Особенности построения конечно-элементных моделей кабин для исследования пассивной безопасности при ударе в соответствии с правилами ЕЭК ООН №29

03, март 2013

DOI: 10.7463/0313.0542301

Шабан Б. А., Зузов В. Н.

УДК 629.113

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

bshaban4@yahoo.com

zuzvalery@rambler.ru

Введение

В настоящее время проблема пассивной безопасности транспортных средств относится к наиболее сложным и трудоёмким задачам. Эти задачи все интенсивнее решают на стадии проектирования, на базе метода конечных элементов (МКЭ), стремясь повысить качество и эффективность проектирования. При этом приходится вносить многочисленные изменения в конструкцию и рассчитывать множество вариантов.

В свою очередь такие задачи являются супер-нелинейными, поэтому даже на современных компьютерах длятся часы. Отсюда актуальным является разработка рациональных конечно-элементных моделей (КЭМ) кабины грузовых автомобилей, обеспечивающих получение заданной точности результатов при минимальных затратах времени на подготовку и решение задачи МКЭ.

Целью данной статьи является разработка рациональных конечно-элементных моделей кабины грузовых автомобилей для исследований пассивной безопасности, их оценка с позиций погрешностей результатов и трудозатрат на разработку и решение, а также анализ влияния конструктивных факторов на результаты решения (двери, панели обшивки и др.).

Анализ результат расчётов МКЭ дают исчерпывающую информацию о процессе аварийного нагружения, необходимого для проведения оценки пассивной безопасности кабин грузовых автомобилей, а именно: о характере деформирования, о зонах пластических деформаций, о характере изменения скорости и перемещения ударного элемента и

изменения ударной нагрузки, необходимых для определения относительной поглощённой энергии конструкции и др. Для выполнения этой цели необходимо было решить ряд типовых примеров для кабин, результаты которых можно сопоставить как с известными решениями, так и с экспериментальными данными [1, 2]. При этом ставились задачи:

- получить и сравнить данные о точности разных по сложности КЭМ применительно к конструкциям типа кабин и оценить затраты времени на подготовку данных и расчёт;
- выбрать наилучший характер «разбиения» конструкции на конечные элементы (варьируя густотой конечно-элементной сетки), и определить наиболее предпочтительный размер и тип элемента;
- отработать подходы для решения нелинейных задач, которые будут использованы в дальнейшем на базовых моделях кабин применительно к проблеме пассивной безопасности.

Методики экспериментального определения характеристик пассивной безопасности кабин грузовых автомобилей

Методики испытаний на пассивную безопасность конструкции призваны моделировать сценарии реальных аварийных ситуаций. Применительно к грузовым автомобилям такими ситуациями являются лобовой удар, удар по кабине сзади сорвавшимся при торможении грузом и опрокидывание автомобиля. Согласно требованиям ГОСТа Р 41.29-99 (идентичным правилу ЕЭК ООН № 29 "Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении защиты лиц, находящихся в кабине грузового транспортного средства"), эти ситуации сведены к трём видам испытаний, проиллюстрированных на рис. 1а.

Рис. 1. Виды испытаний кабины по ГОСТу Р 41.29-99 (а) и по VVFS 2003:29 (б) («Шведские нормы»)

При испытании «А» по кабине, установленной на транспортном средстве, производится фронтальный удар маятником с заданными размерами и кинетической энергией. При испытании «В» через жёсткую плиту к конструкции статически прикладывается вертикальная нагрузка заданной величины. При испытании «С» задняя стенка кабины через жёсткую плиту нагружается горизонтальной силой. После проведения каждого вида испытаний в кабине должно оставаться остаточное пространство, в котором на сиденье, установленном в среднем положении, может поместиться, не приходя в соприкосновение с жёстко закреплёнными частями, антропометрический манекен. В деталях крепления кабины к раме могут наблюдаться деформации и изломы, однако кабина должна оставаться прикреплённой к раме.

Характеристики пассивной безопасности кабины в соответствии со шведскими нормами VVFS 2003:29 проверяются проведением следующих испытаний (рис. 1б):

- испытание А. Статической нагрузки на крышу кабины;
- испытание В. Удара цилиндрическим маятником спереди по переднему верхнему углу кабины;
- испытание С. Удара прямоугольным маятником по задней стенке кабины под прямым углом.

Кабина считается выдержавшей все виды испытаний при следующих условиях:

- в несущей конструкции кабины или деталях, а также узлах крепления не произошло разрушений, и не образовались значительные трещины или деформации;
- в кабине остаётся жизненное пространство для водителя и пассажиров.
- при динамическом нагружении (ударе) вся энергия удара расходуется (поглощается) кабиной, при этом не происходит проскальзывания маятника по крыше.

В настоящее время в рамках Женевского соглашения идёт разработка новой серии поправок к международному Европейскому стандарту правил № 29 ЕЭК ООН, который регламентирует процедуру испытаний и технические требования, предъявляемые к кабинам грузовиков в отношении их ударно-прочностных свойств для обеспечения безопасности водителя и пассажиров в условиях столкновения и опрокидывания [3, 4, 5] и есть добавление 28 к Правилам № 29 [6].

Моделирование испытания В. Удара цилиндрическим маятником спереди по переднему верхнему углу кабины по требованиям VVFS 2003 №29

В качестве первого объекта была выбрана кабина грузового автомобиля Scania, имеющая достаточно типичную и распространённую компоновку и конструкцию, для которой также имеются результаты экспериментальных исследований [7,8].

Моделируется процесс удара маятником по стойкам в передней части кабины по методике VVFS 2003 № 29 (испытание «В») методом конечных элементов в программном комплексе LS-DYNA (рис. 2). Этот режим был выбран в качестве базового, поскольку он относится к числу наиболее тяжелых (по последствиям удара) [3].

Рис. 2. Схема нагружения кабины при испытаниях по правилам Швеции VVFS 2003 ударом маятника в угол крыши (а) и экспериментальные результаты (б)

В процессе моделирования динамического удара цилиндрическому маятнику задавалась начальная скорость $V=7,668$ [м/с], соответствующая необходимой кинетической энергии в момент удара, равной 29,4 [кДж]. Для оценки степени восприятия нагрузок каркасом и панелями были созданы КЭМ кабины грузового автомобиля (включающие двери, пол, панель обшивки и каркас) разной степени сложности (рис. 3). Материал кабины — упруго-пластичный, $\sigma_T=250$ МПа.

Поскольку такие задачи являются чрезвычайно трудоемкими и длительными, то важной является проблема выбора рациональных КЭМ, которые позволяют получить результаты с требуемой точностью при минимальных затратах труда и времени на подготовку и решение. Для этого предлагается использовать оболочечные КЭМ разного уровня сложности (рис. 3). КЭМ кабины низшего уровня (число узлов 31335, число конечных элементов 29316, размеры элементов 15-72 [мм]) обеспечивают получение результатов с погрешностями 33 % для перемещений (см. рис. 3, а); КЭМ кабины среднего уровня (число узлов 63705, число элементов 57238, размеры элементов 8-36 [мм]) - получение результатов с погрешностями 19 % для перемещений (см. рис. 3, б); КЭМ кабины высшего уровня (число узлов 194829, число элементов 171461, размеры элементов 4-18 [мм]) - получение результатов с погрешностями 5 % для перемещений, что соизмеримо с погрешностями экспериментальных исследований (см. рис. 3, в). Продолжительность решений (используется компьютер с 5-ти ядерным процессором) – 6, 7 и 13 часов соответственно. При составлении КЭМ кабины высшего уровня требуются наибольшие трудозатраты, поэтому такие модели обычно используют только на завершающей стадии исследований для уточнения распределения напряжений.

Рис. 3. Оболочечные КЭМ кабины:
а - низший уровень; б - средний уровень; в - высший уровень

На рис. 4 показан график изменения перемещения маятника по времени для разных КЭМ. Сравнение этих перемещений с экспериментом позволяет оценить погрешность моделирования для перемещений, которая уменьшается при улучшении свойств КЭМ.

Погрешности решений и основные характеристики сетки КЭМ представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Расчётно-экспериментальные значения перемещения маятника

	высший уровень	средний уровень	низший уровень
Эксперимент, мм	194,4	194,4	194,4
Расчёт, мм	185,82	158,20	130,25
Погрешность, %	4,41	18,62	33

Анализ деформированного состояния КЭМ кабины позволяет оценить общую жёсткость кабины и исследовать деформации в её отдельных элементах, выявить зоны пониженной жёсткости корпуса кабины, а также определить характер и численные значения деформаций дверных и оконных проёмов (см. рис. 5).

Рис. 5. Картины деформированных состояний КЭМ кабины:
а - низший уровень; б - средний уровень; в - высший уровень

Рис. 6. Картины напряженных состояний КЭМ кабины:
а - низший уровень; б - средний уровень; в - высший уровень

На рис. 6 показаны картины напряженных состояний для КЭМ кабины разных сложностей. Результаты расчётов для моделей кабины разных уровней при ударе (правила Швеции VVFS 2003 №29) показаны на рис. 7-10.

Рис. 7. График изменения кинетической энергии по времени:

— КЭМ высшего уровня — КЭМ среднего уровня
 — КЭМ низшего уровня

Рис. 8. График изменения поглощенной энергии по времени :

— КЭМ высшего уровня — КЭМ среднего уровня
 — КЭМ низшего уровня

Рис. 9. График изменения относительной поглощенной энергии по времени:

— КЭМ высшего уровня — КЭМ среднего уровня
 — КЭМ низшего уровня

Рис. 10. График изменения ударной силы P_p в зависимости от перемещения S :

— КЭМ высшего уровня — КЭМ среднего уровня
 — КЭМ низшего уровня

Большое значение для проектирования имеет знания какую долю энергии удара поглощают каркас и панель обшивки. Анализ результатов расчёта на базе КЭМ высшего уровня (имеющей минимальные погрешности) позволил выявить что

- панель обшивки поглощает 59,18% энергии удара;
- каркас поглощает 29,52% энергии удара (см. рис. 11).

Остальная доля приходится на другие элементы кабины.

Моделирование испытания А. Удара цилиндрическим маятником спереди кабины по требованиям ЕЭК ООН № 29

В качестве другого объекта исследований была выбрана кабина грузового автомобиля КАМАЗ, который является массовым в России и имеет достаточно типичную и распространённую компоновку и конструкцию в том числе кабины, для которой также имеются результаты экспериментальных исследований (рис. 12).

**Рис. 12. Кабина КАМАЗ бескапотной компоновки двух типов:
а - кабина со спальным местом; б- кабина без спального места**

Рис. 13. Схема нагружения кабины при испытаниях удар спереди (испытание А) по правилам ГОСТ Р 41.29-99 (Правила ЕЭК ООН N 29)

Моделируется процесс удара маятником в передней части кабины по методике (правилам) ГОСТ Р 41.29-99 (Правила ЕЭК ООН N 29) методом конечных элементов в программном комплексе LS-DYNA . В процессе моделирования динамического удара маятнику задавалась начальная скорость $V=7,28$ м/с, соответствующая необходимой кинетической энергии в момент удара, равной 45 [кДж] (рис. 13). Для оценки погрешностей моделирования были созданы оболочечные КЭМ кабины разного уровня.

Рис. 14. Оболочечная КЭМ кабины со спальным местом

На рис. 14 показана оболочечная КЭМ кабины со спальным местом (число узлов 314525, число элементов 315184, размер элементов 11 мм). Результаты расчётов модели кабины при ударе (Правила ЕЭК ООН N 29) показаны на рис. 15-22. Продолжительность решений (5-ти ядерный процессор) – 124:45:40 часов соответственно.

При моделировании фронтального удара (испытания «А») проводилась верификация модели и методики моделирования на основе результатов натурного эксперимента [5].

Рис. 15. Картина деформированного состояния КЭМ кабины

Рис. 16. Картина напряженного состояния КЭМ кабины

На рис. 15, 16 показаны картины деформированных и напряженных состояний КЭМ кабины.

Таблица 2.

№	время удар [мс]	кинетическая энергия Ек [кДж]	Перемещение маятника S [мм]	поглощенная энергия Еп [кДж]	относительная поглощенная энергия [кДж/м]	ускорение [мм/мс ²]	Ударная сила [кН]	перемещение контрольной точки кабины [мм]
1	0,00	45,04	0,00			0,14	242,83	0,00
2	5,17	40,42	35,76	4,62	129,18	0,15	261,22	0,00
3	10,33	32,45	67,46	12,59	186,62	0,13	215,39	11,70
4	15,50	30,98	95,80	14,06	146,74	0,11	195,19	27,77
5	20,67	29,38	121,08	15,66	129,35	0,09	147,88	49,27
6	25,83	26,13	144,50	18,90	130,82	0,02	30,81	81,34
7	31,00	22,52	168,34	22,52	133,75	0,05	87,07	112,16
8	36,17	21,84	192,15	23,20	120,76	0,04	72,23	138,81
9	41,34	21,80	216,18	23,24	107,50	0,06	105,81	160,50
10	46,50	20,31	240,63	24,73	102,78	0,08	140,52	182,92
11	51,67	17,96	263,62	27,08	102,71	0,09	148,02	202,99
12	56,84	15,01	284,31	30,03	105,63	0,12	211,49	221,02
13	62,00	14,60	302,46	30,44	100,64	0,10	168,41	241,22
14	67,17	14,68	318,24	30,36	95,40	0,06	97,98	258,77
15	72,34	11,48	333,71	33,56	100,55	0,10	170,58	276,29
16	77,50	10,17	350,05	34,87	99,61	0,02	38,78	293,80
17	82,67	11,00	366,91	34,04	92,78	0,10	174,56	311,26
18	87,84	10,90	384,11	34,14	88,87	0,08	128,93	324,48
19	93,01	8,69	400,24	36,35	90,83	0,12	204,63	331,81
20	98,17	6,95	413,85	38,08	92,02	0,14	232,21	338,94
21	103,34	6,91	425,65	38,13	89,58	0,07	126,28	343,67
22	108,51	6,33	435,54	38,71	88,87	0,14	245,30	349,70
23	113,67	4,90	443,47	40,14	90,50	0,06	101,45	360,93
24	118,84	3,52	451,46	41,52	91,97	0,09	154,14	373,76
25	124,01	3,22	460,11	41,81	90,88	0,11	195,28	384,69
26	129,17	4,04	468,79	41,00	87,46	0,02	36,16	391,12
27	134,34	3,23	477,42	41,81	87,58	0,13	224,98	393,61
28	139,51	1,83	484,63	43,21	89,16	0,14	241,34	395,17
29	144,68	1,53	489,18	43,51	88,95	0,10	176,24	397,35
30	149,84	1,98	491,69	43,06	87,58	0,07	118,12	400,10
31	155,00	1,95	492,98	43,09	87,40	0,17	295,95	406,42

Рис. 17. График изменения перемещения контрольной точки кабины по времени :

—■— эксперимент —+— расчёт

Погрешность решения =5,43%.

Рис. 18. График изменения кинетической энергии по времени

Рис. 19. График изменения перемещения маятника по времени

Рис. 20. График изменения поглощенной энергии по времени

Рис. 21. График изменения относительной поглощенной энергии по времени

Рис. 22. График изменения ударной силы P_p в зависимости от перемещения S

Для оценки влияния сетки и количества конечных элементов на погрешность решение моделируется процесс удара маятником в передней части кабины КАМАЗ без спального места по методике (правилам) ГОСТ Р 41.29-99 (Правила ЕЭК ООН N 29) в программном комплексе LS-DYNA.

Оболочечные КЭМ среднего и высшего уровня кабины показаны на рис. 23: а - средний уровень (число узлов 102087, число элементов 102455, размеры элементов 8-20 [мм]); б - высший уровень (число узлов 316409, число элементов 316750, размеры элементов 4-11[мм]). Продолжительность решений (5-ти ядерный процессор) – 44 и 105 часов соответственно.

Рис. 23. Оболочечные КЭМ кабины: а - средний уровень; б - высший уровень

Рис. 24. Картины деформированных состояний КЭМ кабины: а - средний уровень; б - высший уровень

Рис. 25. Картины напряженных состояний КЭМ кабины: а - средний уровень; б - высший уровень

Рис. 27. График изменения кинетической энергии по времени:

— КЭМ среднего уровня — КЭМ высшего уровня

Рис. 28. График изменения поглощенной энергии по времени :

— КЭМ среднего уровня — КЭМ высшего уровня

Рис. 29. График изменения относительной поглощенной энергии по времени:

— КЭМ среднего уровня — КЭМ высшего уровня

Рис. 30. График изменения ударной силы P_p в зависимости от перемещения S

— КЭМ среднего уровня — КЭМ высшего уровня

Для оценки влияния дверей кабины моделируется процесс удара маятником в передней части кабины КАМАЗ без спального места по методике (правилам) ГОСТ Р 41.29-99 (Правила ЕЭК ООН №29) в программном комплексе LS-DYNA для оболочечных КЭМ среднего уровня кабины с дверями и без дверей (рис. 31).

Рис. 31. Оболочечные КЭМ кабины: а – с дверями; б – без дверей

Рис. 32. Картины деформированных состояний КЭМ кабины: а – с дверями; б – без дверей

Рис. 33. Картины напряженных состояний КЭМ кабины: а – с дверями; б – без дверей

Рис. 35. График изменения кинетической энергии по времени:

— кабина с дверями — кабина без дверей

Рис. 36. График изменения поглощенной энергии по времени :

— кабина с дверями — кабина без дверей

Рис. 37. График изменения относительной поглощенной энергии по времени:

—■— кабина с дверями —■— кабина без дверей

Рис. 38. График изменения ударной силы P_p в зависимости от перемещения S :

—■— кабина с дверями —■— кабина без дверей

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основе проведённых исследований можно сделать следующие выводы.

1. Для анализа поведения конструкции кабины при ударе маятником передней части необходимо использовать оболочечные конечно-элементных моделей кабины высшего уровня (погрешность 5.4 % по сравнению с экспериментом), для предварительных и многовариантных расчётов - модели среднего уровня (погрешность 15 % по сравнению с экспериментом).
2. Расчёты на базе МКЭ дают возможность получения всего массива информации о процессе аварийного нагружения, необходимого для проведения расчётной оценки пассивной безопасности кабин грузовых автомобилей, а именно- характера деформирования, зоны пластических деформаций, характер изменения скорости и перемещения ударного элемента и изменения ударной нагрузки, необходимые для определения относительной поглощённой энергии конструкции и др.
3. Двери, панель обшивки кабины грузового автомобиля способствуют повышению её пассивной безопасности (применительно к рассмотренным кабинам улучшение параметров за счёт: дверей – до 10%; панелей обшивки – до 60 %).

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. Шабан Б.А., Зузов В.Н. Особенности моделирования каркасных элементов кузовов и кабин автомобилей при исследовании пассивной безопасности // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 11. DOI: 10.7463/1112.0486675
2. Зузов В.Н., Маркин И.В. Проблемы исследования пассивной безопасности кабин на стадии проектирования // Безопасность конструкции автотранспортных средств: сб. докл. XXX межд. науч. техн. конф. Дмитров, 2000.

3. Маркин И.В. Разработка методики оценки пассивной безопасности грузовых автомобилей и тракторов в отношении ударно-прочностных свойств их кабин на стадии проектирования : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2001. 16 с.
4. ГОСТ Р 41.29-99 (Правила ЕЭК ООН № 29). Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении защиты лиц, находящихся в кабине грузового транспортного средства. Введ. 2000-07-01. М.: Изд-во стандартов, 2000. 20 с.
5. Черников С.К., Ахмадышин А.Н. Численные исследования процессов деформирования конструкций грузовых автомобилей в течение дорожно-транспортных происшествий // Казанский физико-технический институт имени Е.К. Завойского. 2010. Ежегодник. Казань: Физтех Пресс, 2011. С. 168-172.
6. Правила ЕЭК ООН № 29 (документ E/ECE/324/Rev.1/Add.28/Rev.2 – E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.28/Rev.2). Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении защиты лиц, находящихся в кабине грузового транспортного средства. ООН, 2012. 26 р.
7. Ulug C.D. Effect of strain history on simulation of crashworthiness of vehicles. Master Thesis. Department of Mechanical Engineering, July 2009. 71 p.
8. Öman M., Nilsson L. Structural optimization of product families subjected to multiple crash load cases // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2010. Vol. 41, no. 5. P. 797-815. DOI: 10.1007/s00158-009-0471-4

Features of building finite element models of cabins for passive safety studies under the impact according to UNECE Regulations № 29

03, March 2013

DOI: [10.7463/0313.0542301](https://doi.org/10.7463/0313.0542301)

Shaban B.A., Zuzov V.N.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

bshaban4@yahoo.com

zuzvalery@rambler.ru

The authors developed rational finite element models of truck cabs for studies of passive safety under impact loading executed in accordance with the current standard of passive safety. The obtained results were estimated with consideration of errors and efforts; the problem was solved by means of FEM software (ANSYS and LS-DYNA). The influence of structural factors on the solution (doors, panels, trims, etc.) was also investigated. Calculations based on the finite element method provide one with complete information on the process of emergency loading required for estimating passive safety of truck cabs.

Publications with keywords: [A-pillar](#), [bending](#), [bending](#), [finite element method](#), [LS-DYNA](#), [passive safety](#), [cabin truck](#), [plastic deformation](#)

Publications with words: [A-pillar](#), [bending](#), [bending](#), [finite element method](#), [LS-DYNA](#), [passive safety](#), [cabin truck](#), [plastic deformation](#)

References

1. Shaban B.A., Zuzov V.N. Osobennosti modelirovaniya karkasnyh jelementov kuzovov i kabin avtomobilej pri issledovanii passivnoj bezopasnosti [Features of wireframe modeling bodies and cabs of cars while investigating passive safety]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2012, no. 11. DOI: [10.7463/1112.0486675](https://doi.org/10.7463/1112.0486675)
2. Zuzov V.N., Markin I.V. Problemy issledovaniya passivnoj bezopasnosti kabin na stadii proektirovaniya [Problems of investigation of passive safety of cabs at the design phase]. *Bezopasnost' konstrukcii avtotransportnyh sredstv: sb. dokl. 30-j mezhd. nauch. tehn. konf.* [Safety of construction of vehicles: proc. of the 30th international scientific technical conference]. Dmitrov, 2000.
3. Markin I.V. *Razrabotka metodiki ocenki passivnoj bezopasnosti gruzovyh avtomobilej i traktorov v otnoshenii udarno-prochnostnyh svojstv ih kabin na stadii proektirovaniya.*

Avtoreferat kand. diss. [Development of methodology for assessment of passive safety of trucks and tractors with regard to the impact-strength properties of their cabs at the design phase. Abstract of cand. diss.]. Moscow, 2001. 16 p.

4. *GOST R 41.29-99 (Pravila EJeK OON № 29). Edinoobraznye predpisanija, kasajushhiesja oficial'nogo utverzhdenija transportnyh sredstv v otnoshenii zashhity lic, nahodjashhihsja v kabine gruzovogo transportnogo sredstva* [State Standard of RF 41.29-99 (UNECE Regulation no. 29). Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants of the cab of a commercial vehicle]. Moscow, Standards Publishing House, 2000. 20 p.

5. Chernikov S.K., Ahmadyshin A.N. Chislennye issledovaniya processov deformirovaniya konstrukcij gruzovyh avtomobilej v techenie dorozhno-transportnyh proisshestvij [Numerical investigations of processes of deformation of constructions of trucks during road accidents]. *Kazanskij fiziko-tehnicheskij institut imeni E. K. Zavojskogo. 2010. Ezhegodnik* [Kazan Zavoisky Physical-Technical Institute. 2010. Yearbook.]. Kazan, Fizteh Press, 2011, pp. 169-172.

6. *Pravila EJeK OON № 29 (dokument E/ECE/324/Rev.1/Add.28/Rev.2 – E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.28/Rev.2). Edinoobraznye predpisanija, kasajushhiesja oficial'nogo utverzhdenija transportnyh sredstv v otnoshenii zashhity lic, nahodjashhihsja v kabine gruzovogo transportnogo sredstva* [UNECE Regulation no. 29 (document E/ECE/324/Rev.1/Add.28/Rev.2 – E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.28/Rev.2). Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants of the cab of a commercial vehicle]. United Nations, 2012. 26 p.

7. Ulug C.D. *Effect of strain history on simulation of crashworthiness of vehicles. Master Thesis.* Department of Mechanical Engineering, 2009. 71 p.

8. Öman M., Nilsson L. Structural optimization of product families subjected to multiple crash load cases. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2010, vol. 41, no. 5, pp. 797-815. DOI: 10.1007/s00158-009-0471-4