

## НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.113

Л.А. Орлов<sup>1</sup>, Л.Н Орлов<sup>2</sup>, А.В. Тумасов<sup>2</sup>

### РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ПЕШЕХОДА В СЛУЧАЕ НАЕЗДА ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ

Тольяттинский государственный университет<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева<sup>2</sup>

Представлены результаты совместной поисковой научно-исследовательской работы, выполненной специалистами НГТУ и ТГУ, направленной на исследование процесса столкновения легкового автомобиля с пешеходом методами компьютерного моделирования аварийных ситуаций. Дано описание подробной конечно-элементной модели ударника головы, приведены результаты тестовых расчетов.

*Ключевые слова:* пешеход, ударник, пассивная безопасность, капот, критерий травмируемости головы.

По данным международной статистики [1], более 1000000 человек в год гибнет в дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) по всему миру и около 700 детей попадают в ДТП каждый день. В России вопросам повышения безопасности дорожного движения уделяется особое внимание, поскольку количество погибших в различных ДТП в нашей стране в среднем в три-пять раз больше, чем в европейских странах. Одна из главных проблем в России – высокий процент ДТП с участием пешеходов, поэтому проблема повышения безопасности наименее защищенных участников дорожного движения является весьма актуальной.

Вопросы исследования характера столкновения автомобиля с пешеходом отражены в публикациях зарубежных и отечественных исследователей. Так, в исследовании специалистов Шведского технологического университета [2] показано, что наиболее часто подвергаются повреждениям голова и нижние конечности пешеходов. В табл. 1 представлены среднестатистические данные по повреждениям отдельных участков тела пешехода, полученные в результате обработки 293 случаев ДТП.

Таблица 1

#### Повреждения отдельных участков тела пешехода в условиях фронтального столкновения с легковым автомобилем

Участок тела	Распределение повреждений в момент столкновения, %	Распределение повреждений при повторном соударении (после отскока от автомобиля), %
Голова	42,8	35,6
Шея	0,8	0,4
Грудная клетка	22,2	15,7
Руки	33,8	37,7
Живот	6,9	5,5
Таз	14,1	10,6
Ноги	66,1	43,7

В докладе рабочей группы ЕЭК ООН по пассивной безопасности [3] приведена следующая информация по ДТП с участием пешеходов:

- наибольшая частотность дорожно-транспортных происшествий приходится на детей в возрасте от 5 до 9 лет, при этом на детей до 15 лет включительно, (составляющих всего 18% населения) – около одной трети всех травм;
- наибольшая частотность смертельных и серьезных травм приходится на голову среди детей и взрослых и на ноги среди взрослых людей;
- травмы каждой из этих частей тела составляют более 30% всех ДТП;
- основным источником травм головы у детей является поверхность капота/крыла, а у взрослых травмы головы обусловлены ударом о поверхность капота/крыла и зону ветрового стекла;
- ДТП со скоростью столкновения до 40 км/ч охватывает более 75% всех случаев травмирования пешеходов.

Таким образом, если рассматривать скорость удара до 40 км/ч, то можно значительно уменьшить степень травмирования пешеходов в случае фронтального столкновения механических транспортных средств с ними.

В отчете специалистов Европейского комитета обеспечения пассивной безопасности (APSN) [4], указывается на то, что для повышения пассивной безопасности пешеходов необходимо прежде всего добиться минимального уровня травмируемости головы.

Принятые в 2008 году Глобальные технические Правила № 9 [5], равно как и фаза 2 Директивы 2003/102/ЕС [6], предполагают проведение пяти видов испытаний передних конструкций легковых автомобилей на безопасность, касающихся столкновения с пешеходом. Условия проведения испытаний основаны на результатах статистических исследований. Наиболее жёсткие требования предъявляются к безопасности элементов конструкции автомобиля, о которые происходит удар пешехода головой. Оцениваемым параметром при этом является критерий травмируемости головы КТГ (*НИС*):

$$NIS = \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right]_{t_2 - t_1} \quad (1)$$

где  $a$  – результирующее ускорение;  $t_2 - t_1$  – временной интервал, при котором значение *НИС* является максимальным (временной интервал не должен превышать 15 мс).

Считается, что значения КТГ ниже уровня 1250 неопасны; от 1250 до 1500 – вызывают повреждения средней тяжести; выше уровня 1500 – вызывают тяжёлые и смертельные травмы.

На этапах проектирования и доводки наиболее рациональным является исследование процесса столкновения автомобиля с пешеходом на основе результатов компьютерного моделирования аварийных ситуаций, которое позволяет симитировать полный спектр необходимых испытаний и оценить уровень пассивной безопасности конструкции автомобиля с точки зрения пешехода. При этом широкое распространение получили расчетные исследования, моделирующие условия взаимодействия ударников (имитаторов отделенных частей теле человека) с элементами конструкции автомобиля. Виртуальные модели ударников так же, как и реальные конструкции, должны соответствовать технико-эксплуатационным требованиям, описанным в Директиве 2004/90/ЕС [7]. Например, ударник головы при проверке его адекватности подвешивается задней лицевой поверхностью под углами 25° и 90° к горизонтали (рис. 1), после чего по нему наносится удар сертифицированным импактором, имеющим массу 1 кг. Импактор должен быть позиционирован таким образом, чтобы центр тяжести ударника головы располагался на центральной линии импактора. В табл. 2 приведены требования к срабатыванию акселерометра ударника головы при соударении с импактором.

Несмотря на достигнутые результаты в области исследования процесса столкновения автомобиля с пешеходом, многие проблемы остаются нерешенными. В частности, недоста-

точно полно изучены вопросы, связанные с выбором геометрических, жесткостных и демпфирующих свойств элементов передней части автомобиля. Для решения данной проблемы необходимо иметь адекватные расчетные модели ударников, использование которых в процессе компьютерного моделирования аварийных ситуаций позволит сократить материальные и временные затраты на разработку безопасных конструкций автомобилей.

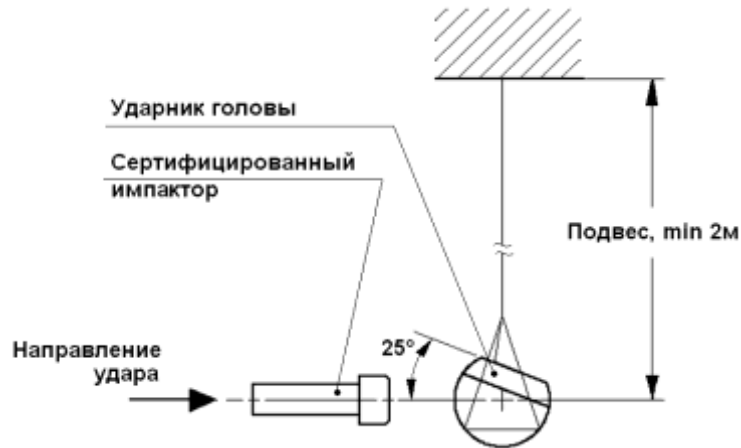


Рис. 1. Схема проверки ударника головы на соответствие требованиям Д 2004/90/ЕС

Таблица 2

Требования к срабатыванию акселерометра ударника головы

Тип ударника	Масса, кг	Скорость при сертификации, м/с	Нижняя граница, g	Верхняя граница, g
Голова ребенка	2,5	7	405	495
Голова ребенка/небольшого взрослого	3,5	7	290	350
Голова взрослого	4,8	10	337,5	412,5

Для выполнения расчетных исследований специалистами НГТУ и ТГУ была разработана подробная конечно-элементная модель (КЭМ) ударника головы ребенка (рис. 2), позволяющая проводить широкий спектр виртуальных испытаний и оценивать безопасность передней части конструкции легкового автомобиля в условиях соударения головы ребенка с поверхностью капота.

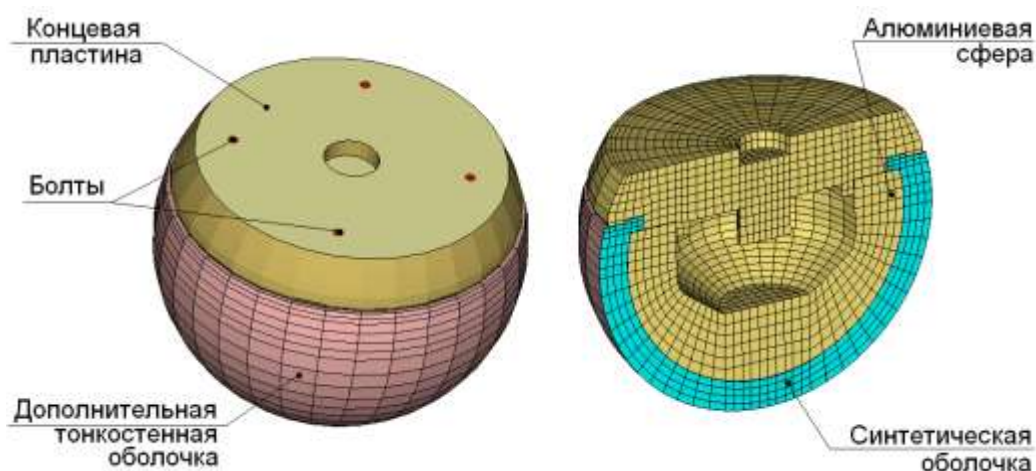


Рис. 2. Подробная КЭМ ударника

Модель ударника состоит из 13094 узлов и 11624 элементов и включает в себя части алюминиевых деталей (концевая пластина и сфера) и синтетической оболочки, представленных объемными 8-узловыми элементами типа *SOLID*. Соединительные болты имитированы стержневыми элементами типа *BEAM*. Между оболочкой и алюминиевыми деталями были заданы условия контактного взаимодействия, допускающие смещение узлов оболочки относительно элементов алюминиевых деталей.

Следует отметить, что в КЭМ ударника была введена дополнительная тонкостенная оболочка, представленная элементами типа *SHELL*. Данная оболочка выполняет *техническую* функцию и служит для более простого задания контактного взаимодействия между ударником головы и панелями конструкции автомобиля, которые, как правило, также представляются в виде элементов типа *SHELL*. Использование дополнительной оболочки обеспечивает возможность работы с различными типами контактов, характерных для поверхностных моделей. Оболочка также необходима для подавления (исключения) в ходе расчета вероятности возникновения элементов с «отрицательным объемом», поскольку материал синтетической оболочки имеет относительно низкий модуль упругости и при нагружении оболочки ее элементы могут инвертироваться, порождая отрицательные объемы, что, в свою очередь, может привести к ошибочному прекращению счета.

В связи с этим рекомендуется использовать опцию создания дополнительных контактных взаимодействий между внутренними гранями объемных элементов, а также наносить на наружную поверхность компоненты сетку оболочечных элементов.

Для задания синтетической оболочки ударника был использован вязкоупругий материал, характеристики которого (плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона, кривая напряжение-деформации) были подобраны таким образом, чтобы суммарная масса всех компонент ударника составляла 3,5 кг, а ускорения ударника при тестовом нагружении в соответствии со схемой (рис. 1) находились в диапазоне 290...350 g.

На рис. 3 показан характер распределения относительных деформаций по элементам оболочки ударника при моделировании условий тестового нагружения.

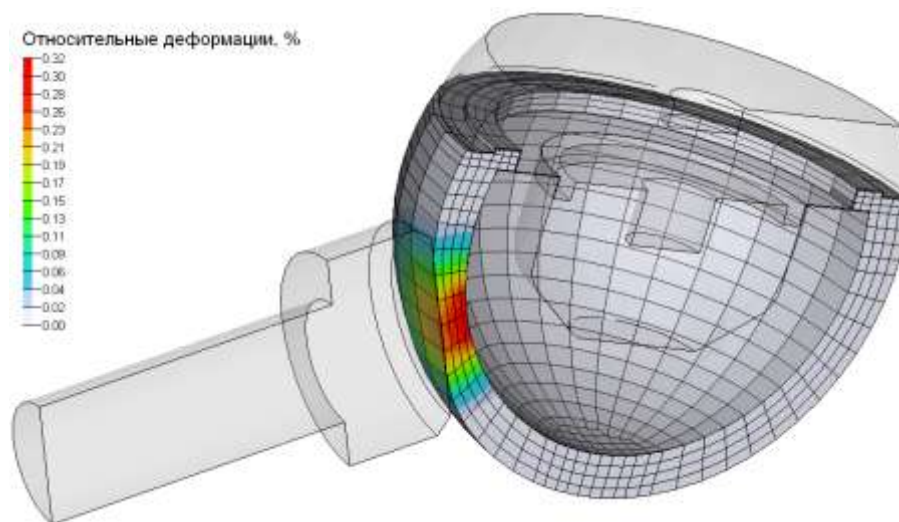


Рис. 3. Характер распределения относительных деформаций в оболочке ударника ( $t = 2,5$  мс)

На рис. 4 представлен график изменения суммарного ускорения ударника. Видно, что максимальное значение ускорения составляет  $3,0 \cdot 10^3$  м/с<sup>2</sup> (305 g), что соответствует допустимому диапазону 290...350 g для данного типа ударников.

Таким образом, разработанная подробная КЭМ ударника головы ребенка соответствует требованиям Директивы 2004/90/ЕС и может быть использована при проведении расчетных исследований пассивной безопасности конструкций легковых автомобилей.

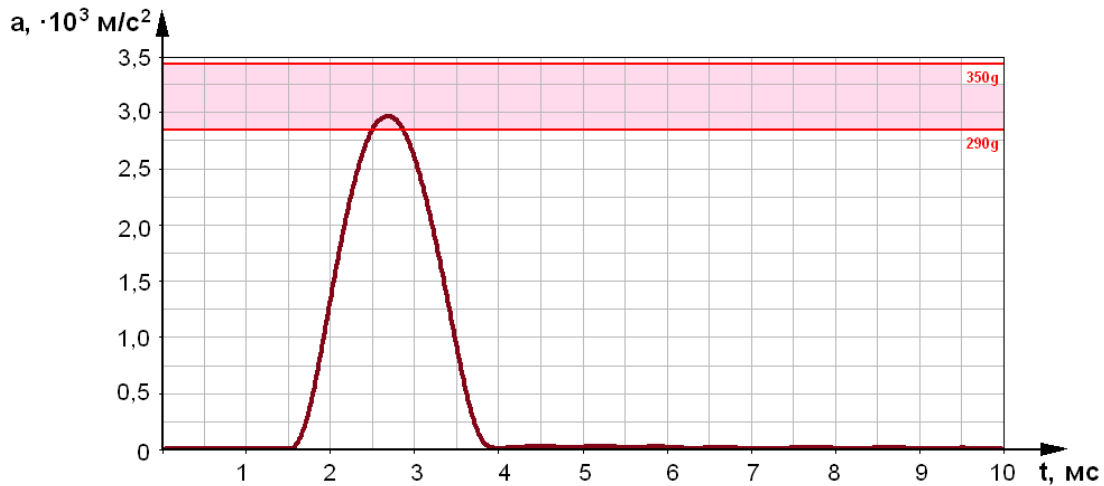


Рис. 4. График изменения ускорений центра масс КЭМ ударника головы пешехода

С целью проверки работоспособности модели ударника были выполнены исследования по оценке пассивной безопасности капота легкового автомобиля. В расчетах рассматривалась только передняя часть автомобиля (задние силовые элементы автомобиля и двери были исключены). Оси колес автомобиля, а также крайние элементы модели (на линиях обрыва) закреплялись по трем степеням свободы (рис. 5, а). При этом в подкапотном пространстве двигатель и радиатор были представлены жесткими телами, а передняя подвеска моделировалась с помощью одномерных элементов с вязкоупругими свойствами. В исследуемой модели автомобиля отсутствовали многие элементы подкапотного пространства, которые на практике могли бы ограничить деформацию капота в условиях ударного воздействия со стороны импактора. На рис. 5, б показаны исследуемые случаи нагружения.

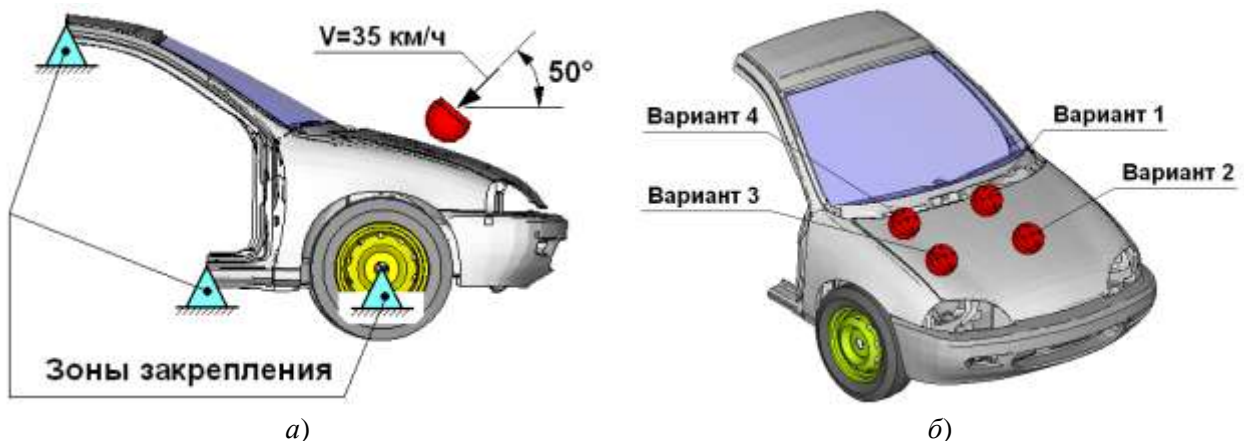


Рис. 5. Схемы закрепления и нагружения передней части легкового автомобиля:  
а – схема закрепления и нагружения; б – варианты нагружения автомобиля

На рис. 6 представлены наибольшие деформации передней части автомобиля в условиях различных вариантов нагружения. Видно, что деформации достигают 60...80мм. Как отмечают специалисты АвтоВАЗа [8], для получения величины *NIC* менее 1000 единиц необходимо обеспечить не менее 62 мм свободной деформации капота, в этом случае деформации капота позволяют добиваться хорошего поглощения удара.

На рис. 7 показаны графики вертикальных перемещений ударников за время соударения, характеризующих деформируемость отдельных зон капота автомобиля. Видно, что наибольшие перемещения капота наблюдаются в первом варианте нагружения. Во втором варианте нагружения вертикальные перемещения ударника были ограничены поперечно

расположенным двигателем и присоединенным к нему радиатором. Меньшие перемещения ударника наблюдались в последних двух вариантах, что обусловлено более высокой жесткостью боковых частей (крыльев) кузова автомобиля. Тем не менее, следует признать полученные перемещения несколько завышенными, поскольку в реальной конструкции они могут быть ограничены не учтенными в модели конструктивными элементами подкапотного пространства.

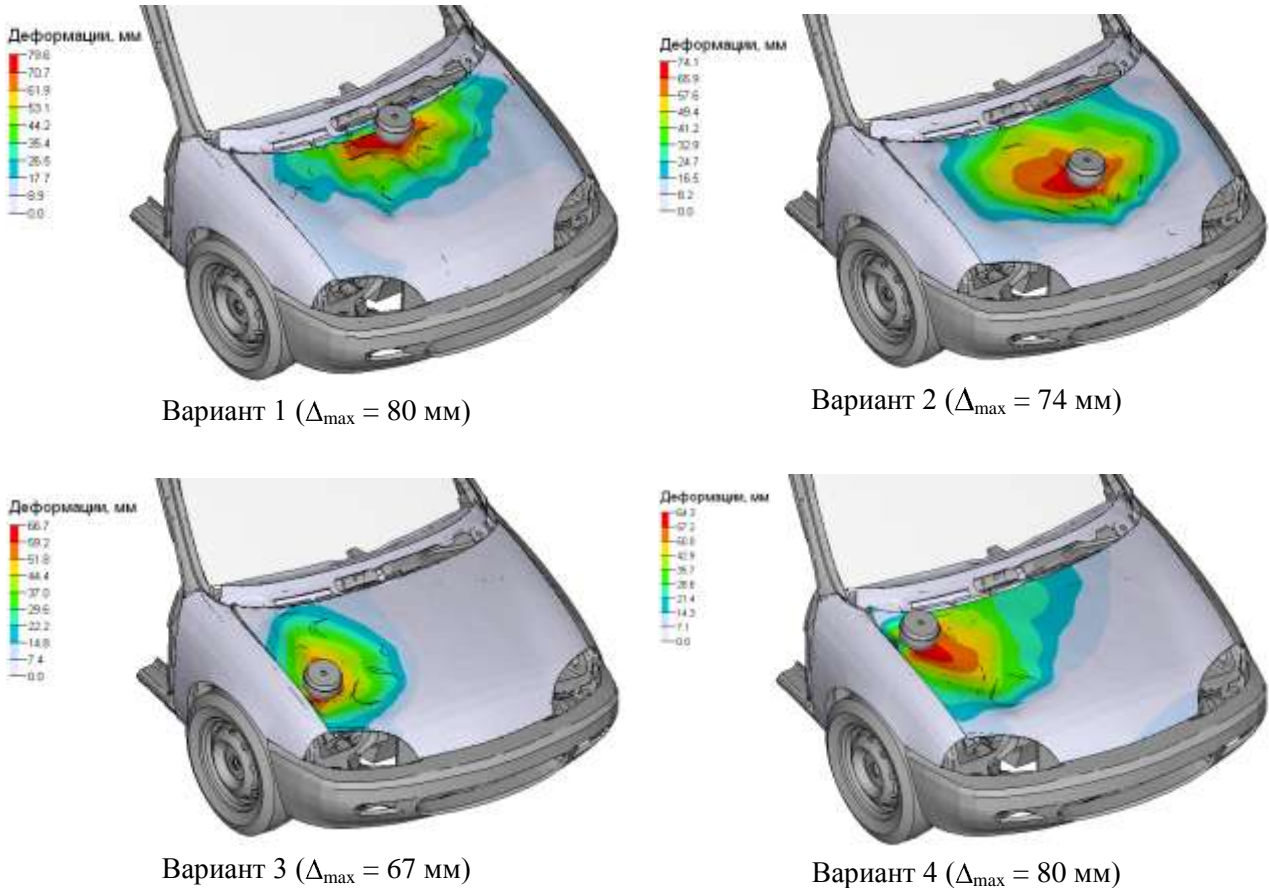


Рис. 6. Деформации капота автомобиля при различных вариантах нагружения

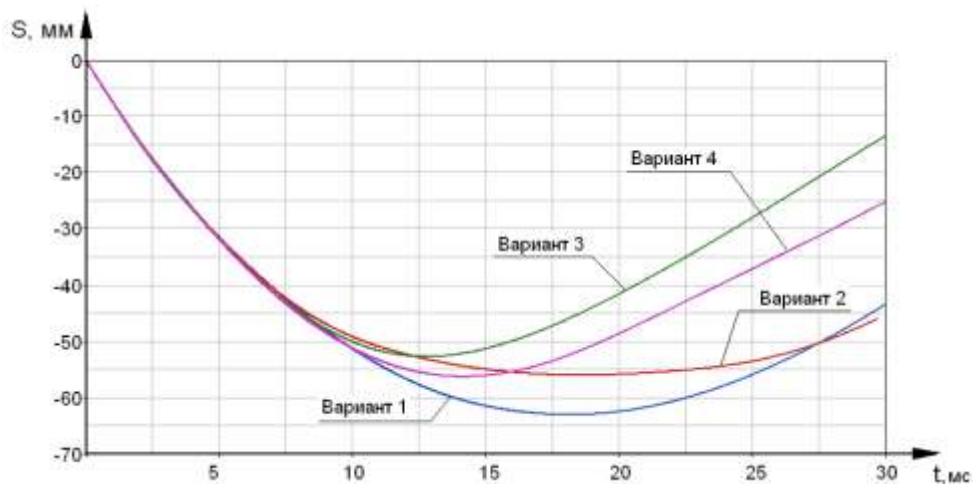


Рис. 7. Графики изменения вертикальных перемещений ( $S$ ) ударников за время  $t$

На рис. 8 представлены графики изменения ускорений ударников. Видно, что за счет меньших деформаций капота суммарные ускорения ударника в третьем и четвертом вариантах больше, чем в первом и втором. Тем не менее, во всех случаях максимальные суммарные ускорения не превышают 96 g. При расчете КТГ по формуле (1) можно получить следующие значения: вариант 1 – 251; вариант 2 – 307; вариант 3 – 494; вариант 4 – 405.

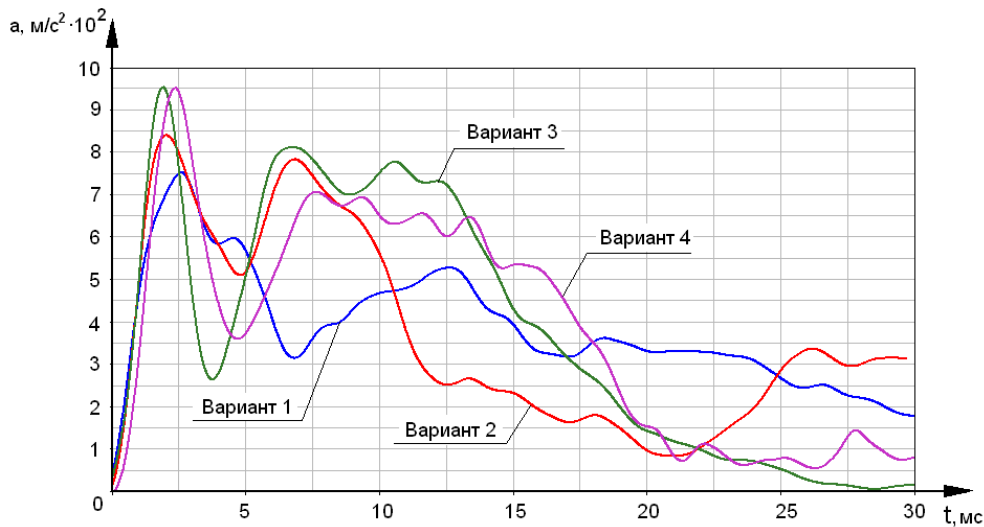


Рис. 8. Графики изменения суммарных ускорений ( $a$ ) ударников за время  $t$

Выполненные исследования показывают широкий спектр возможностей имитационного моделирования при проведении исследований по повышению пассивной безопасности легковых автомобилей, а также выполнению сравнительных оценок возможных вариантов конструктивных решений.

Результаты выполненной работы имеют важное практическое значение. Разработанная модель ударника головы пешехода может быть использована инженерами-расчетчиками ведущих автопредприятий страны на этапах проектирования и доводки конструкций автомобилей, учеными вузов, а также аспирантами и магистрантами при выполнении расчетно-экспериментальных исследований, направленных на повышение безопасности конструкций легковых автомобилей. Снижение риска травмируемости головы пешехода позволит повысить общий уровень безопасности пешехода и сократить количество тяжелых ДТП с наименее защищенными участниками дорожного движения.

#### Библиографический список

1. Первая Всемирная министерская конференция по безопасности дорожного движения [Электронный ресурс]: <http://www.kremlin.ru/news/6037>.
2. **Jikuang, Yang.** Review of Injury Biomechanics in Car -Pedestrian Collisions / Yang Jikuang // Crash Safety Division, Machine and Vehicle Systems, Chalmers University of Technology. February 28, 2002. – 20 p.
3. Заключительный доклад о разработке глобальных технических правил, касающихся безопасности пешеходов // ECE/TRANS/WP.29/GRSP/41/Add.1 ООН. Европейская экономическая комиссия, 2007 – 29 с.
4. Report: D70-UG 5.1 Workshop on pedestrian and cyclist safetyю. 2006. January 31. – 18 p.
5. Глобальные технические правила №9 Безопасность пешеходов // ECE/TRANS/180/Add.9/Appendix 1, ООН. Европейская экономическая комиссия, 2009. – 31 с.
6. Директива № 2003/102/ЕС. Защита пешеходов и других незащищенных участников движения до и во время столкновения с механическим транспортным средством, а также внесение поправок в Директиву Совета Европы №70/156/ЕЕС.

7. Директива 2004/90/ЕС. Технические предписания по реализации статьи 3 Директивы 2003/102/ЕС Европейского парламента и Совета в отношении защиты пешеходов и других уязвимых участников дорожного движения до и в случае столкновения с транспортным средством и изменяющие Директиву 70/156/ЕЕС // Официальный журнал Европейского сообщества. 2004. – 61 с.
8. **Сивковская, Е.В.** Расчетное сопровождение проектирования автомобиля для обеспечения требований по безопасности пешехода / Е.В. Сивковская, С.А. Курдюк // Будущее технической науки; НГТУ. – Н. Новгород, 2005.

*Дата поступления  
в редакцию 25.04.2011*

**L.A. Orlov, L.N. Orlov, A.V. Tumasov**

### **THE CALCULATIVE ESTIMATION OF PEDESTRIAN SAFETY IN CASE OF CAR RUNNING-DOWN ACCIDENT**

The article presents the results of joint scientific research that was investigated by NNSTU and TSU specialists and was aimed on simulation studying of the collision process of a car with a pedestrian. The description of the detailed finite element model of pedestrian head's impactor as well as simulation test results are presented.

*Key words:* pedestrian, impactor, passive safety, bonnet, head injury criteria.