

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ОСНОВНЫХ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ГОЛОВЫ

Иванов Ю.С., Кашанкова В.В.

*Цель.* Обоснование уровня защитных свойств и конструктивного исполнения отечественного шлема пожарного-спасателя.

*Методы.* Методы теоретического познания: анализ, синтез, индукция и обобщение.

*Результаты.* В результате анализа исследований по изучению основных защитных свойств средств индивидуальной защиты (СИЗ) головы установлены основные виды опасностей при травмах головы, их критические значения, установлены факторы, оказывающие влияние на прочностные свойства и конструкцию корпуса шлема. Определены перспективные методы исследования в области проектирования и разработки СИЗ головы.

*Область применения исследований.* Разработка современных отечественных СИЗ.

*Ключевые слова:* средства индивидуальной защиты головы, травма головы, шлем/каска, защитные свойства.

(Поступила в редакцию 19 сентября 2025 г.)

### Введение

В соответствии со статистическими данными производственного травматизма за 2020 г. травмы головы и шеи составили около 8 и 6,6 % от общего количества несчастных случаев в ЕС и США соответственно [1]. Согласно данным Национальной ассоциации противопожарной защиты США, 9 % травм, полученных пожарными за 2017–2021 гг. (по среднегодовому показателю), приходилось на травмы головы [2]<sup>1</sup>. Основные причины получения таких травм – падение предметов, обрушение конструкций и падение работников на скользкой поверхности. Очевидно, что шлем/каска является неотъемлемым элементом экипировки не только пожарных, спасателей, но и представителей других профессий, связанных с риском получения травмы головы (лесозаготовительная, топливная промышленность, строительство и др.).

Разработка современного СИЗ головы с высоким уровнем защитных свойств и оптимальными конструктивными решениями требует проведения исследований в области биомеханики травмы головы. Настоящая работа посвящена обобщению последних достижений в области решения этой актуальной научно-практической задачи.

### Основная часть

Шлемы и каски используются для защиты от ударов еще со времен античности. Основное предназначение СИЗ головы – защита головы при падении, от падающих предметов и ударов. При этом указанные СИЗ должны обладать механической прочностью (характеризуется способностью сопротивляться различным внешним механическим воздействиям) и амортизационной способностью (характеризуется величиной усилия, передаваемого шлемом/каской на модель головы при ударе определенной энергии) [3]. Научному обоснованию данных защитных свойств (в большей степени касок строительных) было посвящено немалое количество научных трудов.

Механическая прочность и амортизационная способность в большей степени определяют выбор конструкции и материала каски [3]. В целях обоснования требований к уровню механической прочности и амортизационной способности СИЗ головы начиная с 50-х гг. XX в. был проведен ряд исследований по изучению последствий воздействия на организм человека различного рода травм головы. Данному вопросу посвящены научные работы по биомеханике травмы (механизм, характер воздействия и повреждений в зависимости от параметров ударного воздействия) головы, наибольший интерес из которых представляют работы А.П. Громова [4], в том числе написанные в соавторстве [5; 6], Х.Е Фон Гирке

<sup>1</sup> Бойко, И. История и устройство пожарной охраны США / И. Бойко, М. Сафоненко // Пожару.нет. – 2021. – 1 апр. – URL: [https://shop-pozharu.net/info/articles/2021/istoriya\\_i\\_ustroystvo\\_pozharnoy\\_okhrany\\_ssha/](https://shop-pozharu.net/info/articles/2021/istoriya_i_ustroystvo_pozharnoy_okhrany_ssha/) (дата обращения: 18.09.2025).

и Дж.В. Бринкли [7], R.W. Webster [8], T.D. Proctor [9], A. Mayer и S. Salsi [10], F.J. Rowland, A.A. Scalone и C. Orlando [11], С.А. Корсакова [12], Г.В. Недугова [13] и др. Полученные советскими учеными данные [4] позволили установить зависимость между тяжестью повреждений и параметрами ударного воздействия, обосновать эффективность СИЗ головы и требования к ним (разработаны специальные ГОСТ СССР для защитных касок).

В ходе исследований, проведенных научным коллективом с участием А.П. Громова, установлено 3 вида опасности при ударе предметом по голове: разрушение костей черепа, повреждение шейных позвонков и сотрясение головного мозга [4]. Полученные результаты в [4] приводятся в сравнении с показателями, полученными зарубежными авторами. В частности, разрушение костей черепа в соответствии с работой R.W. Webster [4; 8] наступает при ударе энергией 4,5–5,5 кгс/м (44–54 Дж). Для уточнения приведенных показателей А.П. Громовым совместно со специалистами в области судебной экспертизы, биофизики и другими учеными были проведены исследования по определению «критических нагрузок на голову человека в защитной каске» [4]. В рамках данного исследования осуществлялось изучение последствий концентрированного и распределенного удара (удара по незащищенной и защищенной голове). В отличие от изысканий Е.Т. Трубникова [14] проводились биомеханические исследования. Установлено, что повреждение костей черепа происходит при энергии концентрированного удара в 5,25 кгс/м (51,5 Дж). Эти результаты согласуются с результатами, полученными американскими учеными Х.Е. Фон Гирке и Дж.В. Бринкли [7], но не подтвердили исследования Е.Т. Трубникова [14], согласно которым критической нагрузкой при распределенном ударе является 5,5 кгс/м (53,9 Дж). Стоит отметить, что каска с нулевой амортизацией (практически не амортизирующая удар) предотвращает костные повреждения при таких воздействиях [4]. Повреждения костей при распределенном ударе (биоманекен в каске) наступают при ударе энергией 8,4–9 кгс/м (82,4–88,3 Дж) (в том числе при боковом ударе).

Повреждение шейных позвонков согласно исследованиям R.W. Webster [8] происходит при вертикальном ударе, эквивалентном статическому усилию 544 кгс (5–6 кН) [3]. А.П. Громовым было доказано большее повреждающее воздействие статических нагрузок по сравнению с динамическими. Было установлено, что «за счет амортизации позвоночника нагрузка в среднем снижается на 31 %» и повреждение шейного отдела позвоночника при этом не происходит. Таким образом, согласно [4] диапазон повреждения шейных позвонков составляет 4–8 кН [3].

Сотрясение головного мозга как критерий безопасности в полной мере А.П. Громовым не был исследован. Ученый выдвинул предположение, что «при рассредоточенном ударе сотрясение мозга наступает при ударе с большей энергией, чем при концентрированном» [4], в связи с этим была подвергнута сомнению предусмотренная [14] «абсолютно безопасная для человека в защитной каске» величина усилия 1,4 кгс/м. При оценке данного критерия А.П. Громов ссылается на работы вышеупомянутых Х.Е. Фон Гирке и Дж.В. Бринкли [7]. Х.Е. Фон Гирке и Дж.В. Бринкли установили «порог сотрясения головного мозга» или «относительно безопасного сотрясения головного мозга» при концентрированном ударе – 2,15 кгс/м (21,1 Дж). Следовательно, можно сделать вывод, что рассредоточенный удар такой энергии не вызовет сотрясение мозга. Однако имеются работы С.М. Harris и C. Crede, в которых авторы отмечают сотрясение головного мозга при ударе с энергией 23 Дж в большинстве случаев [3].

Проведение исследований в области биомеханики травмы позволили задать критерии безопасности (уровни защиты [3]) для персонала, выполняющего работы в СИЗ головы. Следует отметить, что в качестве «лимитирующих факторов» [3] приняты повреждение шейных позвонков и сотрясение головного мозга.

На основании результатов исследований и литературных источников [7] в [6] было предложено, что «для защиты головы от падающих сверху предметов каска должна выдерживать нагрузку с энергией удара 8,6 кгс/м (84,3 Дж) (при 75 % амортизации), что соответствует ударной нагрузке шаром массой 4,78 кг, падающим с высоты 1,8 м». При этом передаваемое на голову усилие составляет 2,15 кгс/м (21,1 Дж), что соответствует критериям безопасности по лимитирующим факторам (повреждение шейных позвонков и сотрясение головного мозга).

Таким образом, А.П. Громов с соавторами [6] рекомендовали ужесточить требования действующих на тот момент стандартов (устойчивость при ударе в 50 Дж, величина передаваемого на голову усилия – не более 5 кН) и изготавливать каски с большей ударостойкостью

и, соответственно, амортизирующей способностью. На этих рекомендациях базировались стандарты, устанавливающие требования к СИЗ головы различного назначения, действующие на территории стран СНГ.

В таблице 1 приведены основные требования, предъявляемые к механической прочности, амортизирующей способности, устойчивости к перфорации шлемов/касок пожарного в странах СНГ, Европе и США [15–18]. Наиболее строгие требования к амортизирующей способности устанавливает американский стандарт (передаваемое усилие не более 3,780 кН) [18]. Методы оценки передаваемого усилия в [15–18] имеют отличия.

**Таблица 2. – Средства измерений**

Показатель	ГОСТ 30694-2000	ГОСТ Р 53269-2019	EN 443:2008	NFPA 1971:2018
Удар тупым предметом (испытание на амортизацию)	125 Дж (передаваемое усилие ≤15 кН)	50 Дж (передаваемое усилие ≤5 кН)	123 Дж (передаваемое усилие ≤15 кН)	54 Дж (передаваемое усилие ≤3,780 кН) 93 Дж (передаваемое ускорение: верх ≤150g, перед/зад/стороны ≤300g)
Удар тупым предметом (испытание на механическую прочность)	80 Дж	80 Дж	–	–
Удар острым предметом (испытание на перфорацию)	30 Дж	30 Дж	24,5 Дж (верх), 19,5 Дж (боковые поверхности)	24,5 Дж

*Примечание.* В таблице *g* – ускорение свободного падения ( $\text{м}/\text{с}^2$ ).

Следует отметить, что при стандартизации зачастую требования к защитным свойствам СИЗ продиктованы их ведущими производителями, стремящимися к производству уникальной продукции с высокой степенью защиты, что особенно характерно для стран Европы. В свою очередь, требования [17] были учтены при разработке отечественного стандарта [15].

Устойчивость шлема/каски к указанным выше опасностям обеспечивается выбором материала корпуса и его конструктивного исполнения, а также материала внутренней оснасти и средств дополнительной амортизации. Согласно заключениям В.Е. Родина и В.В. Трумеля [3; 19] рациональными являются конструкции, в которых «применению жесткого, неупругого материала неизменно сопутствует слабовыпуклая форма купольной части корпуса, и, наоборот, при использовании термопластичных материалов, обладающих большой эластичностью, купол корпуса должен быть крутых». В первом случае рациональным является применение более эластичной внутренней оснастки (амортизатора), во втором – жесткой, т.к. значительную часть нагрузки будет поглощать купол шлема. В последние годы наблюдается тенденция к производству СИЗ головы с «реактивным» корпусом, высокими прочностными характеристиками. Такие конструктивные решения и подход к обеспечению безопасности ведут к увеличению жесткости корпуса и снижению амортизационных свойств шлемов/касок. В качестве компенсирующего мероприятия применяются дополнительные средства амортизации: амортизаторы и внутренние оболочки (для мотошлемов) из пенополистирола, пенополипропилена и подобных вспененных материалов. Амортизаторы применяются не только в промышленных, военных и пожарных, но и хоккейных, велосипедных, мотоциклетных шлемах/касках.

С развитием цифровых технологий стало возможным моделирование ударных воздействий без применения биоманекенов и реализации большого числа натурных экспериментов. Применение конечно-элементных моделей позволило воспроизвести воздействия различной сложности, что на практике требует больших трудозатрат [20–26], и определять параметры и нагрузки, которые тяжело измерить в условиях реального эксперимента [20]. Изначально модели головы человека, применяемые при компьютерном моделировании, были значительно упрощены и представляли собой систему из нескольких тел с заданными свойствами, имитирующих основные ткани [20]. С течением времени модели дорабатывались с учетом анатомических особенностей и свойств тканей, применялись различные подходы к заданию границ между отдельными материалами. Наиболее современные модели основаны на данных компьютерной или магнитно-резонансной томографии [20]. Современные

имитационные модели ударных нагрузок на голову содержат следующие основные допущения:

- ткани рассматриваются как изотропные;

- в зависимости от типа проводимого эксперимента мозг человека (в отличие от других тканей, которые представляются как линейно-упругие) может быть определен как материал с линейно-упругим или линейно-вязкоупругим поведением [20];

- между мозгом и черепом имеются общая граница / отделены слоем спинномозговой жидкости с линейно-упругими свойствами / исключается взаимное движение / допускается скольжение.

Те или иные допущения принимаются в зависимости от решаемой при моделировании задачи. Однако неизменно то, что проведение натурного эксперимента является важным этапом проверки любой конечно-элементной модели, используемой для изучения травмы головы.

Накопленный к настоящему моменту экспериментальный материал и результаты моделирования [4; 20] позволяют с достаточной достоверностью определить вероятность травматизма. При этом могут использоваться различные критерии черепно-мозговой травмы. Наибольшее распространение получили критерии, вычисляемые на основе ускорения центра тяжести головы [20]: *HIC* (Head Injury Criterion), *GSI* (Gadd Severity Index), оценка максимального линейного и вращательного ускорения и др.

Значения напряжений, деформаций и внутричерепного давления применяются для оценки довольно редко.

Критерий *HIC* учитывает ускорение головы и его продолжительность. Данный критерий отображает вероятность возникновения травм головы в результате удара. *HIC* выводится из измерений акселерометра, установленного в центре макета головы, и определяется как:

$$HIC = \max_{t_1, t_2} \left\{ (t_2 - t_1) \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2,5} \right\},$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – начальное и конечное время интервала, в течение которого *HIC* достигает максимального значения, с;

$a(t)$  – ускорение макета головы в момент времени  $t$ , измеряемое в ускорениях свободного падения  $g$ .

Временной интервал ограничен значениями от 3 до 36 мс, обычно принимается значение 15 мс [27]. Критерий *HIC* широко применяется для оценки степени тяжести травм при оценке безопасности СИЗ головы (в том числе спортивных), автомобильного транспорта. Для простоты анализа полученных в ходе экспериментальных исследований результатов применяется сокращенная шкала тяжести повреждений *AIS* (Abbreviated Injury Scale). В соответствии со шкалой *AIS* каждая травма классифицируется в зависимости от области тела, а также тяжести повреждений [28]. В таблице 2 приведено соотношение между шкалой *AIS*, критерием *HIC*, максимальным ускорением и тяжестью травмы.

**Таблица 2. – Оценка степени тяжести повреждений головы по шкале *AIS* в соотношении с критерием *HIC* и максимальным ускорением**

Шкала <i>AIS</i>	Оценка степени тяжести травмы	<i>HIC</i>	Максимальное ускорение
0	Нет травмы	134	50 g
1	Легкая (головная боль, головокружение)	135–519	50–100 g
2	Средняя (потеря сознания менее 1 ч)	520–899	100–150 g
3	Серьезная (потеря сознания 1–6 ч)	900–1254	150–200 g
4	Тяжелая (потеря сознания 6–24 ч)	1255–1574	200–250 g
5	Критическая (потеря сознания в течение более 25 ч, большая гематома)	1575–1859	250–300 g
–	Летальный исход	1860	–

Результаты моделирования, их сходимость с результатами натурных наблюдений зависят от принимаемых в обоих случаях допущений, видов прилагаемых воздействий, времени их действия и других критериев. Российским ученым [20] удалось получить конечно-элементную модель головы, которая показала удовлетворительные результаты в сравнении

с экспериментальными исследованиями, что говорит о возможности ее применения в решении различных задач контактной биомеханики для случаев кратковременных ударных нагрузок. Ими было установлено, что при силе удара от 4000 до 6000 Н можно говорить о получении травмы средней и серьезной тяжести. Удары с силой более 7000 Н влекут тяжелые последствия с длительной потерей сознания, 10 000 Н – с большой вероятностью наступит смерть. Данные уточняются по мере создания современных трехмерных конечно-элементных моделей, совершенствования вычислительных алгоритмов и методов натурных наблюдений.

Технологии моделирования все чаще используются при оценке прочностных свойств СИЗ головы, применяемых в промышленности, мотошлемов, спортивных касок [29; 30]. Научные работы в этой области посвящены изучению влияния параметров ударной нагрузки, количества наносимых ударов, конструктивных решений изделия и т.д. на его прочностные характеристики. В работе [31] представлена разработка конструктивных решений шлема пожарного с точки зрения «пользователь – продукт – окружающая среда», что в большей степени касается функциональности, эргономики и иных аспектов, не связанных с прочностными свойствами изделия. Особый интерес представляют исследования по оценке именно прочностных характеристик шлемов/касок пожарного [32–38].

### Заключение

На основании проведенного анализа можно утверждать, что разработка требований к прочностным и амортизационным характеристикам средств индивидуальной защиты (СИЗ) головы опирается на углубленное понимание процессов травматизации черепа и головного мозга, сформированное в результате теоретических и экспериментальных биомеханических исследований. Установлено, что теоретические модели и биомеханические эксперименты позволили выделить три ключевых типа опасности при травмах головы и их критические значения. Полученные научные данные позволили обосновать параметры безопасности и сформировать стандарты, обеспечивающие эффективную защиту от механических повреждений. Наряду с зарубежными исследователями значительный вклад в изучение биомеханики травмы, а также в формирование нормативных требований к уровню защиты от механических повреждений СИЗ головы на территории постсоветского пространства внес А.П. Громов с соавторами (Н.П. Пырлин, В.И. Потапов и др.). В ходе анализа также определена зависимость уровня основных защитных свойств касок/шлемов от материала, применяемого для изготовления корпуса, а также от конструктивного исполнения корпуса и внутренней оснастки, наличия средств дополнительной амортизации. Выявлено, что использование современных технологий в сфере биомеханики травмы и оценки эффективности СИЗ головы позволяет широко оценить процессы, происходящие при ударных воздействиях в макете головы и средстве защиты, что, в свою очередь, дает возможность обеспечить научный подход к их разработке, тщательно продумать конструкцию и эргономику.

Следовательно, проведение с применением современных технологий исследований в области комплексной оценки влияния конструктивных параметров касок пожарных (геометрия корпуса, применяемые материалы, конфигурация внутренней оснастки) на их прочностные характеристики позволит обосновать оптимальные инженерные решения, направленные на повышение их уровня защиты и функциональной надежности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Accidents at work statistics // Eurostat: official website of the European Union. – URL: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Accidents\\_at\\_work\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Accidents_at_work_statistics) (date of access: 18.09.2025).
2. Campbell, R. Firefighter injuries on the fireground / R. Campbell // National Fire Protection Association (NFPA), August, 2024. – 15 p. – URL: <https://www.nfpa.org/education-and-research/research/nfpa-research/fire-statistical-reports/patterns-of-firefighter-fireground-injuries> (date of access: 18.09.2025).
3. Родин, В.Е. Научно-технические основы разработки средств индивидуальной защиты человека от основных видов производственного травматизма: дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.01 / Родин Владимир Ефимович; Екатеринбург. науч.-исслед. ин-т охраны труда. – Екатеринбург, 1999. – 395 л.
4. Громов, А.П. Биомеханика травмы: повреждения головы, позвоночника и грудной клетки / А.П. Громов. – М.: Медицина, 1979. – 271 с.
5. Громов, А.П. Новый метод измерения силы удара в судебной травматологии / А.П. Громов, Б.А. Прудковский, О.А. Ромодановский [и др.] // Судебно-медицинская экспертиза. – 1971. – Т. 14, № 2. – С. 8–10.

6. Громов, А.П. Исследование повреждений костей черепа в эксперименте при дозированных ударах / А.П. Громов, И.И. Антуфьев, О.Ф. Салтыкова [и др.] // Судебно-медицинская экспертиза. – 1967. – Т. 10, № 3. – С. 14–20.
7. Фон-Гирке, Х.Е. Ударные ускорения / Х.Е. Фон-Гирке, Дж.В. Бринкли // Основы космической биологии и медицины: совмест. совет.-амер. изд. в 3 т. / Акад. наук СССР, Нац. упр. по аэронавтике и исслед. косм. пространства США; под общ. ред. О. Г. Газенко, М. Кальвина. – М.: Наука, 1975. – Т. 2, кн. 1: Экологические и физиологические основы космической биологии и медицины. – С. 232–264.
8. Industrial protective helmets for electrical workers, class B: ANSI Z89.2-1971 (American National Standard Safety Requirements). – Approved April 14, 1971. – New York: American National Standards Institute, 1971. – 15 p. – URL: <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/ansi.z89.2.1971.pdf> (date of access: 18.09.2025).
9. Proctor, T.D. A review of research relating to industrial helmet design / T.D. Proctor // Journal of Occupational Accidents. – 1982. – Vol. 3, No. 4. – P. 259–272. – DOI: 10.1016/0376-6349(82)90003-7.
10. Mayer, A. Casques de protection pour l'industrie-Bilan des essais. Critères de choix pour l'utilisateur / A. Mayer, S. Salsi // Cahiers de notes documentaires – 1977. – Vol. 87, No. 2. – P. 159–185.
11. Development of standards for industrial and firefighters head protective devices: final rep. / A.A. Scalane // National Technical Reports Library. – URL: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB225163.xhtml#> (date of access: 18.09.2025).
12. Корсаков, С.А. Биомеханика ударного взаимодействия травмирующего предмета и человека / С.А. Корсаков // Медицинская экспертиза и право. – 2012. – № 3. – С. 10–12. – EDN: PBUNGJ.
13. Недугов, Г.В. Определение и экспертная оценка силы удара / Г.В. Недугов, В.В. Недугова // Проблемы экспертизы в медицине. – 2012. – Т. 12, № 1-2. – С. 14–17. – EDN: PCLAKB.
14. Трубников, Е.Г. Исследование и совершенствование средств индивидуальной защиты головы горнорабочего от травм: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 03.03.01 / Трубников Евгений Григорьевич; Ленинградский горный институт. – Л., 1972. – 22 с.
15. Техника пожарная. Шлем пожарного. Общие технические требования и методы испытаний: ГОСТ 30694-2000. – Введ. 01.09.2002. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Бел. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2002. – 48 с.
16. Техника пожарная. Каски пожарные. Общие технические требования. Методы испытаний: ГОСТ Р 53269-2019. – Введ. 19.09.2019. – М.: Стандартинформ, 2019. – 24 с.
17. Helmets for fire fighting in buildings and other structures: EN 443:2008. – Impl. 01.06.2008. – Brussels: European Committee for Standardization, 2008. – 40 p.
18. Standard on protective ensembles for structural fire fighting and proximity fire fighting: NFPA 1971:2018. – Impl. 05.12.2012. – National Fire Protection Association (NFPA), 2018.
19. Трумель, В.В. Совершенствование и разработка средств индивидуальной защиты головы для работников горной промышленности: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Трумель Виталий Владимирович; Моск. гос. горный ун-т. – М., 2003. – 15 с.
20. Караваев, А.С. Математическое моделирование ударного воздействия на голову при черепно-мозговых травмах / А.С. Караваев, С.П. Копысов // Российский журнал биомеханики. – 2018. – Т. 22, № 2. – С. 178–195. – DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2018.2.04. – EDN: YLXLLV.
21. Агапов, П.И. Численное моделирование последствий механического воздействия на мозг человека при черепно-мозговой травме / П.И. Агапов, О.М. Белоцерковский, И.Б. Петров // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2006. – Т. 46, № 9. – С. 1711–1720. – EDN: HUZTFN.
22. Белошицкий, В.В. Принципы моделирования черепно-мозговой травмы в эксперименте / В.В. Белошицкий // Український нейрохірургічний журнал. – 2008. – № 4. – С. 9–15. – DOI: 10.25305/unj.108232. – EDN: PXRWVB.
23. Васюков, А.В. Моделирование механических факторов черепно-мозговых травм сеточно-характеристическим численным методом / А.В. Васюков, И.Б. Петров // Вестник Российской государственного университета им. И. Канта. – 2010. – № 10. – С. 42–50. – EDN: MWCBPN.
24. Караваев, А.С. Метод построения неструктурированных шестигранных сеток из объемных данных / А.С. Караваев, С.П. Копысов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2013. – Т. 5, № 1. – С. 11–24. – DOI: 10.20537/2076-7633-2013-5-1-11-24. – EDN: QYUQPN.
25. Караваев, А.С. Метод Шварца декомпозиции области в контактных задачах / А.С. Караваев, С.П. Копысов // Проблемы механики и материаловедения: труды Института механики УрО РАН. – Ижевск: Институт механики Уральского отделения РАН, 2017. – С. 6–20. – EDN: ZFJJXN.

26. Караваев, А.С. Построение биомеханических конечно-элементных моделей / А.С. Караваев, С.П. Копысов, И.М. Кузьмин // Проблемы механики и материаловедения: труды Института механики УрО РАН. – Ижевск: Институт механики Уральского отделения РАН, 2016. – С. 7–13. – EDN: WEKXWD.
27. Henn, H-W. Crash tests and the head injury criterion / H-W. Henn // Teaching Mathematics and its Applications: An International Journal of the IMA. – 1998. – Vol. 17, № 4. – P. 162–170. – DOI: 10.1093/teamat/17.4.162.
28. Дятлов, М.М. Системы определения степени тяжести политравмы и концепции хирургической помощи при ней. Часть 1. Системы и концепции, разработанные на Западе (обзор литературы) / М.М. Дятлов // Проблемы здоровья и экологии. – 2006. – № 2. – С. 7–17. – DOI: 10.51523/2708-6011.2006-3-2-1. – EDN: YUFQQD.
29. Wu, J.Z. Evaluation of the shock absorption performance of construction helmets under repeated top impacts / J.Z. Wu, C.S. Pan, B.M. Wimer // Engineering Failure Analysis. – 2018. – Vol. 96. – P. 330–339. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.10.015.
30. Caserta, G.D. Shock absorption performance of a motorbike helmet with honeycomb reinforced liner / G.D. Caserta, L. Iannucci, U. Galvanetto // Composite Structures. – 2011. – Vol. 93, No. 11. – P. 2748–2759. – DOI: 10.1016/j.compositesct.2011.05.029.
31. Fangting Xu. Research on the product design of firefighting helmet based on design scenario / Fangting Xu, Kang Hu // Proceedings of the 2nd International Conference on Management, Education and Social Science (ICMESS 2018) / Advances in Social Science, Education and Humanities Research, Vol. 176. – Atlantis Press, 2018. – P. 602–606. – DOI: 10.2991/icmess-18.2018.133.
32. Шумай, С.М. Разработка, научное обоснование параметров и результаты испытаний перспективной модели шлема пожарного-спасателя / С.М. Шумай, В.В. Воронович, С.П. Асташов [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2018. – № 2 (44). – С. 113–120. – EDN: MCNEBG.
33. Старовойтов, А.А. Разработка и внедрение в органы и подразделения МЧС Республики Беларусь облегченной модели шлема спасателя-пожарного / А.А. Старовойтов, С.М. Малашенко, В.В. Кашанкова // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2021. – № 2 (50). – С. 164–170. – DOI: 10.54422/1994-439X.2021.2-50.164-170. – EDN: VGRMED.
34. Шумай, С.М. Анализ технических нормативно-правовых актов, устанавливающих требования к шлемам пожарного / С.М. Шумай, Ю.С. Иванов, В.В. Кашанкова, С.М. Малашенко // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 60-летию создания первого в Респ. Беларусь науч. подразделения в обл. предупреждения и ликвидации чрезвычайн. ситуаций и пожаров, Минск, 1 нояб. 2016 г.: в 2 ч. / Науч.-исслед. ин-т пожар. безопасности и проблем чрезвычайн. ситуаций МЧС Респ. Беларусь. – Минск, 2016. – Ч. 2. – С. 398–409.
35. Старовойтов, А.А. Разработка облегченной модели шлема спасателя-пожарного / А.А. Старовойтов, С.М. Малашенко, В.В. Кашанкова // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сб. материалов IX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 65-летию создания первого в Респ. Беларусь науч. подразделения в обл. предупреждения и ликвидации чрезвычайн. ситуаций и пожаров, Минск, 30 сент. 2021 г. / Науч.-исслед. ин-т пожар. безопасности и проблем чрезвычайн. ситуаций МЧС Респ. Беларусь. – С. 175–178.
36. Иванов, Ю.С. Результаты испытаний шлемов пожарного отечественного и зарубежного производства / Ю.С. Иванов, В.В. Кашанкова // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация : сб. материалов IX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 65-летию создания первого в Респ. Беларусь науч. подразделения в обл. предупреждения и ликвидации чрезвычайн. ситуаций и пожаров, Минск, 30 сент. 2021 г. / Науч.-исслед. ин-т пожар. безопасности и проблем чрезвычайн. ситуаций МЧС Респ. Беларусь. – С. 141–144.
37. Иванов, Ю.С. Методы численного моделирования при разработке шлема спасателя-пожарного / Ю.С. Иванов, Т.М. Мартыненко, В.В. Кашанкова // Технологии ликвидации чрезвычайных ситуаций: сб. материалов VIII Междунар. заоч. науч.-практ. конф., Минск, 27 мая 2022 г. / Ун-т гражд. защиты МЧС Респ. Беларусь. – Минск: УГЗ, 2022. – С. 75–77.
38. Impact of the development of the design of firefighter helmets on the mechanical shock absorption capacity / A. Walczak, D. Pieniak, P. Lonkwic [et al.] // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2023. – Vol. 17, № 6. – P. 171–184. – DOI: 10.12913/22998624/171753.

**Аналитический обзор исследований основных защитных свойств  
средств индивидуальной защиты головы**

**Analytical review of research on the main protective properties  
of personal head protective equipment**

**Иванов Юрий Сергеевич**

кандидат технических наук

Республиканское унитарное предприятие  
«Белорусский государственный институт  
метрологии», заместитель директора

Адрес: Старовиленский тракт, 93,  
220053, г. Минск, Беларусь

Email: ivanou@belgim.by

SPIN-код: 5895-6967

**Yuriy S. Ivanov**

PhD in Medical Sciences

Republican Unitary Enterprise  
«Belarusian State Institute of Metrology»,  
Deputy Director

Address: Starovilenskiy tract, 93,  
220053, Minsk, Belarus

Email: ivanou@belgim.by

ORCID: 0000-0002-6548-9922

**Кашанкова Вероника Владимировна**

Учреждение «Научно-исследовательский  
институт пожарной безопасности и проблем  
чрезвычайных ситуаций» Министерства  
по чрезвычайным ситуациям Республики  
Беларусь, отдел исследований аварийно-  
спасательной техники и оборудования,  
ведущий научный сотрудник

Адрес: ул. Солтыса, 183а,  
220046, г. Минск, Беларусь

Email: v.nechaeva@list.ru

SPIN-код: 4319-7426

**Veronika V. Kashankova**

Institution «Scientific and Research Institute  
of Fire Safety and Emergency Situations»  
of the Ministry for Emergency Situations  
of the Republic of Belarus, Emergency Rescue  
Technique and Equipment Research Department,  
Leading Researcher

Address: Zhangeldina str., 24,  
010000, Astana, Kazakhstan

Email: v.nechaeva@list.ru

ORCID: 0009-0001-1430-000X

## ANALYTICAL REVIEW OF RESEARCH ON THE MAIN PROTECTIVE PROPERTIES OF PERSONAL HEAD PROTECTIVE EQUIPMENT

Ivanov Yu.S., Kashankova V.V.

*Purpose.* Justification of the level of protective properties and design of the domestic firefighter-rescuer helmet.

*Methods.* Methods of theoretical knowledge: analysis, synthesis, induction and generalization.

*Findings.* An analysis of studies examining the fundamental protective properties of personal protective equipment (PPE) for the head has identified the main hazards associated with head injuries, their critical values, and the factors influencing the strength properties and design of helmet shells. Promising research methods in the design and development of PPE for the head have been identified.

*Application field of research.* Development of modern domestic PPE.

*Keywords:* personal head protection equipment, head injury, helmet/casque, protective properties.

(The date of submitting: September 19, 2025)

## REFERENCES

1. *Accidents at work statistics*. Eurostat: official website of the European Union. URL: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Accidents\\_at\\_work\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Accidents_at_work_statistics) (accessed: September 18, 2025).
2. Campbell R. *Firefighter injuries on the fireground*. National Fire Protection Association (NFPA), August, 2024. 15 p. URL: <https://www.nfpa.org/education-and-research/research/nfpa-research/fire-statistical-reports/patterns-of-firefighter-fireground-injuries> (accessed: September 18, 2025).
3. Rodin V.E. *Nauchno-tehnicheskie osnovy razrabotki sredstv individual'noy zashchity cheloveka ot osnovnykh vidov proizvodstvennogo travmatizma* [Scientific and technical foundations for the development of personal protective equipment for humans against the main types of industrial injuries]: Grand PhD tech. sci. diss.: 05.26.01; Yekaterinburg Scientific Research Institute of Occupational Safety. Yekaterinburg, 1999. 395 p. (rus)
4. Gromov A.P. *Biomekhanika travmy: povrezhdeniya golovy, pozvonochnika i grudnoy kletki* [Biomechanics of injury: injuries to the head, spine and chest]. Moscow: Meditsina, 1979. 271 p. (rus)
5. Gromov A.P., Prudkovskiy B.A., Romodanovskiy O.A., Shcherbin L.A., Petrov V.A., Savostin G.A. Novyy metod izmereniya sily udara v sudebnoy travmatologii [A new method for measuring impact force in forensic traumatology]. *Sudebno-meditsinskaya ekspertiza*, 1971. Vol. 14, No. 2. Pp. 8–10. (rus)
6. Gromov A.P., Antuf'ev I.I., Saltykova O.F., Skrypnik V.G., Boytsov V.M., Bolonkin G.S., Lomasov V.B., Maslov A.V., Veremkovitch N.A., Krasnyh I.G. Issledovanie povrezhdeniy kostey cherepa v eksperimente pri dozirovannykh udarakh [An experimental study of cranial injuries caused by dosed]. *Sudebno-meditsinskaya ekspertiza*, 1967. Vol. 10, No. 3. Pp. 14–20. (rus)
7. von Gierke H.E., Brinkley J.W. Impact accelerations. In *Fundations of space biology and medicine*: joint USA/USSR publication in 3 vol. National Aeronautics and Space Administration of the USA, Academy of Sciences of the USSR; general editors: M. Calvin, O.G. Gazenko. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1975. Vol. 2, book 1: *Ecological and physiological fundations of space biology and medicine*. Pp. 214–246.
8. Industrial protective helmets for electrical workers, class B: ANSI Z89.2-1971 (American National Standard Safety Requirements). Approved April 14, 1971. New York: American National Standards Institute, 1971. 15 p. URL: <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/ansi.z89.2.1971.pdf> (accessed: September 18, 2025).
9. Proctor T.D. A review of research relating to industrial helmet design. *Journal of Occupational Accidents*, 1982. Vol. 3, No. 4. Pp. 259–272. DOI: 10.1016/0376-6349(82)90003-7.
10. Mayer A., Salsi S. Casques de protection pour l'industrie-Bilan des essais. Critères de choix pour l'utilisateur / A. Mayer// Cahiers de notes documentaires – 1977. – Vol. 87, No. 2. – Pp. 159–185. (fra)
11. Scalane A.A. Development of standards for industrial and firefigters head protective devices: final rep. National Technical Reports Library. – URL: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB225163.xhtml#> (accessed: September 18, 2025).
12. Korsakov S.A. *Biomekhanika udarnogo vzaimodeystviya travmiruyushchego predmeta i cheloveka* [Biomechanics of impact interaction between a traumatic object and a person]. *Meditinskaya ekspertiza i parvo*, 2012. No. 3. Pp. 10–12. (rus). EDN: PBUNGJ.

13. Nedugov G.V., Nedugova V.V. Opredelenie i ekspertnaya otsenka sily udara [Determination and expert assessment of impact force]. *Medical Examination Problem*, 2012. Vol. 12, No. 1-2. Pp. 14–17. (rus). EDN: PCLAKB.
14. Trubnikov E.G. Issledovanie i sovershenstvovanie sredstv individual'noy zashchity golovy gornorabochego ot travm [Research and improvement of personal protective equipment for the miner's head from injury]: PhD tech. sci. diss. Synopsis: 03.03.01; Leningrad Mining Institute. Leningrad, 1972. 22 p. (rus)
15. *Tekhnika pozharnaya. Shlem pozharnogo. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy* [Fire-fighting equipment. Firefighter's helmet. General technical requirements and test methods]: GOST 30694-2000. Introduced on September 1, 2002. Minsk: Interstate Council for Standardization, Metrolology, and Certification: Belarusian State Institute of Standardization and Certification, 2002. 48 p. (rus)
16. *Tekhnika pozharnaya. Kaski pozharnye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. Metody ispytaniy* [Fire fighting equipment. Firemen's helmets. General technical requirements. Test methods]: GOST R 53269-2019. Introduced on September 19, 2022. Moscow: Standartinform, 2019. 24 p. (rus)
17. *Helmets for fire fighting in buildings and other structures*: EN 443:2008. Impl. 01.06.2008. Brussels: European Committee for Standardization, 2008. 40 p.
18. *Standard on protective ensembles for structural fire fighting and proximity fire fighting*: NFPA 1971:2018. Impl. 05.12.2012. National Fire Protection Association (NFPA), 2018.
19. Trumel' V.V. *Sovershenstvovanie i razrabotka sredstv individual'noy zashchity golovy dlya rabotnikov gornoj promyshlennosti* [Improvement and development of personal head protection equipment for mining workers]: PhD tech. sci. diss. Synopsis: 05.26.01; Moscow State Mining University. Moscow, 2003. 15 p. (rus)
20. Karavaev A.S., Kopysov S.P. Matematicheskoe modelirovanie udarnogo vozdeystviya na golovu pri cherepno-mozgovykh travmakh [Mathematical modelling of head impact with craniocerebral injury]. *Russian Journal of Biomechanics*, 2018. Vol. 22, No. 2. Pp. 178–195. (rus). DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2018.2.04. EDN: YLXLLV.
21. Agapov P.I., Belotserkovskii O.M., Petrov I.B. Numerical simulation of the consequences of a mechanical action on a human brain under a skull injury. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2006. Vol. 46, No. 9. Pp. 1629–1638. DOI: 10.1134/S0965542506090144. EDN: LKCHIL.
22. Beloshitskiy V.V. Printsy modelirovaniya cherepno-mozgovoy travmy v eksperimente [The principles of experimental traumatic brain injury modelling]. *Ukrainian Neurosurgical Journal*, 2008. No. 4. Pp. 9–15. (rus). DOI: 10.25305/unj.108232. EDN: PXRWVB.
23. Vasyukov A.V., Petrov I.B. Modelirovanie mekhanicheskikh faktorov cherepno-mozgovykh travm setochno-kharakteristicheskim chislennym metodom [Numerical modelling of mechanical factors of cranial-cerebral injury using grid-characteristic method]. *Vestnik Rossiyskogo gosudarstvennogo universiteta im. I. Kanta*, 2010. No. 10. Pp. 42–51. (rus). EDN: MWCBPH.
24. Karavaev A.S., Kopysov S.P. Metod postroeniya nestrukturirovannykh shestigrannnykh setok iz ob"emnykh dannykh [The method of unstructured hexahedral mesh generation from volumetric data]. *Computer Research and Modeling*, 2013. Vol. 5, No. 1. Pp. 11–24. (rus). DOI: 10.20537/2076-7633-2013-5-1-11-24. EDN: QYUQPN.
25. Karavaev A.S., Kopysov S.P. Metod Shvartsa dekompozitsii oblasti v kontaktnykh zadachakh [Schwartz's method of domain decomposition in contact problems]. *Problemy mekhaniki i materialovedeniya* [Problems of mechanics and materials science]: Proc. of the Institute of Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Izhevsk, 2017. Pp. 6–20. (rus). EDN: ZFJJXN.
26. Karavaev A.S., Kopysov S.P., Kuz'min I.M. Postroenie biomekhanicheskikh konechno-elementnykh modeley [Construction of biomechanical finite element models]. *Problemy mekhaniki i materialovedeniya* [Problems of mechanics and materials science]: Proc. of the Institute of Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Izhevsk, 2016. Pp. 7–13. (rus). EDN: WEKXWD.
27. Henn, H-W. Crash tests and the head injury criterion. *Teaching Mathematics and its Applications: An International Journal of the IMA*, 1998. Vol. 17, No. 4. Pp. 162–170. DOI: 10.1093/teamat/17.4.162.
28. Dyatlov M.M. Sistemy opredeleniya stepeni tyazhesti politravmy i kontseptsii khirurgicheskoy pomoshchi pri ney. Chast' 1. Sistemy i kontseptsii, razrabotanneye na Zapade (obzor literatury) [Detection of poly-trauma severity degree and surgical assistance concept Part I. Systems and concepts developed in the West (references review)]. *Health and Ecology Issues*, 2006. No. 2. Pp. 7–17. (rus). DOI: 10.51523/2708-6011.2006-3-2-1. EDN: YUFQQD.
29. Wu J.Z., Pan C.S., Wimer B.M. Evaluation of the shock absorption performance of construction helmets under repeated top impacts. *Engineering Failure Analysis*, 2018. Vol. 96. Pp. 330–339. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.10.015.

30. Caserta G.D., Iannucci L., Galvanetto U. Shock absorption performance of a motorbike helmet with honeycomb reinforced liner. *Composite Structures*, 2011. Vol. 93, No. 11. Pp. 2748–2759. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.05.029.
31. Fangting Xu, Kang Hu. Research on the product design of firefighting helmet based on design scenario. *Proc. of the 2nd International Conference on Management, Education and Social Science (ICMESS 2018)*. In the series «Advances in Social Science, Education and Humanities Research» (vol. 176). Atlantis Press, 2018. Pp. 602–606. DOI: 10.2991/icmess-18.2018.133.
32. Shumay S.M., Voronovich V.V., Astashov S.P., Malashenko S.M., Kashankova V.V. Razrabotka, nauchnoe obosnovanie parametrov i rezul'taty ispytaniy perspektivnoy modeli shlema pozharnogo-spasatelya [Development, scientific substantiation of parameters and test results of a promising model of a firefighter-rescuer helmet]. *Emergency Situations: Prevention and Elimination*, 2018. No. 2 (44). Pp. 113–120. (rus). EDN: MCNEBG.
33. Starovoytov A.A., Malashenko S.M., Kashankova V.V. Razrabotka i vnedrenie v organy i podrazdeleniya MChS Respubliki Belarus' oblegchennoy modeli shlema spasatelya-pozharnogo [Development of a lightweight firefighter helmet model and implementation of it in the departments of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus]. *Emergency Situations: Prevention and Elimination*, 2021. No. 2 (50). Pp. 164–170. (rus). DOI: 10.54422/1994-439X.2021.2-50.164-170. EDN: VGRMED.
34. Shumay S.M., Ivanov Yu.S., Kashankova V.V., Malashenko S.M. Analiz tekhnicheskikh normativnopravovykh aktov, ustanavlivayushchikh trebovaniya k shleemam pozharnogo [Analysis of technical regulations establishing requirements for firefighter helmets]. *Proc. of VII Intern. scientific-practical conf. dedicated to the 60th anniversary of the creation of the first scientific unit in the Republic of Belarus in the field of prevention and liquidation of emergencies and fires «Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya»*, Minsk, November 1, 2016. In 2 parts. Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus. Minsk, 2016. Part 2. Pz. 398–409. (rus)
35. Starovoytov A.A., Malashenko S.M., Kashankova V.V. Razrabotka oblegchennoy modeli shlema spasatelya-pozharnogo [Development of a lightweight model of a rescue firefighter helmet]. *Proc. of IX Intern. scientific-practical conf. dedicated to the 65th anniversary of the creation of the first scientific unit in the Republic of Belarus in the field of prevention and liquidation of emergencies and fires «Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya»*, Minsk, September 30, 2021. Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus. Minsk, 2021. Pp. 175–178.
36. Ivanov Yu.S., Kashankova V.V. Rezul'taty ispytaniy shlemov pozharnogo otechestvennogo i zarubezhnogo proizvodstva [Test results of firefighter helmets of domestic and foreign production]. *Proc. of IX Intern. scientific-practical conf. dedicated to the 65th anniversary of the creation of the first scientific unit in the Republic of Belarus in the field of prevention and liquidation of emergencies and fires «Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya»*, Minsk, September 30, 2021. Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus. Minsk, 2021. Pp. 141–144.
37. Ivanov Yu.S., Martynenko T.M., Kashankova V.V. Metody chislennogo modelirovaniya pri razrabotke shlema spasatelya-pozharnogo [Numerical modeling methods in the development of a rescue firefighter helmet]. *Proc. of VIII Intern. correspondence scientific-practical conf. «Tekhnologii likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy»*, Minsk, May 27, 2022. Minsk: University of Civil Protection, 2022. Pp. 75–77.
38. Walczak A., Pieniak D., Lonkwić P., Kupicz W., Ptak S., Piątek P., Wąsik W., Renkas A. Impact of the development of the design of firefighter helmets on the mechanical shock absorption capacity. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2023. Vol. 17, No. 6. Pp. 171–184. DOI: 10.12913/22998624/171753.

Copyright © 2025 Ivanov Yu.S., Kashankova V.V.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.