НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ

Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408

электронный научно-технический журнал

Проблема создания конечно-элементных моделей автомобильных кресел с активными подголовниками, отвечающими требованиям пассивной безопасности # 07, июль 2013 DOI: 10.7463/0713.0578993 Солопов Д. Ю., Зузов В. Н.

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана po44chta@mail.ru zuzvalery@rambler.ru

Создание КЭМ подголовников разных уровней сложности и анализ результатов расчетов их с позиций оценки погрешностей моделирования и соответствия требованиям норм ЕЭК ООН №25

Обеспечение пассивной безопасности автомобилей, в том числе при ударе сзади, представляет собой большую проблему, решение которой в настоящее время в значительной степени реализуется на вычислительных машинах [1-7]. При ударе сзади основными объектами, воспринимающими энергию удара, являются кузов и кресло, причем, как отмечалось в статье [1], свойства материалов автомобильного подголовника следует моделировать с учетом скорости нагружения. Испытания по обеспечению пассивной безопасности автомобильных подголовников проводятся в соответствии с требованиями норм ЕЭК ООН № 25 и ГОСТ Р 41.25-2001 [8], и они предписывают произвести удар металлическим маятником массой 6,8 кг о подголовник с начальной скоростью 24,1 км/ч. В случае, если ускорение на маятнике не превышает 80g в течение 3 мс, подголовник соответствует требованиями норм ЕЭК ООН №25.

<u>Целью данной работы</u> является разработка рациональных конечно-элементных моделей (КЭМ) автомобильных кресел и отдельно подголовников для исследования их параметров и поведения при ударе методом конечных элементов (МКЭ) применительно к оценке пассивной безопасности в соответствии с требованиями стандартов с учетом

УДК 629.113

особенностей конструкции, оценка полученных результатов расчетов с позиций погрешностей и трудозатрат на разработку и решение МКЭ.

Для выполнения этой цели были созданы КЭМ подголовника 3-х уровней детализации и имеющие следующие особенности:

- модель низшего уровня (состоит из 6628 конечных элементов (КЭ), рис. 1);
- модель среднего уровня (состоит из 20 907 КЭ, рис. 2);
- модель высшего уровня (состоит из 164 952 КЭ, рис. 3);
- материал набивки подголовника полиуретановый пеноматериал (MAT_LOW_DENSITY_FOAM [4]- плотность 27 кг/м³, коэффициент Пуассона 0, модуль Юнга 0,5 ГПа);
- на набивку одет чехол из текстильного материала (MAT_FABRIC [4]);
- подголовник устанавливается на верхней части спинки кресла, нижняя часть которой зафиксирована по всем степеням свободы.

Модели имеют допущения:

- конструкция подголовника и части кресла упрощена;
- отсутствует подвес маятника и не учитывается вес объектов.



Рис. 1. КЭМ низшего уровня



Рис. 2. КЭМ среднего уровня



Рис. 3. КЭМ высшего уровня

Характеристики материала для компонентов набивки были заданы в соответствии с результатами, полученными в [1]. Согласно исследованиям, пеноматериал набивки подголовника имеет следующие характеристики: плотность 21 кг/м³, коэффициент

Пуассона 0, используется кривая нагружения (относительная деформация/напряжение) в соответствии с рис. 4 при максимальной скорости нагружения (коричневая кривая).



Рис. 4. Зависимость относительной деформации от напряжения при нагружении пенополиуретана

В результате расчетов были получены характеристики зависимости напряжения и деформации от времени, возникающих в набивке подголовника (рис. 6 и 7). Оценка напряжений и деформаций была выполнена для 3-х вариантов КЭМ подголовников (для низшего, среднего и высшего уровня разбиения модели на КЭ).

На рисунке 5 в качестве примера приведен один из графиков зависимости ускорения маятника от времени.



Рис. 5. Пиковое значение ускорения маятника при ударе о подголовник

Зависимости напряжения от времени определялись для всех элементов набивки подголовника, в связи с этим на графиках (рис. 6) приведены кривые для каждого элемента (отдельным цветом).

На графиках деформаций (рис. 7) приведены смещения узлов передней поверхности подголовника относительно узлов, располагающихся на его задней поверхности.

При испытаниях простой модели подголовника (рис. 1-3) для 3-х вариантов разбиения на конечные элементы (низший уровень 6628 КЭ, средний уровень 20 907 КЭ и высший уровень 164 952 КЭ) была выполнена оценка пикового значения ускорения в момент удара (рис. 5), перемещений в материале набивки подголовника, оценено время расчета модели компьютером и вычислена погрешность относительно результатов натурных экспериментов (рис. 8-10). Были получены характеристики напряженнодеформированного состояния, возникающего в набивке подголовника после удара маятником (рис. 6-7).



Рис. 6. Зависимости напряжения от времени для всех элементов набивки подголовника, полученные при расчетах по КЭМ: а – низшего уровня, б – среднего уровня, в – высшего

уровня



Рис. 7. Зависимость деформации набивки подголовника от времени, полученные при расчетах по КЭМ: а – низшего уровня (максимальное перемещение 30,002 мм), б – среднего уровня (максимальное перемещение 40,044 мм), в – высшего уровня (максимальное перемещение 39,251 мм)

<u>Натурные</u> испытания автомобильного подголовника, установленного на <u>стенде, с целью оценки погрешностей расчетов и соответствия требованиям норм</u> <u>ЕЭК ООН №25</u>

Для оценки погрешностей моделирования и вычислений нами был проведен натурный эксперимент, в котором реализованы нагрузочные режимы (удар маятником), регламентируемые нормами ЕЭК ООН 25 [8]. С этой целью был создан стенд для проведения натурных испытаний и выполнена серия экспериментов.

Натурный эксперимент имел следующие особенности:

- стенд (деревянный), на котором установлен подголовник, прочно зафиксирован на полу (рис. 8, а,б);

- металлический маятник массой 6,8 кг подвешен на тросах и зафиксирован (рис. 8, а, в);

- на маятнике установлен акселерометр, соединенный с осциллографом (рис. 8, в);

- маятник отпускался с высоты, при падении с которой начальная скорость при ударе достигает 24,1 км/ч;

- данные об ускорениях зафиксированы осциллографом, который соединен с компьютером.

Натурная модель имеет допущения:

- подголовник установлен на стенде, а не на автомобильном кресле;

- подвес маятника не является жестким (требование ЕЭК ООН № 25);

- на маятнике установлен один акселерометр (а не два - требование ЕЭК ООН № 25).







Рис. 9. Ускорение маятника при ударе о подголовник (ось абсцисс – время, ось ординат – ускорение g)

Была проведена серия из 36 испытаний. Получены пиковые значения ускорений при ударе. Результаты приведены в таблице 1 и на графике (рис. 10).

На рисунке 9 в качестве примера приведен один из графиков зависимости ускорения маятника от времени.

Таблица 1.

Ускорение в момент	Ускорение в момент	Ускорение в момент	Ускорение в
удара, g	удара, g	удара, д	момент удара, g
17	76	74	51
51	26	29	55
28	32	48	61
46	17	75	70
43	42	15	42
41	44	43	9
25	60	94	37
44	29	40	45
25	72	56	53
41	93	44	77
57	67	40	65

Результаты натурного эксперимента по определению ускорения



Рис. 10. Нормальное распределение ускорений маятника во время удара

Полный перечень результатов расчетов по КЭМ трех уровней и погрешностей, которые вычислялись относительно результатов натурных экспериментов, приведен в таблице 2.

Таблица 2.

Количество КЭ в модели	6628	20 907	164 952
Ускорение маятника в момент удара, g	56	51	48
Относительная погрешность ускорения, %	27%	15%	9%
Перемещения набивки подголовника (LS-DYNA), мм	30,002	40,044	39,251
Перемещения набивки подголовника (натурный эксперимент), мм	38,963	47,111	50,976
Относительная погрешность деформации, %	23%	15%	23%
Максимальное напряжение в набивке подголовника, МПа	0,017	0,020	0,026
Время выполнения расчета программой LS-DYNA	1 мин	5 мин	7 мин

Результаты расчетов по КЭМ низшего, среднего и высшего уровней

По результатам проведенных исследований установлено, что КЭМ высшего уровня (164952 КЭ) обеспечивает получение наивысшей точности при оценке ускорений (погрешность 14%). При оценке деформации наибольшая точность обеспечивается моделью среднего уровня (20907 КЭ, погрешность составляет 15%). При этом модель

подголовника соответствует требованиям пассивной безопасности, поскольку ускорение в момент удара не превышает 80 g.

<u>Создание КЭМ автомобильных кресел и их анализ с позиций оценки погрешностей</u> <u>моделирования и соответствия требованиям норм ЕЭК ООН №25</u>

Следующим этапом работы явилось создание КЭМ автомобильного кресла 3-х уровней сложности, содержащих различное количество КЭ (рис. 11-13), и проведена серия расчетов в программном комплексе LS-DYNA [2-3] согласно требованиями норм ЕЭК ООН №25 [8] и EURO NCAP [9].

При этом ставилась задача помимо оценки общей точности расчетов также и сравнительная – на сколько не учет в КЭМ кресла ухудшает точность результатов. Для оценки погрешностей результатов были составлены КЭМ трех уровней сложности (рис. 11-13).



Рис. 11. КЭМ низшего уровня (22 871 КЭ)



Рис. 13. КЭМ высшего уровня (1 744 104 КЭ)

Модели (рис. 11-13) имеют следующие особенности:

материал набивки подголовника – полиуретановый пеноматериал
(MAT_LOW_DENSITY_FOAM - плотность 27 кг/м³, коэффициент Пуассона 0, модуль
Юнга равный 0,5 ГПа (кривая деформация- напряжение показана на рисунке 4);

- на набивку одет чехол из текстильного материала MAT_FABRIC;

- набивки подголовника, спинки и сидения устанавливаются на каркас;

- спинка кресла и сидение соединены шарнирно, шарнирам заданы свойства упругости и демпфирования как в реальном объекте;

- о подголовник ударяется маятник массой 6,8 кг с начальной скоростью 24,1 км/ч;

- нижняя часть кресла зафиксирована по всем степеням свободы.

Модели имеют допущения:

- каркасные детали выполнены абсолютно жесткими;

- конструкция компонентов кресла значительно упрощена;

 точка приложения нагрузки со стороны упругого и демпфирующего элемента находится в верхней части спинки кресла.

В качестве материала набивки был использован материал (MAT_LOW_DENSITY_FOAM) с теми же характеристиками, что и в модели подголовника (рис. 1-3).

<u>Натурное испытание автомобильного кресла для оценки погрешностей</u> расчетов и соответствия требованиям норм ЕЭК ООН №25

Для того, чтобы оценить точность полученных результатов расчетов, выполненных в программе LS-DYNA, в соответствии с требованиями норм ЕЭК ООН № 25 был проведен натурный эксперимент.

Для этого был создан стенд (рис. 14), который имеет следующие особенности:

 на массивной плите, зафиксированной на полу, установлено кресло от автомобиля ВАЗ-2102 (экспортный вариант);

- металлический маятник массой 6,8 кг поднят на необходимую высоту и зафиксирован тросами;

- на маятнике установлен акселерометр, соединенный с осциллографом;

- данные об ускорениях фиксируются осциллографом, который соединен с компьютером.

Натурная модель имеет допущения:

- подвес маятника не является жестким (требование ЕЭК ООН №25);
- на маятнике установлен один акселерометр (а не два требование ЕЭК ООН №25).



Рис. 14. Стенд для проведения натурных испытаний

Высота, с которой необходимо бросать маятник, была рассчитана так, чтобы кинетическая энергия при ударе соответствовала энергии при ударе маятника массой 6,8 кг со скоростью 24,1 км/ч.

Была проведена серия из 72 испытаний. Получены пиковые значения ускорений при ударе. Результаты приведены в таблице 3 и на графиках (рис. 15-16).

На рисунке 15 в качестве примера приведен один из графиков зависимости ускорения маятника от времени.



Рис. 15. Ускорение маятника при ударе о подголовник (ось абсцисс – время, ось ординат – ускорение, g)



Рис. 16. Нормальное распределение ускорения маятника во время удара.

Таблица 3.

Ускорение в момент	Ускорение в момент	Ускорение в момент	Ускорение в
удара, g	удара, g	удара, д	момент удара, g
17	76	74	51
51	26	67	55
28	64	48	61
46	17	75	70
61	59	15	64
74	95	60	9
25	60	94	55
65	29	73	45
25	72	56	53
79	93	86	77
57	67	76	65
14	17	44	75
50	77	58	58
81	99	110	57
65	53	95	66
85	78	69	50
42	44	83	97
92	7	11	87

Результаты натурного эксперимента по определению ускорения

По разработанным КЭМ 3-х уровней были проведены расчеты, результаты которых представлены в таблице 4 и на рисунках 17-18.



Рис. 17. Зависимости напряжения от времени для всех элементов набивки подголовника, полученные для КЭМ: а – низшего уровня, б – среднего уровня, в – высшего уровня



Рис. 18. Зависимость перемещений набивки подголовника от времени для КЭМ: а низшего уровня (4,753 мм), б – среднего уровня (17,164 мм), в – высшего уровня (3,863 мм)

Из анализа результатов видно, что точность результатов возросла (по ускорениям погрешность составляет 9%, по деформациям - 8%) при использовании КЭМ кресла высшего уровня детализации по сравнению с расчетами по модели только подголовника. Это вполне очевидно, т.к. модель кресла наиболее приближена к реальной конструкции. При этом, подголовник соответствует требованиям методики ЕЭК ООН №25, так как ускорение маятника при ударе не превышает 80 g.

Таблица 4.

Количество КЭ в модели	22 871	83 436	1 744 104
Ускорение маятника в момент удара, g	54	41	30
Относительная погрешность ускорения, %	16%	12%	9%
Перемещения набивки подголовника (LS-DYNA), мм	4,753	17,164	3,863
Перемещения набивки (натурный эксперимент), мм	7,312	20,192	4,198
Относительная погрешность деформации, %	35%	15%	8%
Максимальное напряжение в набивке подголовника, МПа	0,0116	0,0145	0,0101
Время выполнения pacчета программой LS- DYNA	16 мин	1ч 5 мин	16ч 15мин

Результаты расчетов по КЭМ низшего, среднего и высшего уровней

Для более полного представления предлагаемого подхода по моделированию нами была создана КЭМ другого кресла - автомобиля Volvo XC80 (рис. 19) и проведены аналогичные расчеты и исследования.



Рис. 19. Трехмерная модель кресла автомобиля Volvo XC80

Были созданы также КЭМ 3-х уровней (рис. 20-23), которые имеет следующие особенности:

- модель низшего уровня состоит из 47 898 конечных элементов (рис. 20);

- модель среднего уровня состоит из 112 877 конечных элементов (рис. 21);

- модель высшего уровня состоит из 879 699 конечных элементов (рис. 22);

- каркас кресла состоит из штампованных листов и трубчатых элементов;

- учитывается жесткость элементов каркаса;

- к каркасу сидения и спинки прикреплены пружины, на которые опираются набивки спинки и сидения;

- материал набивки подголовника и мягких элементов кресла – пеноматериал (MAT_LOW_DENSITY_FOAM) плотностью 27 кг/м³, коэффициент Пуассона 0, модуль Юнга равный 0,5 ГПа, кривая напряжение/деформация в соответствии с рисунком 4 (коричневая кривая при тах скорости нагружения);

- на набивку одет чехол из текстильного материала MAT_FABRIC;

- спинка кресла и сидение соединены шарнирно, шарнирам заданы свойства упругости и демпфирования;

- о подголовник ударяется маятник массой 6,8 кг с начальной скоростью 24,1 км/ч;

- нижняя часть кресла зафиксирована по всем степеням свободы.



Рис. 20. КЭМ кресла низшего уровня (47 898 КЭ)



Рис. 21. КЭМ кресла среднего уровня (112 877 КЭ)



Рис. 23. КЭМ кресла высшего уровня в разрезе

По разработанным КЭМ 3-х уровней были проведены расчеты, результаты которых представлены в таблице 5 и на рисунках 21-22.



Рис. 21. Зависимости напряжения от времени для всех элементов набивки подголовника, полученные для КЭМ: а – низшего уровня, б – среднего уровня, в – высшего уровня



Рис. 22. Зависимость перемещений набивки подголовника от времени для КЭМ: а низшего уровня (21,657 мм), б – среднего уровня (11,8 мм), в – высшего уровня (13,425 мм).

Количество КЭ в модели	47 898	112 877	879 699
Ускорение маятника в момент удара, g	34	27	17
Относительная погрешность ускорения, %	10%	8%	5%
Перемещения набивки	21.657	11 200	12 425
ПОДГОЛОВНИКА (LS- DYNA), мм	21,037	11,000	13,423
Перемещения набивки			
(натурный эксперимент),	24,610	12,688	13,840
ММ			
Относительная погрешность деформации, %	12%	7%	3%
Максимальное напряжение в набивке подголовника, МПа	0,0148	0,0130	0,0136
Время выполнения pacчета программой LS- DYNA	47 мин	3ч 5 мин	15ч 35мин

Результаты расчетов по КЭМ низшего, среднего и высшего уровней

Наилучшая точность при оценке ускорений (5 %) и деформаций (8%) также, как и в предыдущих расчетах обеспечивается КЭМ высшего уровня (879 699 КЭ).

По результатам проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

- использование КЭМ только подголовника (без моделирования кресла) целесообразно использовать для предварительных расчетов с целью подбора характеристик набивки;
- модель 3-го уровня детализации (высшего уровня), (в последнем примере состоящая из 879 699 КЭ), обеспечивает наибольшую точность при оценке ускорений равную 5%, а также наибольшую точность при оценке перемещений (5% и 8% соответственно);
- 3. КЭМ 2-го уровня детализации (среднего уровня) можно рассматривать как рациональные (с позиций трудозатрат на ее создание и решение задачи и по погрешностям результатов) и их целесообразно использовать для предварительных и многовариантных расчётов (в последнем примере - 83 436 КЭ, относительная

погрешность 12% по сравнению с экспериментом по ускорениям и 15% по перемещениям).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора №9905/17/07-к-12 между ОАО «КАМАЗ» и «Московским государственным техническим университетом имени Н.Э. Баумана».

Список литературы

- Солопов Д.Ю., Зузов В.Н. Решение проблемы создания конечно-элементных моделей для проектирования автомобильных кресел с активными подголовниками, отвечающими требованиям пассивной безопасности // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 6. DOI: <u>10.7463/0613.0574693</u>
- LS-DYNA keyword user's manual. Livermore Software Technology Corporation, 1993-2003. 2206 p.
- 3. Барлам Д.М. Решение контактной задачи теории упругости методом конечных элементов // Проблемы прочности. 1983. № 4. С. 39-43.
- Croop B., Lobo H. Selecting Material Models for the Simulation of Foams in LS-DYNA» // Proc. of the 7th LS-DYNA Conference. Austria, Salzburg, 2009. Available at: <u>http://www.dynamore.de/en/downloads/papers/09-conference/papers/D-II-04.pdf</u>, accessed 30.05.2013.
- 5. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC Visual Nastran for Windows. М.: ДМК Пресс, 2004. 704 с.
- 6. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/Nastran for Windows. М.: ДМК Пресс, 2001. 448 с.
- 7. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: справочное пособие. М.: Машиностроение-1, 2004. 512 с.
- ГОСТ Р 41.25-2001 (Правила ЕЭК ООН №25). Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения подголовников вмонтированных или не вмонтированных в сиденья транспортных средств. М.: Издательство стандартов, 2002. 28 с.
- 9. The dynamic assessment of car seats for neck injury protection. Testing protocol. European new car assessment programme (Euro NCAP), 2009. 66 p.
- 10. ANSYS программа конечно-элементного анализа / Пер. и ред. Б.Г. Рубцова; оформл. Л.П. Остапенко. М.: CAD-FEM GmbH, 1998. 66 с.

SCIENCE and EDUCATION

EL Nº FS77 - 48211. Nº0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

roblem of creating finite-element models of car seats with active head restraints to meet the requirements of passive safety

07, July 2013 DOI: 10.7463/0713.0578993 Solopov D.Yu., Zuzov V.N.

> Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation po44chta@mail.ru zuzvalery@rambler.ru

In this work rational finite element models of head restraints of car seats were developed. Assessment of those models regarding errors of simulation and correspondence to the requirements of UNECE Regulations N_2 25 was carried out. Those models were also evaluated regarding errors of results; labor cost of development and solving with the use of software packages which implement the FEM (ANSYS, Femap and LS-DYNA) was also carried. Calculations based on the finite element method provide a possibility to obtain the whole information on the process of emergency loading required for estimating safety of car seats in case of rear-end collisions.

Publications with keywords: tension, error, bending, finite element method, LS-

<u>DYNA</u>, deformations, passive safety, head restraint, car seat, pendulum, <u>UNECE Regulations №</u> 25

Publications with words: tension, error, bending, finite element method, LS-

<u>DYNA</u>, deformations, passive safety, head restraint, car seat, pendulum, <u>UNECE Regulations №</u> 25

References

1. Solopov D.Yu., Zuzov V.N. Reshenie problemy sozdaniya konechno-elementnykh modeley dlya proektirovaniya avtomobil'nykh kresel s aktivnymi podgolovnikami, otvechayushchimi trebovaniyam passivnoy bezopasnosti [Solving the problem of creation of finite element models for car seats with active head restraints designed to meet the requirements of passive safety]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2013, no. 6. DOI: <u>10.7463/0613.0574693</u>

2. *LS-DYNA keyword user's manual*. Livermore Software Technology Corporation, 1993-2003. 2206 p.

3. Barlam D.M. Reshenie kontaktnoy zadachi teorii uprugosti metodom konechnykh elementov [Solving a contact problem of elasticity theory by the finite-element method]. *Problemy prochnosti*, 1983, no. 4, pp. 39-43. (Trans. version: *Strength of Materials*, 1983, vol. 15, no. 4, pp. 480-485. DOI: 10.1007/BF01522425).

4. Croop B., Lobo H. Selecting Material Models for the Simulation of Foams in LS-DYNA. *Proc. of the 7th LS-DYNA Conference*, Salzburg, 2009. Available at: <u>http://www.dynamore.de/en/downloads/papers/09-conference/papers/D-II-04.pdf</u>, accessed 30.05.2013.

5. Shimkovich D.G. *Raschet konstruktsiy v MSC Visual Nastran for Windows* [Calculation of designs in MSC Visual Nastran for Windows]. Moscow, DMK Press, 2004. 704 p.

6. Shimkovich D.G. Raschet konstruktsiy v MSC/Nastran for Windows [Calculation of designs in MSC/Nastran for Windows]. Moscow, DMK Press, 2001. 448 p.

7. Chigarev A.V., Kravchuk A.S., Smalyuk A.F. *ANSYS dlya inzhenerov* [ANSYS for engineers]. Moscow, Mashinostroenie-1, 2004. 512 p.

8. GOST R 41.25-2001 (Pravila EEK OON N 25). Edinoobraznye predpisaniya, kasayushchiesya ofitsial'nogo utverzhdeniya podgolovnikov vmontirovannykh ili ne vmontirovannykh v siden'ya transportnykh sredstv [State Standard of RF 41.25-2001 (UNECE regulation N 25). Uniform provisions concerning the type approval of head restraints (headrests), whether or not incorporated in vehicles]. Moscow, Standards Publishing House, 2002. 28 p.

9. *The dynamic assessment of car seats for neck injury protection. Testing protocol.* European New Car Assessment Programme (Euro NCAP), 2009. 66 p.

10. Rubtsov B.G. (ed.) *ANSYS programma konechno-elementnogo analiza* [ANSYS is the program of finite element analysis].Transl. from English. Moscow, CAD-FEM GmbH, 1998. 66 p.