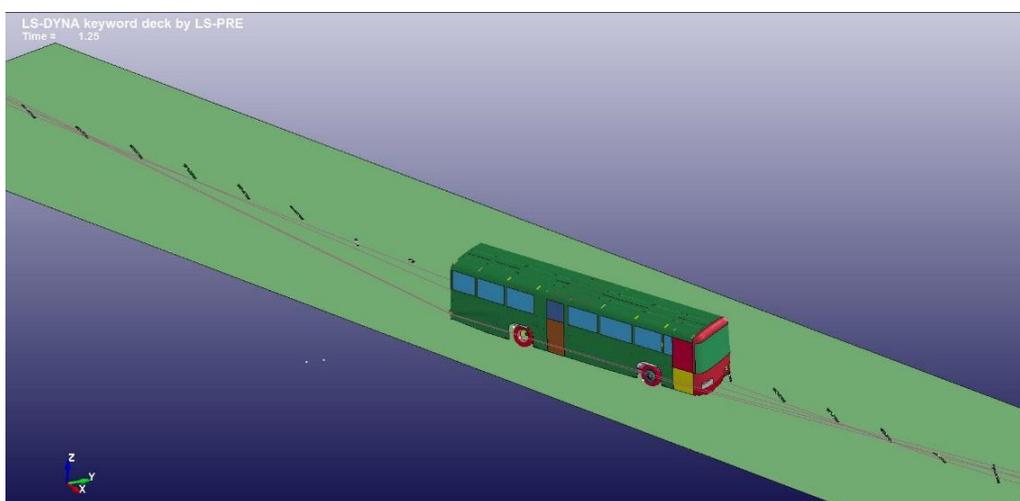
### **Модель ограждения**

КЭ модель всего краш-теста при наезде автомобиля на ограждение состоит из трех основных компонентов: троса, стоек, анкерных устройств и наезжающего автомобиля. В рассмотренном ниже примере краш-модели наезд на ограждение осуществляется автобусом, двигающимся со скоростью 75 км/час под углом 20 град., что соответствует удерживающей способности У4 [2] с энергией удара в 300 кДж. Расчетный контакт автобуса и ограждения произошел между 8 и 9 стойками на расстоянии 25 метров от конца ограждения. Ниже на рисунке 5 показано несколько моментов краш-теста. Все время наезда до остановки автобуса составило 1,2 с.

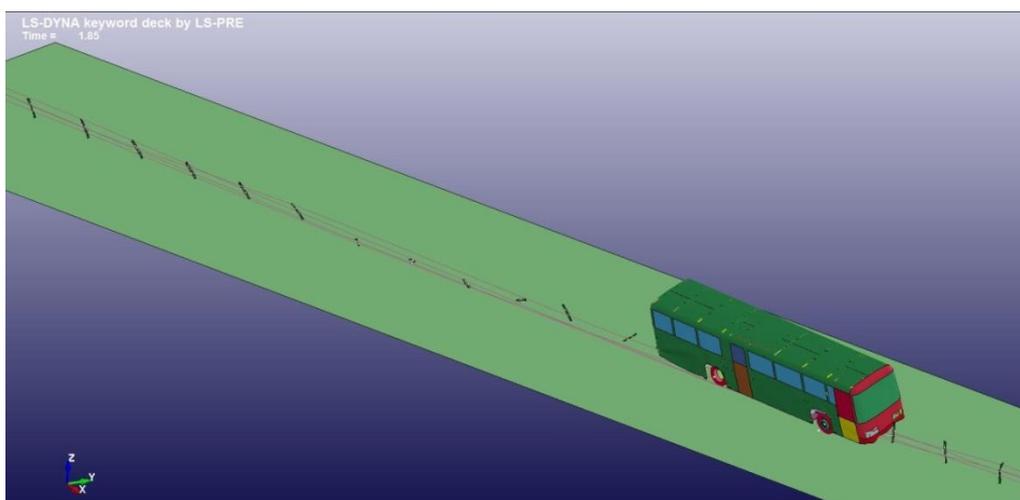
Результаты расчета сравнивались с данными натурных испытаний этого типа ограждения, которые проводились на Автополигоне ГНЦ РФ НАМИ. Анализ показал, что погрешность при расчетном определении динамического прогиба составляет около 7%. Помимо динамического прогиба, краш-модель позволяет получать такие характеристики, как ускорение в центре масс автомобиля (и, как следствие, величину ASI), степень деформации кузова и т.д. Так на рисунке 6 представлен расчетный график ускорений в центре масс автобуса.



а



б



в

Рис. 5. Взаимодействие автобуса и ограждения:  
а – начальный, б – промежуточный, в – конечный этапы

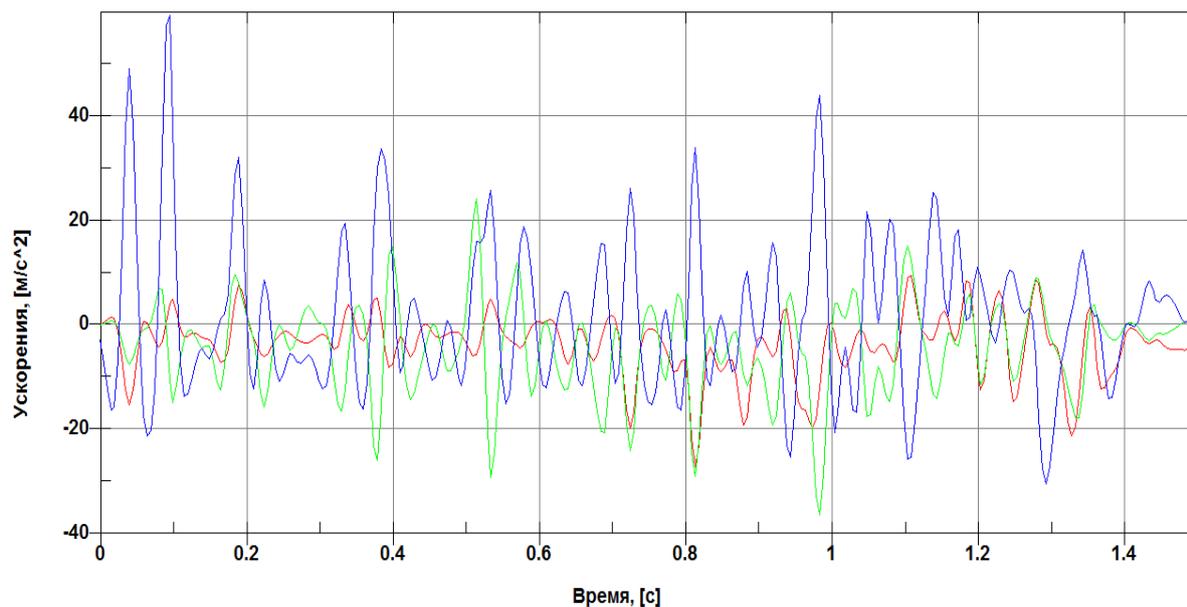


Рис. 6. График зависимости ускорений по времени

### Заключение

Метод конечных элементов в программном комплексе нелинейной динамики использовался для описания столкновения автомобиля с тросовым дорожным ограждением в условиях натуральных испытаний (краш-тестов). Показано, что для моделирования троса наиболее эффективным является балочно-оболочечный элемент. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало, что разработанные КЭ модели достаточно точно описывают процесс столкновения автомобиля и ограждения, таким образом, использование расчетного анализа для моделирования краш-тестов сокращает расходы на проведение натуральных испытаний и снижает общую стоимость проектирования ограждений и их элементов.

### Литература

1. Демьянушко И.В., Карпов И.А. Моделирование наезда автомобиля на стойку дорожного ограждения // Транспортное строительство. 2013. № 10. С. 16.

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

3. Светлицкий В.А. Механика гибких стержней и нитей. М.: Машиностроение, 1978. 222 с.

4. Hallquist J.O. LS-DYNA Keyword User's Manual, Version 960, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, March 2001.

5. Reid J.D., Karla A.L., Cody S.S. Development of Advanced Finite Element Material Models for cable barrier wire rope, 2010.

### References

1. Dem'janushko I.V., Karpov I.A. *Transportnoe stroitel'stvo*, 2013, № 10, p. 16.

2. GOST R 52721- 2007 Tehnicheskie sredstva organizacii dorozhnogo dvizhenija. Metody ispytanij dorozhnyh ograzhdenij.

3. Svetlickij V.A. *Mehanika gibkih sterzhnej i nitej* (Mechanics of flexible rods and threads), Moscow, Mashinostroenie, 1978, 222 p.

4. Hallquist, J.O. LS-DYNA Keyword User's Manual, Version 960, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, March 2001.

5. Reid J.D., Karla A.L., Cody S.S. Development of Advanced Finite Element Material Models for cable barrier wire rope, 2010.

### I. Karpov

*Development of finite element models rope guardrails using the software package LS-DYNA*

**Abstract.** The article considers the important problem arising in the numerical simulation of collision of the vehicle with cable road guard using the finite element software of the complex nonlinear dynamics of the Ls-Dyna –

selection of the type of elements to describe the work of the ropes. Analyzed various finite element model of the cables, and checked for their adequacy by comparing with experiment. In the second part of the paper shows the results of all models of the fence using the above models of the rope.

**Key words:** rope safety fences, full-scale crash tests, finite element method (FEM), CE model, Ls-Dyna, road safety.