

Решение проблемы создания конечно-элементных моделей для проектирования автомобильных кресел с активными подголовниками, отвечающими требованиям пассивной безопасности

06, июнь 2013

DOI: 10.7463/0613.0574693

Солопов Д. Ю., Зузов В. Н.

УДК 629.113

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

po44chta@mail.ru

zuzvalery@rambler.ru

Общие проблемы исследования пассивной безопасности автомобиля при ударе сзади

В последние годы плотность потока машин, особенно в крупных городах, резко возрастает. Это приводит к увеличению количества мелких ДТП при которых один автомобиль ударяет сзади другой.

Наиболее достоверная оценка пассивной безопасности транспортного средства в целом и автомобильных кресел в частности возможна только при статистическом анализе аварийных ситуаций и выявления наиболее характерных случаев.

По данным ГИБДД в России ежегодно происходит около 200 тысяч ДТП, в которых погибает приблизительно 27 тысяч человек и получают ранения около 250 тысяч.

Таблица 1.

Общее количество ДТП, число погибших и получивших травмы (раненых) в России

(по статистике ГИБДД)

Год	Кол-во ДТП	Погибло	Ранено
2006	229 140	32 724	285 362
2007	233 809	33 308	292 206
2008	218 322	29 936	270 883
2009	203 603	26 084	257 034
2010	199 431	26 567	250 635
2011	199 868	27 953	251 848
2012	203 597	27 991	258 618

На рисунке 1 приведена классификация ДТП по данным зарубежных исследователей для легковых автомобилей. Столкновения автомобилей с ударом сзади не столь распространены как фронтальные, однако, тысячи людей ежегодно погибают или получают серьезные травмы при таких столкновениях.

При ударе по автомобилю сзади, люди, находящиеся в салоне, рискуют получить травмы шейного отдела позвоночника и головы. Такие травмы трудно диагностировать и трудно лечить, в связи с этим проблема повышения пассивной безопасности автомобиля за счет улучшения безопасности подголовников является чрезвычайно важной.

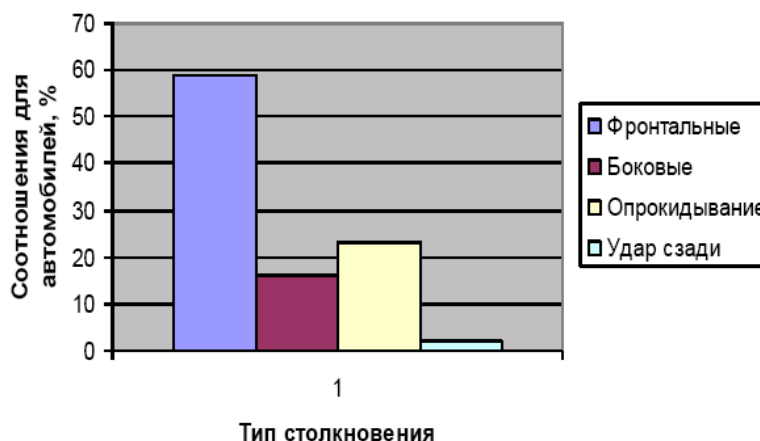


Рис. 1. Статистика ДТП для легковых автомобилей

При проектировании автомобильных кресел необходимо проводить их испытания с использованием условий и нагрузочных режимов, регламентируемых специальными методиками [1, 2]. В случае если кресло не удовлетворяет предъявляемым требованиям, необходимо внесение изменений в его конструкцию.

Создание конечно-элементных моделей (КЭМ) и проведение их испытаний с использованием современных программных комплексов способно существенно повысить эффективность процесса проектирования. Недостаток данного метода в том, что это сложная инженерная задача, требующая высокой квалификации инженеров-расчетчиков, применения компьютеров высокой мощности и имеющая большую длительность времени расчета модели компьютером.

Для повышения эффективности решения данной задачи проведена работа по созданию метода проектирования автомобильных кресел.

Целью данной работы является разработка рациональных КЭМ автомобильных кресел и, в том числе, с активными подголовниками с учетом особенностей конструкции, исследование их характеристик и поведения при ударе, осуществляемом в соответствии с существующими стандартами пассивной безопасности, оценка полученных результатов расчетов с позиций погрешностей и трудозатрат на разработку и решение с помощью программных комплексов, реализующих МКЭ (ANSYS и LS-DYNA) [3-7].

Обзор проблемы исследования безопасности автомобильных кресел

Работы по изучению проблемы пассивной безопасности автомобиля при ударе сзади в целом и безопасности автомобильных кресел в частности проводятся различными организациями по всему миру начиная со второй половины XX века.

Наиболее интересными и близкими к теме данной статьи можно отнести работу [8], в которой описаны результаты эксперимента, проведенного в соответствии с требованиями EURO NCAP, для которого была разработана специальная натурная модель кресла и испытательный стенд (рис. 2). Было выполнено моделирование эксперимента в программном комплексе «Madymo». При этом точность полученных результатов оценивалась путем сравнения с данными натурных экспериментов.



Рис. 2. Испытательный стенд

Компания LSTC (разработчик LS-DYNA) в сотрудничестве с организацией EURO NCAP разработала компьютерную модель манекена BioRIDII для использования в программном комплексе LS-DYNA. При его создании был проведен ряд расчетов, оценивающих эффективность использования манекена для оценки безопасности автомобильных кресел.

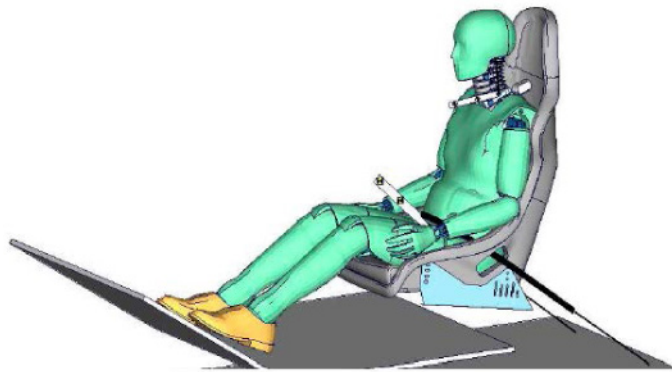


Рис. 3. Модель манекена и кресла, имитирующая испытания по методике EURO NCAP с использованием манекена BioRIDII

Данные этих расчетов описаны в документации к BioRIDII «Fat LS-DYNA BioRIDII model» [9]. В работе продемонстрированы результаты расчета манекена BioRIDII, который пристегнут в кресле спортивного автомобиля (рис. 3). Выполнены два варианта нагружения кресла с имитацией «легкого» и «среднего» ударов.

Специалистами Австралийского университета Monash University в работе [10] описана серия динамических испытаний, проведенных в соответствии с методикой EURO NCAP. В эксперименте был использован манекен HybridIII (рис. 4), измерения проводились для обычного кресла и для кресла с дополнительным упругим элементом.

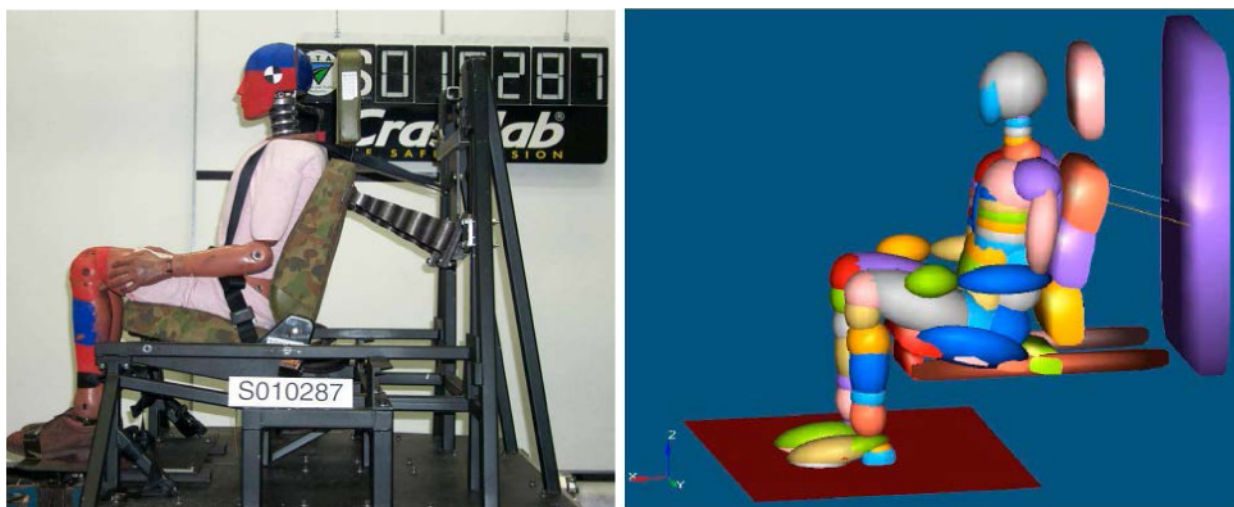


Рис. 4. Испытания по оценке безопасности автомобильных кресел, выполненные в университете Monash University

В статье представлены результаты расчетов, выполненные в программном комплексе MADYMO. Для исследований использована компьютерная модель, которая имитирует столкновение манекена, сидящего в кресле, с препятствием. Предложен вариант конструкции кресла, которая позволит лучше поглотить энергию удара. Сначала испытания проводятся с обычным автомобильным креслом, затем с креслом со встроенным упругим элементом.

Специалистами американского университета University of Cincinnati проведена серия экспериментов с целью улучшения безопасности кресел военных автомобилей при подрыве (рис. 5). Полученные результаты описаны в статье [11].

Аналогичная работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана, целью которой является повышение живучести экипажа бронированной машины при подрыве [12].



Рис. 5. Испытания по оценке безопасности кресел при подрыве автомобиля, выполненные в университете University of Cincinnati

Нормативные документы регламентирующие требования к пассивной безопасности
автомобильных кресел

На основании статистических данных в России и за рубежом были разработаны требования, регламентирующие пассивную безопасность транспортных средств. В настоящее время каждый вновь разрабатываемый автомобиль должен соответствовать целому ряду стандартов пассивной безопасности, основными из которых являются правила единой экономической комиссии при Организации Объединенных Наций (ЕЭК ООН) и EURO NCAP (европейский комитет по проведению независимых краш-тестов авто с оценкой активной и пассивной безопасности).

Информация об испытаниях автомобильных кресел и подголовников по методике ЕЭК ООН №25 содержится в документе «Единообразные предписания касающиеся официального утверждения подголовников вмонтированных или не вмонтированных в сидения транспортных средств», а также в ГОСТ Р 41.25-2001 [1].

Согласно данной методике подголовник, установленный на кресло, проходит комплекс испытаний с целью оценки прочности при статическом нагружении и оценки поглощения энергии при ударе.

Эксперимент по оценке поглощения энергии при ударе выполняется путем удара металлического маятника массой 6,8 кг о подголовник с начальной скоростью 24,1 км/ч. В

случае, если ускорение на маятнике не превышает 80 g в течение 3 мс, подголовник соответствует предъявляемым требованиям.

Для оценки пассивной безопасности автомобилей по системе EURO NCAP выполняются испытания автомобильных кресел, при которых имитируется удар по транспортному средству сзади [2].

Полученные данные считываются датчиками, расположенными в голове и позвоночнике манекена, а также фиксируются высокоскоростными видеокамерами.



Рис. 6. Испытания автомобильного кресла по системе EURO NCAP

Использование пеноматериалов в конструкции автомобильных кресел

Процесс проектирования автомобильного кресла включает в себя разработку КЭМ и дальнейшие ее исследования в соответствии с требованиями международных методик.

При этом одна из основных задач состоит в том, чтобы решить проблему выбора свойств материалов для компонентов конструкции кресла.

Пеноматериалы применяются в конструкции автомобильных кресел со следующими целями:

- обеспечение комфорта пассажира, сидящего в кресле;
- защиты пассажира от возможного удара о жесткие части каркаса;
- поглощения энергии при ударе в случае ДТП.

Для решения этих задач было создано большое количество различных пеноматериалов, обладающих разнообразными характеристиками. Такого разнообразия свойств можно добиться за счет выбора характеристик основного материала и выбора размера пузырьков, которые формируют ячейки пеноматериала.

Таким образом, можно добиться того, чтобы полученный материал обладал необходимыми свойствами упругости или жесткости. Жесткие пеноматериалы

подвержены разрушению под воздействием нагрузки, упругие способны восстанавливать первоначальную форму после снятия нагрузки.

Для оценки точности создаваемых КЭМ подголовников и кресел необходимо определить свойства материала набивки моделируемого подголовника.

Натурный эксперимент по определению свойств материала набивки подголовника в статике

С целью оценки свойств материала набивки подголовника был выполнен натурный эксперимент, в процессе которого осуществлялось нагружение подголовника от кресла автомобиля ВАЗ 2102 (экспортный вариант) на испытательном стенде (рис. 7).

Эксперимент проводился следующим образом:

- к подголовнику прикладывалась квазистатическая нагрузка в диапазоне от 0 до 490 Н (50 кгс) через мотоциклетный шлем, который по форме соответствует голове человека;
- величина прикладываемого усилия оценивалась динамометром, а перемещение набивки подголовника прогибомером.



Рис. 7. Нагружение подголовника (кресло автомобиля ВАЗ 2102) на испытательном стенде

Результаты нагружения представлены на рис. 8 и в табл. 2. При оценке напряжений, возникающих на поверхности контакта, было сделано допущение, что поверхность контакта является окружностью с радиусом 0,05 м.

Нагружение задано квазистатическим, которое можно считать «пограничным» с режимом «легкого» удара по EURO NCAP (рис. 6, 11).

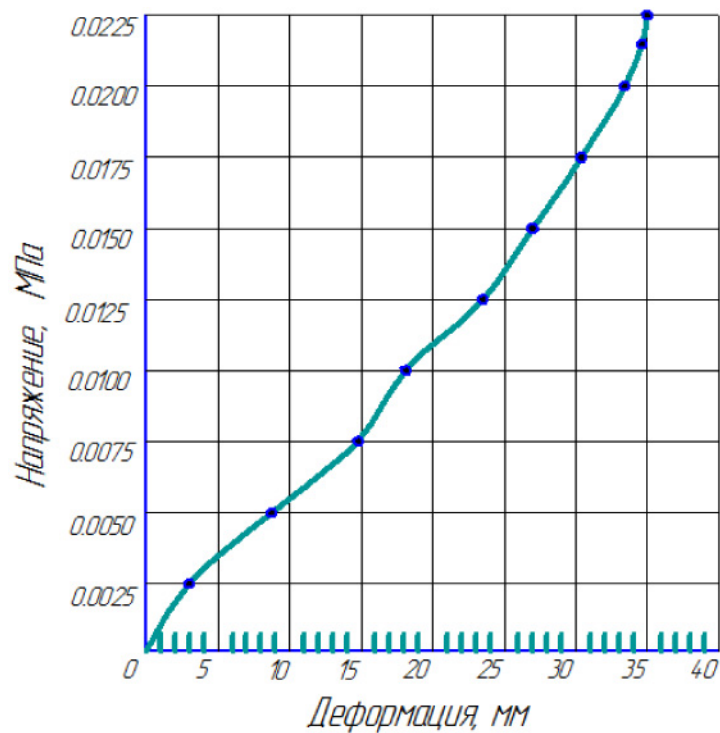


Рис. 8. Зависимость деформации материала подголовника от напряжения на поверхности контакта

Таблица 2.

Зависимость напряжений на поверхности контакта и деформаций материала подголовника от нагружения

Напряжение на поверхности контакта, МПа	Деформация набивки, мм
0,0025	3,26
0,0050	8,5
0,0075	15,8
0,0100	18,5
0,0125	27,1
0,0150	30,8
0,0175	33,4
0,0200	34,2
0,0225	35,0

Серия аналогичных экспериментов была выполнена в компании DatapointLab (New York) [7].



Рис. 9. Установка для испытания образцов пеноматериалов

Испытания выполнялись на установке BOSE Enduratec ELF 320 (рис. 9), на которой для двух различных типов пеноматериалов была проведена серия из 10 испытаний.

Эксперименты проводились на образцах серого полиуретана плотностью 27 кг/м^3 , который используется в набивках различных кресел и мягкой мебели. Особенность материала в том, что он имеет открытые ячейки, а также быстро восстанавливает первоначальную форму после снятия нагрузки.

Для испытаний использовались цилиндры из пеноматериала диаметром 12,5 мм и высотой 12,5 мм. Характеристики материала при этом не изменялись, изменялась только скорость деформации материала.

График зависимости напряжений, возникающего в испытываемом образце, и деформаций представлен на рис. 10.

Можно выделить 3 следующие зоны:

Зона 1 – увеличиваются напряжения и возрастает деформация;

Зона 2 – материал деформируется практически без увеличения напряжений;

Зона 3 – резкое возрастание напряжений при незначительном увеличении деформаций.

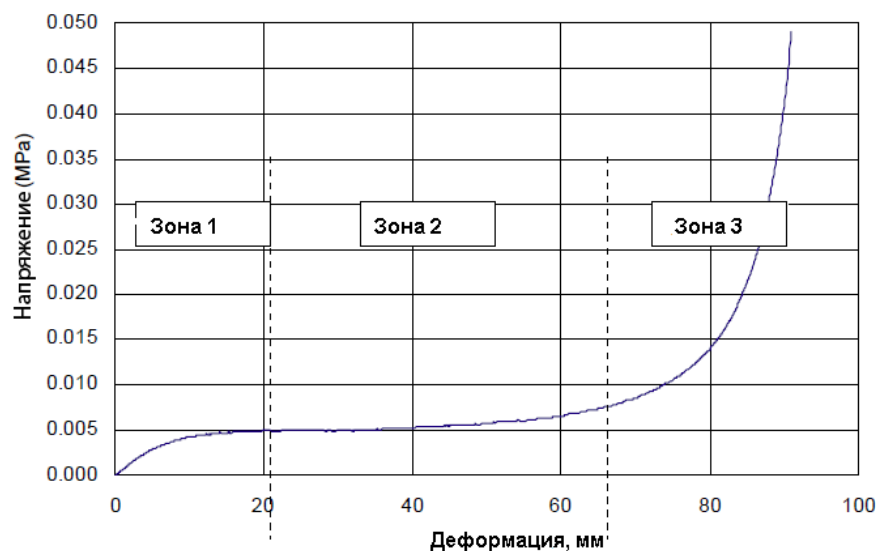


Рис. 10. График изменений напряжений и деформаций пеноматериала при его нагружении

Из графика видно, что деформация при испытаниях подголовника (рис. 8) изменяется в диапазоне от 0 до 50 мм, а при нагружении цилиндрического образца (рис. 10) от 0 до 90 мм. Это, очевидно, связано с тем, что набивка подголовника устанавливается на жесткий каркас, который ограничивает перемещение материала при его нагружении.

Как следует из анализа графиков при быстром нагружении материала происходит его разрыв.

В рассматриваемом диапазоне перемещений можем видеть, что результаты испытаний образцов пеноматериала, полученные в DatapointLab и нами, имеют схожий характер.

Испытание пенополиэтиленовых образцов

Вторая серия из 5 экспериментов проводилась на образцах пенополиэтилена плотностью 21 кг/м^3 , который используется в набивках защитных спортивных матов, различных защитных упаковках и т.д. В экспериментах использовался образец толщиной 12 мм, набранный из листов толщиной 5-6 мм.

Особенность материала в том, что он имеет закрытые ячейки. Они образуются внутри материала при изготовлении, когда вспенивающий материал газ остается внутри ячеек. В этом случае структура ячеек при отверждении материала не нарушается.

На графике (рис. 11) можем наблюдать отличие результатов от результатов предыдущего эксперимента.

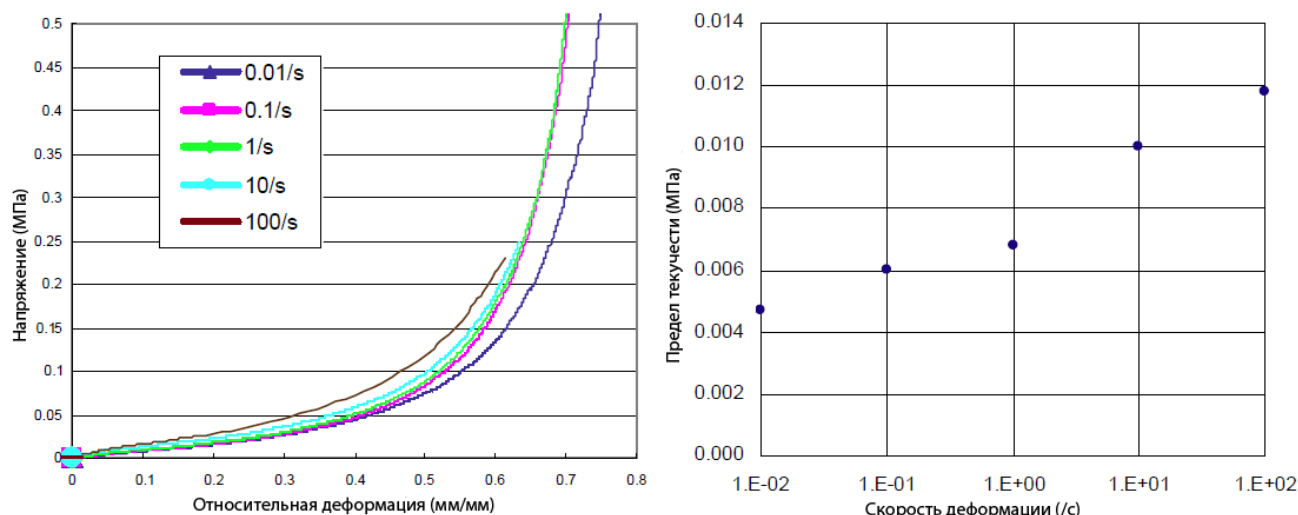


Рис. 11. Кривые нагружения испытываемого образца пенополиэтилена в зависимости от скорости нагружения (левый график); изменение предела текучести в зависимости от скорости деформации исследуемых образцов пенополиэтиленов (правый рисунок)

Моделирование пеноматериалов в программном комплексе LS-DYNA

Набивка мягких компонентов конструкции кресла, как правило, изготавливается из полиуретановых пеноматериалов.

При моделировании набивки кресла в программном комплексе LS-DYNA наиболее часто применяются MAT_LOW_DENSITY_FOAM [4], MAT_FU_CHANG_FOAM, MAT_CRUSHABLE_FOAM, MAT_MODIFIED_CRUSHABLE_FOAM ([7]), которые моделируют характеристики полиуретановых пеноматериалов, хорошо согласующихся с реальными.

Материалы моделируются заданием следующих характеристик:

- плотность материала;
- модуль упругости первого рода;
- кривые нагружения и разгрузки (зависимости напряжение/деформация или упругие свойства/демпфирование);
- коэффициент Пуассона;
- способность восстанавливать первоначальную форму после снятия нагрузки (не разрушающиеся или разрушающиеся материалы).

Поскольку необходимо, чтобы набивка восстанавливала первоначальную форму после удара, в разработанных моделях была использована модель материала MAT_LOW_DENSITY_FOAM.

В элементах каркаса кресла были использованы эластичный изотропный материал MAT_ELASTIC и абсолютно жесткий материал MAT_RIGID.

**Создание КЭМ подголовников и их анализ с позиций оценки погрешностей
моделирования и соответствия требованиям норм ЕЭК ООН №25**

На начальном этапе работы по улучшению безопасности автомобильных кресел наиболее рационально использовать КЭМ, которые рассчитываются компьютером за минимальный период времени.

Это позволяет за короткий срок провести достаточно большое количество экспериментов и решить при этом следующие задачи:

- оценить адекватность задаваемых характеристик материалов;
- подобрать наиболее целесообразные контактные условия между компонентами модели;
- оценить точность результатов, которую обеспечивает модель.

Результаты, полученные при решении данной задачи, могут значительно облегчить работу по созданию КЭМ более высокого уровня сложности, компоненты которых выполнены с большей детализацией.

С целью оценки точности разработанной модели подголовника в программе LS-DYNA была смоделирована задача, адекватная натурному эксперименту.

КЭМ имеет следующие особенности (рис. 12 и 13):

- модель стенда и нагружающего устройства состоит из 43 525 конечных элементов (КЭ), подголовник моделировался 3-я видами КЭМ: 2785 КЭ, 87 876 КЭ и 112 877 КЭ (рис. 12);
- подголовник фиксируется пуансоном на станине, которая закреплена по всем степеням свободы (условия закрепления соответствуют натурному эксперименту);
- нагрузка передается от пуансона пресса к подголовнику через жесткую пластину и мотоциклетный шлем, имеющий форму головы;
- величина и диапазон (от 0 до 50 кгс) прикладываемой нагрузки соответствует натурному эксперименту (рис. 8);
- набивка подголовника надета на жесткий каркас, жесткость которого учитывается при расчете;
- материал набивки подголовника и мягких элементов кресла – пеноматериал (MAT_LOW_DENSITY_FOAM [3]) плотностью 27 кг/м³, коэффициент Пуассона 0, модуль Юнга 0,5 ГПа;
- на набивку одет чехол из текстильного материала MAT_FABRIC.

Модель имеет допущения:

- конструкция пресса упрощена;
- пластина и шлем созданы из оболочных КЭ типа shell.

В результате проведенных экспериментов были получены графики зависимостей напряжения и деформации от времени. На рисунках 15 и 16 приведены графики для модели подголовника высшего уровня, которая обеспечила наибольшую точность получаемых результатов. На рисунке 17 приведены сводные графики изменений напряжений и деформаций для моделей подголовника низшего, среднего и высшего уровней (рис. 12).

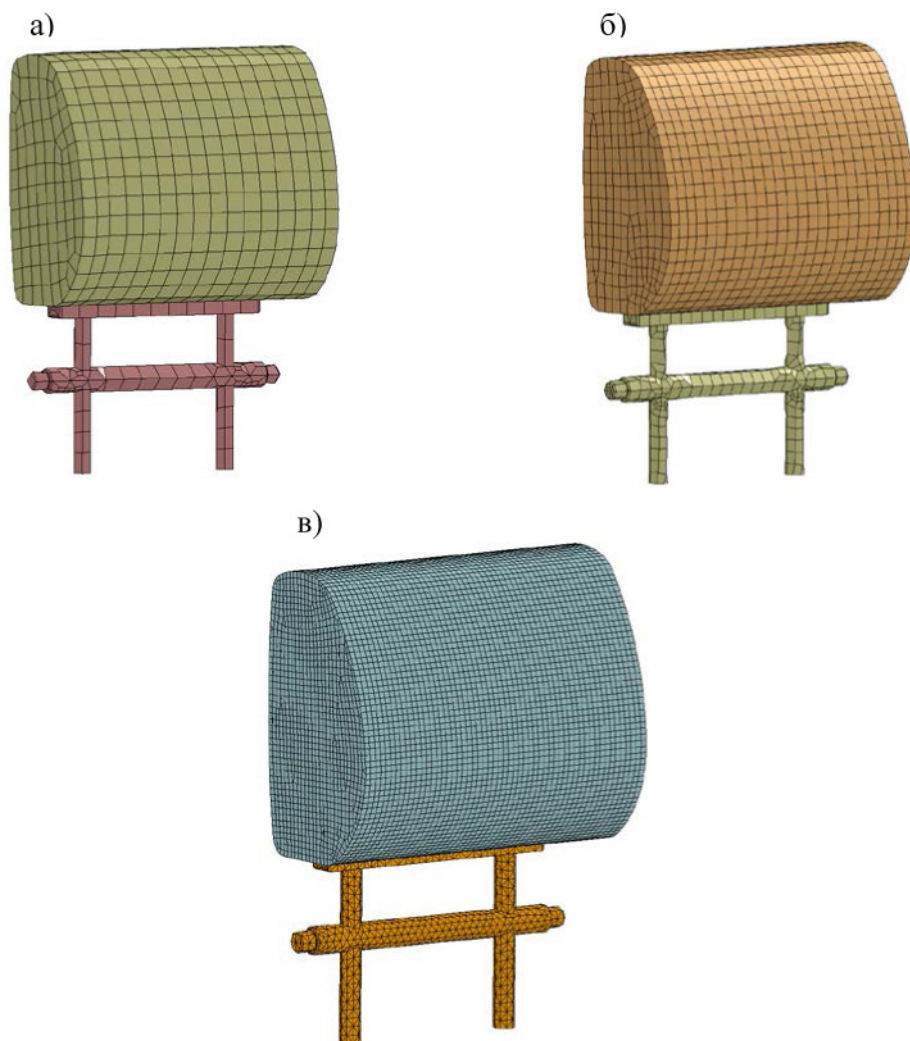


Рис. 12. КЭМ подголовников: а - низшего уровня (2785 КЭ), б - среднего уровня (87 876 КЭ), в - высшего уровня (112 877 КЭ)

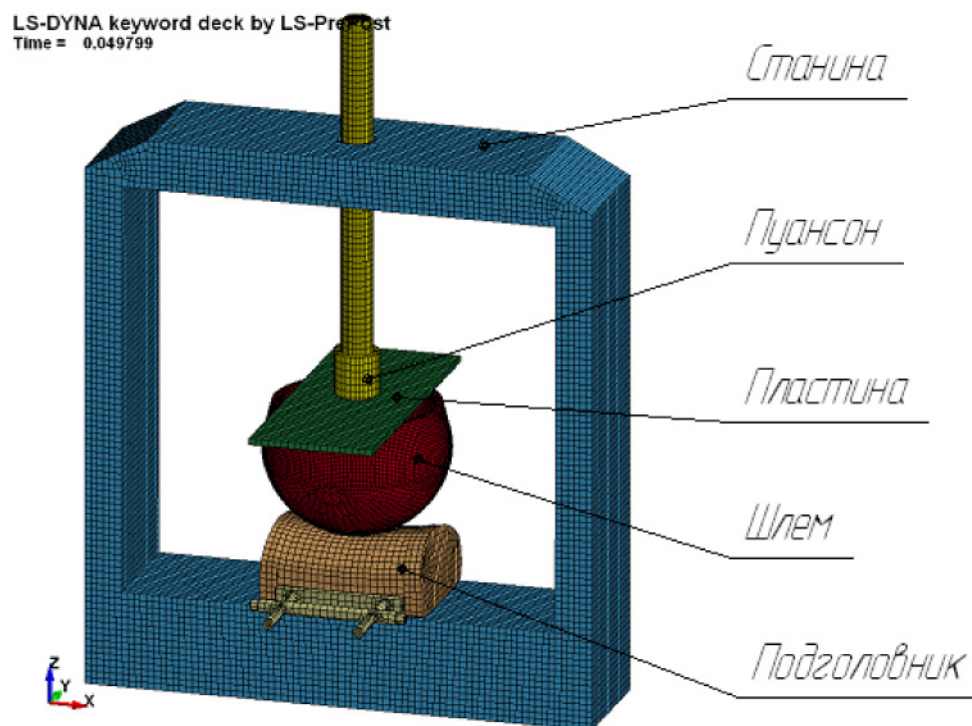


Рис. 13. КЭМ, воспроизводящая условия натурального эксперимента

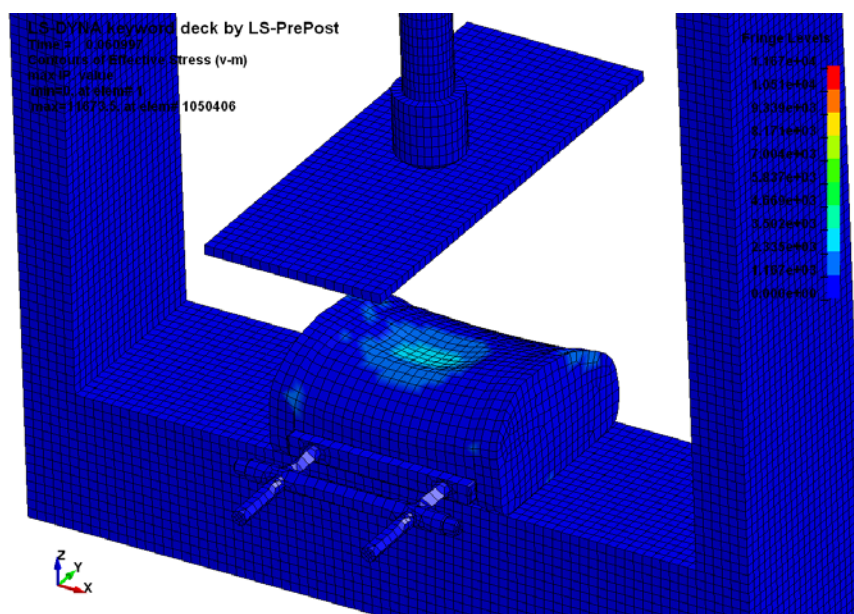


Рис. 14. Картина напряженного состояния, возникающего при нагружении подголовника в программе LS-DYNA (шлем не показан)

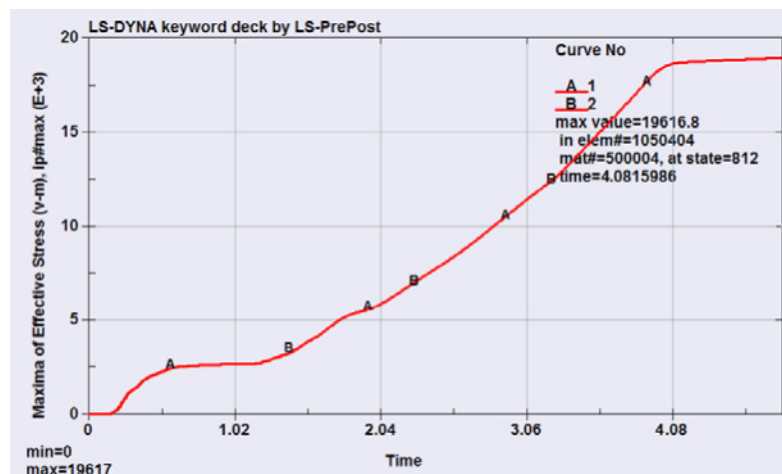


Рис. 15. График зависимости напряжения от времени при нагружении подголовника в программе LS-DYNA

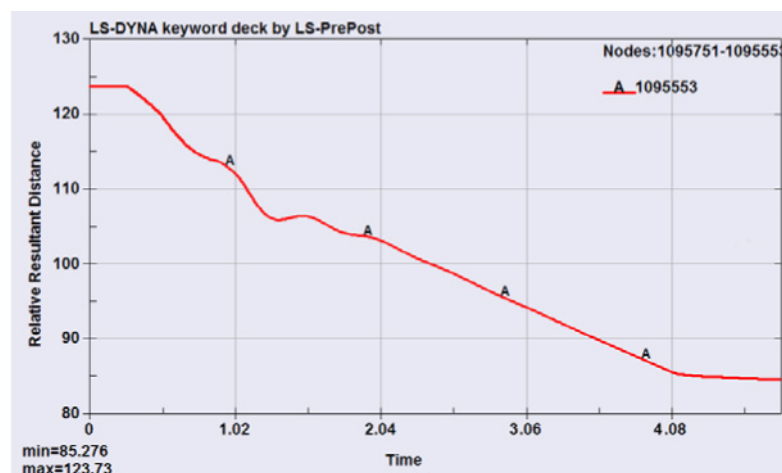


Рис. 16. График зависимости деформации от времени при нагружении подголовника в программе LS-DYNA

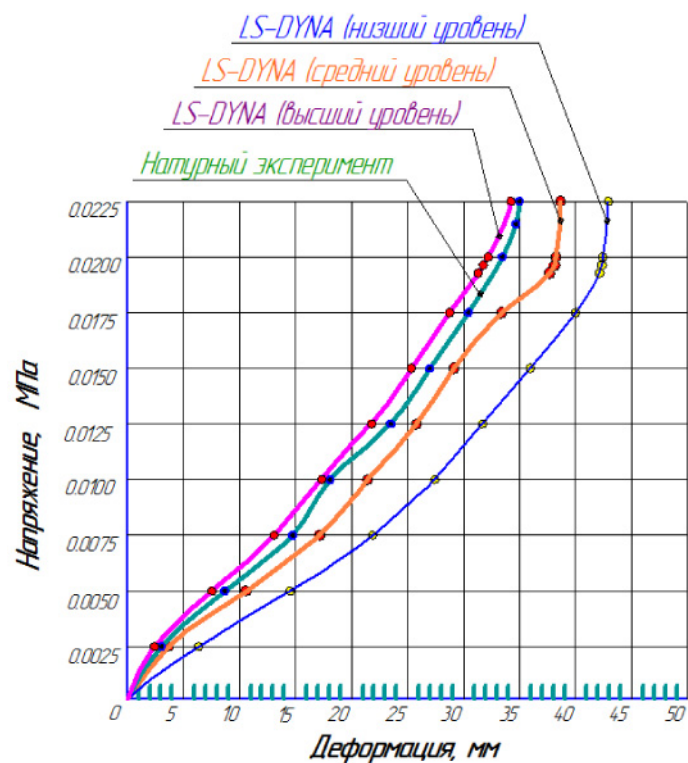


Рис. 17. Результаты расчетов по оценке свойств набивки материала подголовника при квазистатическом нагружении

Таблица 3.

Результаты эксперимента и расчета по оценке свойств набивки материала подголовника при статическом нагружении

Напряжение, МПа	Деформация (натурный эксперимент), мм	Деформация (LS-DYNA, низший уровень), мм	Относительная погрешность деформации (НУ), %	Деформация (LS-DYNA, средний уровень), мм	Относительная погрешность деформации (СУ), %	Деформация (LS-DYNA, высший уровень), мм	Относительная погрешность деформации (ВУ), %
0,0025	3,095	6,352	52%	3,738	17%	2,397	23%
0,0050	9,052	14,497	38%	10,654	15%	7,654	16%
0,0075	14,972	21,976	32%	17,212	13%	13,177	12%
0,0100	18,224	27,476	34%	21,441	15%	17,382	5%
0,0125	23,559	31,823	26%	25,895	9%	21,825	8%
0,0150	27,081	35,991	25%	29,125	5%	25,571	6%
0,0175	32,407	40,0	19%	33,417	7%	28,891	11%
0,180	34,011	47,213	28%	37,792	10%	32,122	6%

0,190	34,016	47,214	27%	37,829	12%	32,435	5%
0,0200	35,250	47,220	27%	37,860	15%	32,567	8%
0,0225	35,252	47,225	28%	37,951	15%	34,221	3%

Можем наблюдать, что деформация при нагружении подголовника (рис. 17) изменяется в диапазоне от 0 до 40 мм. Это связано с тем, что набивка подголовника устанавливается на жесткий каркас, который ограничивает перемещение материала при нагружении.

Наименьшая погрешность результатов получена при нагружении КЭМ подголовника высшего уровня, состоящей из 112 877 КЭ. Это говорит о том, что применение данной КЭМ позволяет добиться наилучшей точности получаемых результатов.

По результатам проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. модель высшего уровня, состоящая из 112877 КЭ, обеспечивает наибольшую точность, равную в среднем 5-7 %;
2. для предварительных и многовариантных расчётов можно использовать модели среднего уровня (состоящая из 87876 КЭ, средняя погрешность 10-15% по сравнению с экспериментом). По значениям трудозатрат на ее создание и решение задачи и по погрешностям результатов такие модели можем считать рациональными;
3. свойства материалов подголовника следует моделировать в зависимости от скорости его нагружения.

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

1. 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.
2. The dynamic assessment of car seats for neck injury protection. Testing protocol. European new car assessment programme (Euro NCAP), 2009. 66 p.
3. ANSYS программа конечно-элементного анализа / Пер. и ред. Б.Г. Рубцова; оформл. Л.П. Остапенко. М.: CAD-FEM GmbH, 1998. 66 с.
4. LS-DYNA keyword user's manual. Livermore Software Technology Corporation, 1993-2003. 2206 p.

5. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике: пер. с англ. М.: Мир, 1975. 541 с.
6. Барлам Д.М. Решение контактной задачи теории упругости методом конечных элементов // Проблемы прочности. 1983. № 4. С. 39-43.
7. 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: <http://www.dynamore.de/en/downloads/papers/09-conference/papers/D-II-04.pdf> , accessed 30.05.2013.
8. Deter T., Maltszyk A., Kuehn M. Validation of a Seat-Dummy Simulation Model for Rear-Impact. German Insurance Association - Accident Research, 2006. 15 p.
9. Fat LS-DYNA BioRIDII model. Livermore Software Technology Corporation, 2009. 69 p.
10. Zou R., Grzebieta R. Rear seated occupant safety in frontal impacts. Department of Civil Engineering, Monash University, Australia, 2001. 10 p.
11. Nilakantan G. Design and Development of an Energy Absorbing Seat and Ballistic Fabric Material Model to Reduce Crew Injury caused by Acceleration from Mine/IED Blast. University of Cincinnati, 2006. 170 p.
12. Рябов Д.М., Смирнов А.А., Бутарович Д.О. Оценка влияния размещения нижних конечностей экипажа броневедомобиля на травмобезопасность при подрыве // Известия вузов. Машиностроение. 2012. № 3. С. 43-47.

Solving the problem of creation of finite element models for car seats with active head restraints designed to meet the requirements of passive safety

06, June 2013

DOI: 10.7463/0613.0574693

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 for studies of passive safety under impact loading, affected in accordance with the current standard of passive safety. Assessment of those models regarding errors, labor cost of development and solving with the use of software packages which implement the FEM (ANSYS, Femap and LS-DYNA) was carried out along with assessment of influence of head restraint's materials on the solution. Calculations based on the finite element method make it possible to obtain the whole information on the process of emergency loading required for estimating the safety of car seats in case of rear-end collisions.

Publications with keywords: [bending](#), [finite element method](#), [LS-DYNA](#), [passive safety](#), [head restraint](#), [car seat](#), [pendulum](#), [UNECE Regulations № 25](#), [foam materials](#)

Publications with words: [bending](#), [finite element method](#), [LS-DYNA](#), [passive safety](#), [head restraint](#), [car seat](#), [pendulum](#), [UNECE Regulations № 25](#), [foam materials](#)

References

1. 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.
2. *The dynamic assessment of car seats for neck injury protection. Testing protocol*. European New Car Assessment Programme (Euro NCAP), 2009. 66 p.

3. 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.
4. *LS-DYNA keyword user's manual*. Livermore Software Technology Corporation, 2003. 2206 p.
5. Zienkiewicz O.C. *The Finite Element Method in Engineering Science*. McGraw-Hill Publishing Co., London, 1971. 521 p. (Russ. ed.: Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike*. Moscow, Mir, 1975. 542 p.).
6. 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).
7. 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: <http://www.dynamore.de/en/downloads/papers/09-conference/papers/D-II-04.pdf> , accessed 30.05.2013.
8. Deter T., Maltszyk A., Kuehn M. *Validation of a Seat-Dummy Simulation Model for Rear-Impact*. German Insurance Association - Accident Research, 2006. 15 p.
9. *Fat LS-DYNA BioRIDII model*. Livermore Software Technology Corporation, 2009. 69 p.
10. Zou R., Grzebieta R. *Rear seated occupant safety in frontal impacts*. Department of Civil Engineering, Monash University, Australia, 2001. 10 p.
11. Nilakantan G. *Design and Development of an Energy Absorbing Seat and Ballistic Fabric Material Model to Reduce Crew Injury caused by Acceleration from Mine/IED Blast*. University of Cincinnati, 2006. 170 p.
12. Ryabov D.M., Smirnov A.A., Butarovich D.O. Otsenka vliyaniya razmeshcheniya nizhnikh konechnostey ekipazha broneavtomobilya na travmobeзопасnost' pri podryve [Assessment of effect of armoured vehicle crew lower extremities position on injury prevention during mine explosion]. *Izvestiya VUZov. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2012, no. 3, pp. 43-47.