

УДК 629.113

## **О НЕПРАВОМЕРНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРИТЕРИЯ НИС (HEAD INJURY CRITERIA) ДЛЯ ОЦЕНКИ ТРАВМОБЕЗОПАСНОСТИ ГОЛОВЫ ЧЕЛОВЕКА ПРИ УДАРЕ**

Б. А. Рабинович, д. т. н., проф. / РАППА

Н. А. Кулаков, к. ф.-м. н., проф. / Университет машиностроения

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Данная статья посвящена проблеме оценки травмобезопасности головы человека при ударе, вследствие которого может возникнуть черепно-мозговая травма (ЧМТ).

Большее число ЧМТ наблюдается при дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) на автомобильном транспорте.

По данным [1], в дорожно-транспортных происшествиях ежегодно гибнет более 1,2 млн человек, свыше 50 млн получают травмы; черепно-мозговые травмы получают от 50 до 90 % от числа попавших в ДТП людей.

Отметим, что ввиду значительного ежегодного роста числа автомобилей, поступающих в эксплуатацию, проблема безопасности человека в ДТП продолжает обостряться во всех странах.

Существенное значение для оценки безопасности человека при ДТП имеют критерии безопасности, применяемые в процессе испытаний автомобиля на удар. В настоящее время в числе таких критериев — коэффициент НИС (Head Injury Criteria), предложенный в [2].

Цели настоящей статьи:

- обобщить современные научные данные о структуре и физико-механических свойствах черепа и мозга человека, а также результаты экспериментальных исследований применительно к проблеме выбора критериев ЧМТ;
- на основании анализа экспериментальных материалов по исследованию черепно-мозговых травм и данных о структуре и физико-механических свойствах черепа и мозга человека сформулировать современные критерии оценки травмобезопасности головы человека при ударе;
- проанализировать обоснованность использования критерия НИС для оценки травмобезопасности головы человека при ударе.

### **СТРУКТУРА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧЕРЕПА И МОЗГА ЧЕЛОВЕКА**

#### **Череп**

С анатомической точки зрения [3] череп подразделяется на три структурных отдела: свод, основание и лицевой отдел.

Свод черепа представляет собой двояковыпуклую оболочку высокой жёсткости. Основание черепа образовано костными структурами и хрящевыми связками, совокупность которых лежит в плоскости, наклонённой на  $\approx 25^\circ$  к горизонтальной плоскости. Основание черепа имеет ряд отверстий, через которые проходят ствол мозга и другие нервные стволы.

В работах [4, 5] изложены результаты экспериментального определения жёсткости свода и основания черепа при нагрузках.

В [4] испытания проводились на пяти черепах. Внутрь полости черепа подавалось давление воздуха до 0,5·10<sup>5</sup> Па. Относительно неподвижной базы, на которой был установлен череп, измерялись деформации в характерных точках основания и свода черепа.

Было установлено, что при подаче давления внутрь черепа деформации в центральной зоне основания черепа примерно в десять раз больше деформаций свода черепа, то есть основание черепа обладает существенно большей податливостью при нагрузках, чем свод.

Отметим, что при деформациях черепа происходит изменение внутреннего объёма полости черепа, где расположен головной мозг. При подобных деформациях будет происходить перемещение тканей мозга относительно свода и основания черепа. В работах [6, 7] показано, что в процессе удара действительно наблюдаются деформации и смещения тканей мозга относительно костной структуры черепа.

#### **Мозг**

В экспериментах [8] на живом и мёртвом мозге к пластинке, установленной на поверхности мозга, прикладывалась постоянная нагрузка. В начальный момент времени деформации были пропорциональны нагрузке, что свидетельствует об упругих свойствах тканей мозга. С течением времени давление тканей мозга на пластинку падало, что характерно для среды, обладающей вязкоупругими свойствами.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О ЧМТ**

**Исследование ЧМТ с использованием биоманекенов**

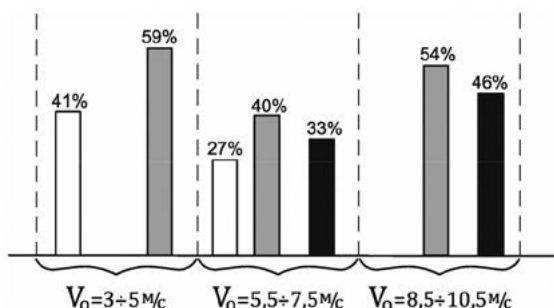
В работах [9, 10] приведены результаты экспериментального исследования биомеханики повреждения головного мозга биоманекенов при дозированных ударных нагрузках. Всего проведено более 450 опытов.

Изучались как удары головы о неподвижную преграду с использованием специальных стэндов, так и удары по голове ударниками различной формы.

На основании анализа проведённых исследований авторы сформулировали следующие выводы:

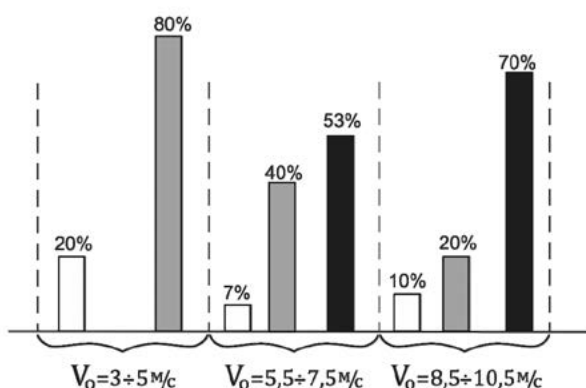
При ударных нагрузках (без переломов черепа), действовавших на голову по любому направлению — со стороны лба, затылка, виска, темени, — повреждения мозга локализовались в области базальных структур.

Установлена патогенетическая связь повреждений базальных структур мозга с деформацией основания черепа.



*Рисунок 1.* Зависимость состояния пострадавших в ближайшем последствии от начальной скорости удара головы о преграду. Удар лбом. Показано распределение числа случаев в процентах от общего числа ударов лбом:

■ — безопасное; □ — допустимое; ▒ — опасное



*Рисунок 2.* Зависимость состояния пострадавших в ближайшем последствии от начальной скорости удара головы о преграду. Удар затылком:

■ — безопасное; □ — допустимое; ▒ — опасное

В экспериментах отмечалась выраженная зависимость между толщиной костей в области крыши глазницы, больших крыльев основной кости и интенсивностью повреждений мозга. Чем тоньше были эти кости, тем значительнее повреждались базальные структуры — основания лобных долей и полюса височных долей мозга.

**Анализ ЧМТ после ДТП**

В работе [11] систематизированы результаты анализа 69 случаев ЧМТ, которые закончились летальным исходом.

При ударных нагрузках на голову по различным направлениям: в лоб, в затылок, в висок, сверху по темени — во всех случаях отмечались повреждения мозга в зоне базальных структур и костей основания черепа. Этот результат совпадает с выводами, изложенными выше.

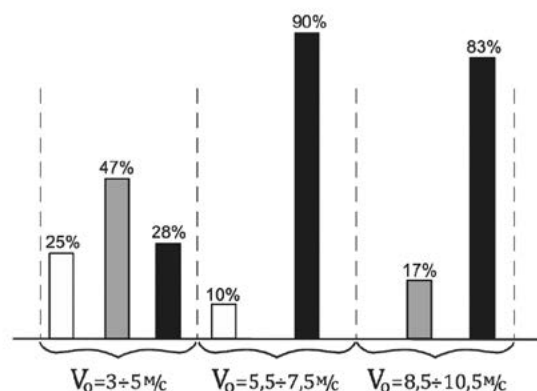
**Анализ ЧМТ по клиническим данным.**

**Влияние скорости удара**

В [12] приведены результаты анализа архивного материала, накопленного травматологическим отделением Института нейрохирургии им. Н. Н. Бурденко АМН СССР с 1938 по 1970 год (3 000 историй болезни). Обработывались те случаи, когда первичная изолированная травма головы явилась следствием падения человека из позы стоя на твёрдую поверхность. Скорость удара вычислялась с учётом описанных в истории болезни обстоятельств травмы.

Травмы теменной области были исключены из обработки, так как они, как правило, были следствием транспортных травм или падений предметов на голову.

С учётом указанных ограничений из 3 000 историй болезни были отобраны 317 (112 с травмой лобной области, 84 — височной, 121 — затылочной).



*Рисунок 3.* Зависимость состояния пострадавших в ближайшем последствии от начальной скорости удара головы о преграду. Удар виском:

■ — безопасное; □ — допустимое; ▒ — опасное

Результаты анализа полученных данных приведены на рис. 1, 2 и 3.

Как видно из приведённых материалов, состояние пострадавших в ближайшем последствии выражено ухудшалось с ростом скорости соударения головы с преградой.

Целенаправленный анализ случаев потери сознания при ЧМТ показал, что пороговая начальная скорость удара головы человека о твёрдую преграду, вызывающая потерю сознания, составляет  $V = 3$  м/с [12, 13].

### ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ТРАВМОБЕЗОПАСНОСТИ ГОЛОВЫ ЧЕЛОВЕКА ПРИ УДАРЕ

Из материалов, изложенных выше, следует, что с точки зрения механики голова человека представляет собой деформируемую упругую оболочку, заполненную вязкоупругой средой.

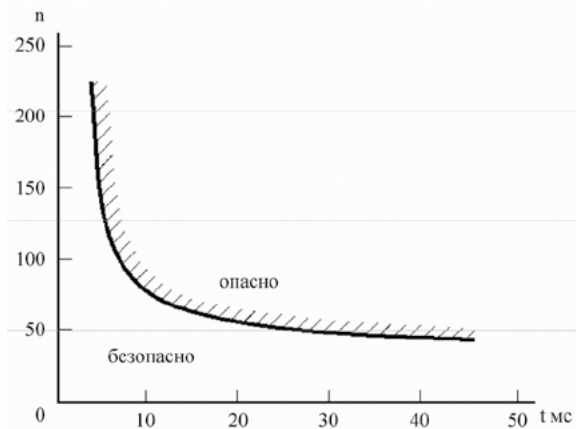


Рисунок 4. Кривая Патрика. Граница ударного воздействия на голову человека, вызывающего сотрясение мозга средней степени тяжести. Удар лбом о твёрдую плоскость;  $n$  — перегрузка на голове

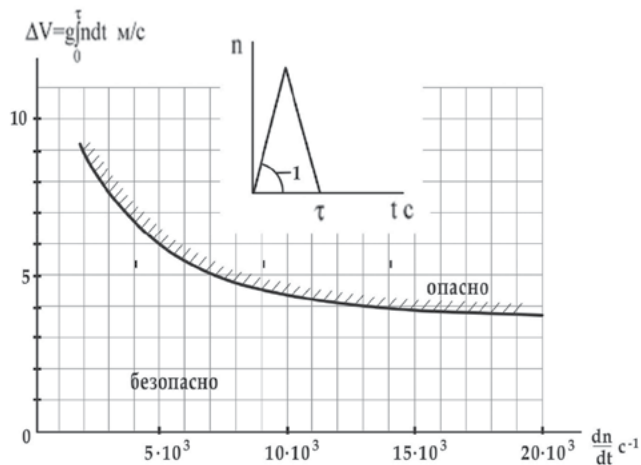


Рисунок 5. Кривая Патрика в координатах  $\Delta V$  —  $\dot{n}$ . Для ударного импульса в форме равнобедренного треугольника;  $\dot{n}$ ,  $\text{с}^{-1}$  — темп (скорость) нарастания перегрузки в голове манекена

При закрытой ЧМТ фактическими биомеханическими критериями травмобезопасности головы при ударе являются предельно допустимые напряжения в тканях мозга, созданные деформациями черепа и гидродинамическим давлением, которое распространяется по тканям мозга от точки удара.

Проблема выбора технических критериев ЧМТ состоит в установлении однозначного соответствия между измеряемыми в опытах техническими параметрами удара и предельно допустимыми напряжениями в тканях мозга, измерить которые экспериментально не представляется возможным.

Как известно из механики [14, 15, 16], при ударе по упругой оболочке с вязкоупругим наполнителем напряжения и деформации в элементах механической системы зависят от следующих факторов:

- скорости, теряемой системой при ударе (суммы начальной скорости удара и скорости упругого отскока);
- формы ударного импульса.
- максимальной амплитуды ударного ускорения.

При анализе результатов измерений ударных перегрузок в испытаниях, которые обычно проводятся с использованием манекена с жёстким макетом головы, скорость, теряемая при ударе, определяется как интеграл ударного ускорения, измеренного датчиками перегрузки на макете головы манекена:

$$\Delta V = \int_0^t gndt, \text{ м/с.}$$

Существенное значение для оценки и анализа измеренных перегрузок имеет форма ударного импульса. В [16] приведены типовые ударные импульсы и соответствующие значения коэффициентов динамичности.

В зависимости от формы ударного импульса значения деформаций и напряжений в вязкоупругой механической системе могут изменяться в 1,5–2 раза и более, что существенно влияет на оценку травмобезопасности ударного импульса при испытаниях.

Форма ударного импульса может быть охарактеризована скоростью нарастания перегрузки, что широко применяется на практике. Техника оценки скорости нарастания перегрузки схематично показана на рис. 6.

Как показали испытания и расчёты [30, 31, 32], реакция на удар вязкоупругих биомеханических структур определяется скоростью, потерянной при ударе, и скоростью нарастания перегрузки.

### НОРМЫ

Кривая Патрика (кривая Уэйн-Стейта) [3] (рис. 4), используемая для оценки результатов краш-тестов автомобилей, построена в координатах «перегрузка — время».

Поскольку при ударе форма диаграммы ударной перегрузки  $n(t)$  в голове близка к треугольной, кривая

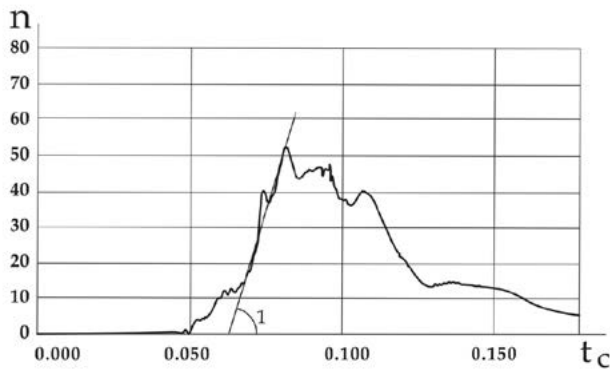


Рисунок 6. Пример обработки краш-тестов: 1 — скорость нарастающей перегрузки ( $dn/dt$ );  $dn/dt = 3\,000\text{ с}^{-1}$ ; автомобиль Hyundai Solaris

Таблица 1. Критерии травмы головы при ударе о твёрдую преграду с начальной скоростью  $V_0$

Критерии травмы головы	$V_0$ , м/с
Практически безопасно	3,05
Порог допустимости	3,96
50%-я вероятность летального исхода	5,49
Близкая к 100%-й вероятность летального исхода	7,01

Патрика легко может быть перестроена в координатах  $\Delta V - \dot{n}$ , где  $\Delta V = \int gndt$  — скорость, потерянная при ударе (то есть площадь диаграммы  $n(t)$ ).

Соответствующий график приведён на рис. 5, где кривая соответствует случаю диаграммы  $n(t)$  в форме равнобедренного треугольника.

Для оценки травмобезопасности измеренного в голове ударного импульса по диаграмме перегрузки  $n(t)$  определяется скорость  $\Delta V = \int gndt$ , потерянная при ударе, и скорость нарастания перегрузки  $dn/dt$ . Точка с указанными координатами наносится на диаграмму (рис. 5). В случае если полученные в ходе испытаний

данные ложатся ниже граничной кривой, ударное воздействие на голову можно считать безопасным.

Отметим, что аналогичные числовые данные о пределах безопасного удара головы человека о твёрдую преграду приведены в [33] (табл. 1).

## О НЕПРАВОМЕРНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КРИТЕРИЯ НИС

Авторами проведён анализ опубликованных диаграмм перегрузок  $n(t)$ , измеренных в голове испытательного манекена в краш-тестах ряда автомобилей [17... 29]. По диаграмме  $n(t)$ , измеренной в голове манекена, определялась площадь под кривой  $n(t)$ , по которой подсчитывалась скорость, потерянная при ударе. По возрастающей ветви диаграммы  $n(t)$  определялась скорость нарастания перегрузки. Пример обработки диаграммы приведён на рис. 6.

Результаты анализа сведены в табл. 2 и приведены на рис. 7.

В табл. 2 для наглядности приведены высоты свободного падения ( $H_{max}$ ), соответствующие скоростям, потерянным при ударе:  $H_{max} = V^2/2g$ .

Из рис. 7 видно, что величины допустимой скорости, потерянной при ударе головы человека о преграду, составляют от  $V = 3\text{ м/с}$  при  $dn/dt = 10\,000... 20\,000\text{ с}^{-1}$  до  $V = 9\text{ м/с}$  при  $dn/dt \leq 2\,000\text{ с}^{-1}$ .

В то же время при значениях НИС  $< 1\,000$ , принятых за допустимую норму, потерянная при ударе головы о преграду скорость в обработанных краш-тестах составила  $V = 18,8... 37,6\text{ м/с}$  при  $dn/dt = 2\,000... 20\,000\text{ с}^{-1}$ , что в несколько раз превышает допустимые для человека значения.

В краш-тестах № 4 и 9 (табл. 2, рис. 7) режимы воздействия по существу относятся к летальным для человека, однако эти режимы по методике подсчёта критерия НИС сочтены допустимыми.

Таблица 2. Сравнительный анализ травмобезопасности головы человека по материалам краш-тестов автомобилей

№ п/п	Тип автомобиля	НИС		$\Delta V_{max} = f(\dot{n})$				Источник
		Величина	Оценка	$V_{max}$ , м/с	$\dot{n}$ , 1/с	$(H_{max}$ , м; справка)	Оценка	
1	Chevrolet Lanos	772	Допустимо	35	1 500	62,5	Травмоопасно	[17]
2	Renault Symbol	801	Допустимо	37,6	1 000	72,1	Травмоопасно	[18]
3	LADA Kalina	540	Допустимо	23,7	1 875	28,6	Травмоопасно	[19]
4	BA3-2107	970	Допустимо	27,6	20 000	38,8	Летально	[20]
5	BYD F3	812	Допустимо	30	2 500	45,9	Травмоопасно	[21]
6	BA3-2170 Priora	904	Допустимо	35,1	1 080	62,8	Травмоопасно	[22]
7	Hyundai Solaris	434	Допустимо	27	3 000	37,2	Травмоопасно	[23]
8	Chevrolet NIVA	766	Допустимо	25	2 060	31,9	Травмоопасно	[24]
9	НИВА	605	Допустимо	28	7 800	40	Летально	[25]
10	Renault Logan	890	Допустимо	25,8	2 500	34	Травмоопасно	[26]
11	Daewoo Matiz	397	Допустимо	18,8	1 800	18	Травмоопасно	[27]
12	Fiat Tipo	818	Допустимо	25,9	1 900	34	Травмоопасно	[28]
13	Fiat Albea	677	Допустимо	31	1 500	49	Травмоопасно	[29]

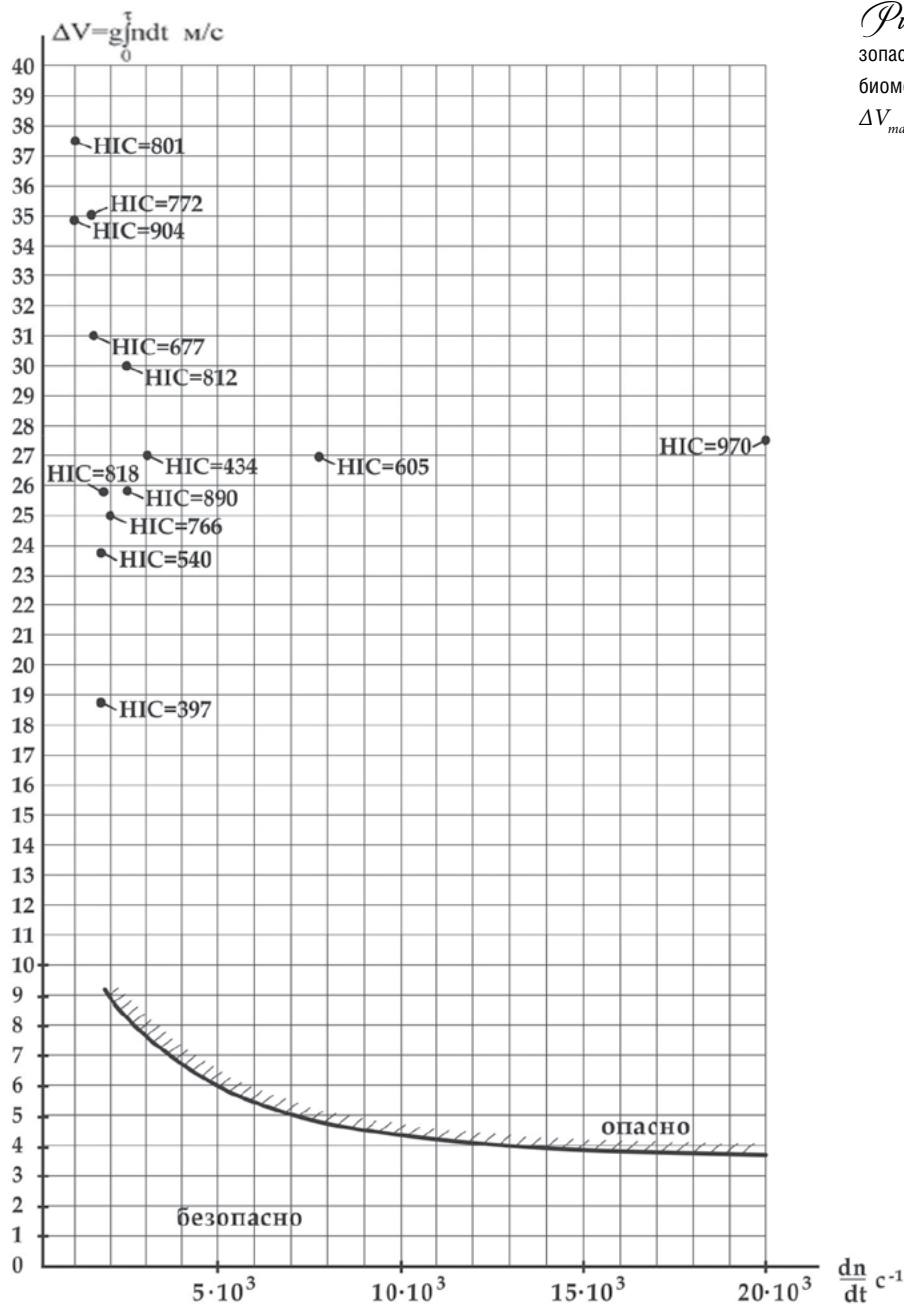


Рисунок 7. Результаты анализа травмоопасности головы человека с использованием биомеханически обоснованного критерия  $\Delta V_{max} = f(\dot{n})$

Как видно из структуры формулы, по которой подсчитывается НИС:

$$\text{НИС} = \left[ \left( 1 - \frac{t_1}{t_2} \right) \int_{t_1}^{t_2} a dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1),$$

где  $a$  — ускорение, выраженное в единицах ( $g$ ), то есть перегрузка, безразмерный параметр, критерий НИС фактически имеет размерность времени, однако при подсчётах величины НИС эта особенность критерия замалчивается.

Отметим, что методика подсчёта критерия НИС построена без учёта биомеханической структуры головы

человека как многокомпонентной вязкоупругой системы и не соответствует общепринятым в механике и биомеханике методикам анализа задач подобного рода.

Применение в практике испытаний автомобилей существующей методики подсчёта критерия НИС, построенной на необоснованных произвольных допущениях, фактически позволяет скрыть травмоопасный для человека интерьер автомобиля, что приводит к существенному увеличению числа людей, получающих травмы и погибающих в ДТП.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Всемирный доклад о предупреждении дорожно-транспортного травматизма / пер. с англ. — М.: Издательство «Весь мир». — 2004. — 280 с.
2. Gadd C. W. Use of Weighted-Impulse Criterion for Estimating Injury Hazard. — SAE 66793.
3. Крюков В. Н., Плаксин В. О. Новые данные о биомеханике и характере повреждений черепа // Судебно-медицинская экспертиза. — 1980. — № 4. — С. 16–20.
4. Купол с плоским основанием как модель черепа человека при механических нагрузках / А. С. Повицкий, Б. А. Рабинович, В. М. Тардов и др. // Биофизика. — М., 1974. — Т. XIX. — Вып. 6.
5. Чернейкин В. А., Шолпо Л. Н. Дальнейшее изучение модели черепа человека в виде купола с плоским основанием // Биофизика. — 1976. — Т. XXI. — Вып. 2.
6. Horgan T. J., Glichrist M. D. Influence of FE Model Variability in Predicting Brain Motion Intracranial Pressure Changes in Head Impact Simulations. — IJ Crach. — 2004. — Vol. 9, № 4.
7. Development of a Finit Element Human Head Model Partially Validated with Thirty Five Experimental Cases / Н. Мао, L. Zhang at al. // J. of Biomechanical Engineering. — 2013. — Vol. 35.
8. Пальцев Е. И., Сировский Э. Б. Вязкоупругие и пластические свойства живого мозга // Биомеханика. Труды Рижского НИИ травматологии и ортопедии. — 1975. — Вып. XIII.
9. Громов А. П. Биомеханика травмы. — М.: Медицина, 1979.
10. Салтыкова О. Ф. О деформационном механизме экспериментальных контузий головного мозга // Судебно-медицинская экспертиза. — 1980. — № 4.
11. Курме Д. А., Купч Я. А. Черепно-мозговые повреждения в зависимости от пусковых механизмов // Биомеханика. Труды Рижского НИИ травматологии и ортопедии. — 1975. — Вып. XIII.
12. Рабинович Б. А., Шолпо Л. Н., Щербакова Е. Я. Зависимость характера черепно-мозговой травмы от условий ударного воздействия // Космическая биология и медицина. — 1971. — № 5.
13. Оценка пороговой скорости удара, вызывающего сотрясение мозга у человека (анализ клинических данных) / Б. А. Рабинович, В. М. Тардов, Л. Н. Шолпо, Е. Я. Щербакова // Космическая биология и авиакосмическая медицина: тезисы докладов IV Всесоюзной конф. — 1972.
14. Работнов Ю. Н. Соппротивление материалов. — М.: Физматгиз, 1962.
15. Харрис С. М., Крид Ч. И. Справочник по ударным нагрузкам / пер. с англ. — Л.: Судостроение, 1980.
16. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г. С. Батуев, Ю. В. Голубков, А. К. Ефремов, А. А. Федосов. — М.: Машиностроение, 1969.
17. Карин П. Краш-тест Chevrolet Lanos [Электронный ресурс]. URL: <http://lanos-chevrolet.ru/crash-test-lanos.html> (дата обращения: 05.11.2015).
18. Краш-тест Renault Symbol — две большие разницы // RenaultStory — автомобили и дилеры Renault: интернет-сайт. — 2006. — 17 февраля [Электронный ресурс]. URL: <http://renaultstory.ru/krash-testyi-renault-symbol/krash-test-renault-symbol-dve-bolshie-raznitsyi.html> (дата обращения: 05.11.2015).
19. Краш-тест LADA Kalina. [Электронный ресурс]. URL: <http://kalina-2.ru/lada-kalina2/resultatyi-krashtesta> (дата обращения: 05.11.2015).
20. Краш-тест VAZ-2107 [Электронный ресурс]. URL: <http://avtoportal76/krash-testyi-VAZ-2107> (дата обращения: 05.11.2015).
21. Краш-тест BYD F3 [Электронный ресурс]. URL: <http://autorambler.ru/journal/elements/30.10.2008> (дата обращения: 05.11.2015).
22. Краш-тест VAZ-2107 Priora [Электронный ресурс]. URL: [http://www.myautotun.ru/netcat\\_files.file](http://www.myautotun.ru/netcat_files.file) (дата обращения: 05.11.2015).
23. Краш-тест Hyundai Solaris [Электронный ресурс]. URL: <http://kiar104.ru> (дата обращения: 05.11.2015).
24. Краш-тест Chevrolet NIVA [Электронный ресурс]. URL: <http://www.myauto-tun.ru/images/myautotun> (дата обращения: 05.11.2015).
25. Краш-тест «НИВЫ» [Электронный ресурс]. URL: [www.avtoreview/new-site/year2002/p19niva](http://www.avtoreview/new-site/year2002/p19niva) (дата обращения: 05.11.2015).
26. Краш-тест Renault Logan. Краш-тест «Логана», или Бедность не порок! // RenaultStory — автомобили и дилеры Renault: интернет-сайт. — 2006. — 17 марта [Электронный ресурс]. URL: <http://renaultstory.ru/krash-testyi-renault-logan/krash-test-renault-logan-krash-test-logana-ili-bednost-ne-porok.html> (дата обращения: 05.11.2015).
27. Краш-тест Daewoo Matiz [Электронный ресурс]. URL: [http://mancompany.ru/encyclopedia/motorist/crash\\_test](http://mancompany.ru/encyclopedia/motorist/crash_test) (дата обращения: 05.11.2015).
28. Henn H.-W. Crash Tests and the Head Injury Criterion // Teaching Mathematics and its Applications. — 1998. — Vol. 17, № 4.
29. Ветров Ю. Сикурецца: краш-тест Fiat Albea // Авторевию [Электронный ресурс]. URL: [http://www.avtoreview.ru/archive/2007/08/crash\\_albea/](http://www.avtoreview.ru/archive/2007/08/crash_albea/) (дата обращения: 05.11.2015).
30. Барер А. С. Предел переносимости. — М., 2012.
31. Рабинович Б. А. Безопасность человека при ускорениях. — М., 2007.
32. Деформации черепа человека при ударе (экспериментальное изучение и некоторые проблемы моделирования) / А. С. Барер, Ю. Г. Конахевич, Л. Н. Шолпо и др. // Механика композитных материалов. — 1980. — № 3. — С. 525–529.
33. Взрывные явления. Оценка и последствия: в 2 кн. / пер. с англ. // У. Бейкер, П. Кокс, П. Уэстайн и др. — М.: Мир, 1986. — Кн. 2. — С. 382.