

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШАХТЕРСКИХ КАСОК ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ УДАРЕ

*В. Д. Воробьев, докт. техн. наук (ННИИОТ), О. И. Кашуба, докт. техн. наук,
А. Ф. Долженков, канд. мед. наук (МакНИИ)*

Проведено дослідження впливу ударних навантажень на голову гірника, який працює на шарах великої потужності, і встановлена пряма залежність ступеня її ушкодження від величини діючої енергії. Розроблено теоретичні підходи до розв'язання питання, які дозволять підвищити рівень захисту голови шахтарів від травм, що можуть бути спричинені механічними впливами, і провести оцінку ефективності захисту шахтарських касок, які застосовуються у вугільній промисловості.

Основной причиной, приводящей к травме головы и сотрясению головного мозга шахтера, работающего в угольной шахте, является удар от падающих предметов, удар о выступающие части машин и механизмов и другие причины. К сожалению, удар как фактор опасности существующей нормативно-технической документацией не рассматривается. Фактически опасный производственный фактор, который приводит к механическому повреждению, подменяется понятием материальных причин травмы, что невозможно выразить как параметр. Поэтому мы считаем, что рассмотрение удара как фактора позволит количественно выразить механическое влияние, более четко охарактеризовать свойства защитной каски и установить их зависимость от величины этого фактора. Таким образом, мы рассматриваем удар как фактор, к проявлению которого приводят разные материальные причины травмы.

При рассмотрении ударных воздействий необходимо, прежде всего, раскрыть условия взаимодействия материальных тел с организмом человека, поскольку с ним связаны основные физические характеристики, используемые при обосновании параметров защиты. При разработке конструкции каски возникает задача установления зависимости степени повреждения от величины действующей энергии, решение которой позволит прогнозировать необходимый уровень защиты и произвести оценку его эффективности.

Среди многочисленных требований, предъявляемых к защитным шахтерским каскам, наиболее важными являются механическая прочность и способность перераспределять и поглощать энергию удара. Эти свойства в значительной степени определяют способность каски исключить травмирующее воздействие опасного фактора или снизить уровень этого воздействия.

В то же время перечисленные показатели защитной способности каски зависят от формы корпуса, толщины стенок, характера расположения ребер жесткости и материалов, из которых изготовлена внутренняя оснастка. Следовательно, при проектировании важно заранее знать, какой материал следует выбрать для изготовления корпуса по известной, уже заданной форме

(случай копирования образца) или какую форму необходимо придать корпусу, исходя из известного, уже выбранного материала. Разработанный с этой целью метод исследования физико-механических свойств материалов основан на следующем рассуждении. Если выразить кинетическую энергию падающего груза и остаточную энергию после соударения через потенциальную при соответствующих неизвестных положениях груза (до падения и при отскоке), то коэффициент остаточной энергии

$$p = \frac{W_1}{W} = \frac{Ph}{PH} = \frac{h}{H},$$

где H – высота сброса груза; h – высота отскока груза после удара.

Это выражение не зависит от потери энергии.

Для описания динамических процессов составлена эквивалентная схема, которая в механическом выражении моделирует поведение каски в момент соударения (при условии нагружения каски или ее составных частей). Для простоты приняты следующие допущения:

каска и падающий груз в период между встречами с поверхностью корпуса каски и отскоком совершает совместное колебательное движение как жесткая масса;

все упругие части каски объединены в одно упругое звено, жесткость которого обратно пропорциональна прогибу. Остаточная деформация не учитывается.

В общем виде свободное колебательное движение описывается выражением $mx'' = -Cx - kx'$ являющееся линейным дифференциальным уравнением второго порядка. Отсюда

$$mx'' + kx' + Cx = 0.$$

Здесь член mx'' показывает приложенные усилия в системе каска–падающий груз, член kx' выражает усилия, затраченные на деформацию каски и член Cx – усилие, вызванное упругими деформациями. Это дифференциальное уравнение решено методом характеристического уравнения с заменой производных соответствующими степенями.

$$mz^2 + kz + C = 0.$$

Тогда корни характеристического уравнения

$$z_{1,2} = \frac{-k \pm \sqrt{k^2 - 4mC}}{2m} = -\frac{k}{2m} \pm i\sqrt{\frac{C}{m} - p^2}.$$

Обозначим

$$\frac{k}{2m} = p a \sqrt{\frac{C}{m} - p^2} = \frac{2\pi}{T}.$$

Решение дифференциального уравнения получаем по формуле

$$x = C_1 e^{\alpha_1 t} + C_2 e^{\alpha_2 t}$$

$$x = C_1 e^{-pt} e^{i\omega t} + C_2 e^{-pt} e^{-i\omega t} = e^{-pt} (C_1 i\omega e^{i\omega t} - C_2 i\omega e^{-i\omega t});$$

$$x'(0) = -p(C_1 + C_2) + i\omega(C_1 - C_2) = V_0;$$

$$C_1 + C_2 = 0;$$

$$C_1 - C_2 = \frac{V_0}{i\omega};$$

$$C_1 = \frac{V_0}{2i\omega}; \quad C_2 = -\frac{V_0}{2i\omega}.$$

Подставляем полученные коэффициенты:

$$x = e^{-pt} \frac{V_0}{2i\omega} (e^{i\omega t} - e^{-i\omega t}),$$

по известным формулам разлагаем коэффициенты:

$$e^{i\omega t} = \cos\omega t + i\sin\omega t;$$

$$e^{-i\omega t} = \cos\omega t - i\sin\omega t;$$

$$2i\sin\omega t;$$

$$x = e^{-pt} \frac{V_0}{\omega} \sin\omega t.$$

Для того чтобы охарактеризовать колебания известными параметрами – фазой и периодом колебаний, введем следующие обозначения:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}; \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{\omega}{p}; \quad t = \frac{T}{2}; \quad \omega t = \frac{2\pi}{T} t.$$

Тогда

$$x = \frac{V_0 T}{2\pi} e^{-pt} \sin \frac{2\pi}{T} t. \quad (1)$$

Найдем скорость начала отскока груза. Это происходит в момент времени $t = \frac{T}{2}$. Дифференцируем выражение (1)

$$\frac{dx}{dt} = V = \frac{V_0}{\omega} (-pe^{-pt} \sin\omega t + \omega \cos\omega t e^{-pt})$$

в момент $t = \frac{T}{2}$ $\sin\omega t = 0$ $\cos\omega t = 1$.

Тогда
$$V\left(\frac{T}{2}\right) = \frac{V_0}{\omega} \omega e^{-pt}$$

или
$$V\left(\frac{T}{2}\right) = V_0 e^{-p\frac{T}{2}}.$$

С другой стороны, эти же скорости можно выразить по формулам, основанным на сохранении количества энергии в момент встречи и при отскоке, а также на законе свободного падения:

$$G\sqrt{2gH} = (G + G_0)V_0;$$

$$(G + G_0)V_1 = G\sqrt{2gh},$$

где G – масса падающего груза; G_0 – масса каски; H – полная высота падения груза; h – высота отскока груза; g – ускорение свободного падения.

Для расчета величины поглощения энергии и жесткости использована продолжительность прогиба $\tau_n = \frac{T}{2}$ и продолжительность отскока и падения

$$\tau_0 = \sqrt{\frac{2h}{g}}, \quad \frac{\tau_n}{\tau_0} = \frac{T}{\sqrt{\frac{2h}{g}}}, \quad T = 2\tau_n.$$

Из уравнения $V\left(\frac{T}{2}\right) = V_0 e^{-p\frac{T}{2}}$ получим значение p :

$$\ln \frac{V}{V_0} = -p\frac{T}{2} \ln e; \quad p = \frac{\ln V_0/V}{\frac{T}{2}} = \frac{\ln \frac{V_0}{V}}{\frac{T}{2}} = \frac{\ln \frac{H}{h} \tau_0}{2\tau_n \sqrt{\frac{2h}{g}}}.$$

Масса и ускорение свободного падения

$$m = \frac{G + G_0}{g}.$$

Поглощенная энергия определится из уравнения

$$\frac{k}{2m} = p, \quad k = 2mp = \frac{2(G + G_0)}{g} \cdot \frac{\ln \frac{H}{h} \tau_0}{2\tau_n \sqrt{\frac{2h}{g}}}.$$

После преобразований получим:

$$k = (G + G_0) \frac{\tau_0}{\tau_n} \frac{\ln \frac{H}{h}}{\sqrt{8gh}},$$

а жесткость из уравнения:

$$\sqrt{\frac{C}{m} - p^2} = \omega = \frac{2\pi}{T}, \quad C = m \left(\frac{4\pi^2}{T^2} + p^2 \right) = \frac{G + G_0}{g} \left[\frac{4\pi^2}{T^2} + \left(\frac{\ln \frac{H}{h}}{2\tau_n \sqrt{\frac{2h}{g}}} \right)^2 \right].$$

После преобразования получим расчетную формулу жесткости

$$C = (G + G_0) \frac{\pi^2 \tau_0^2}{8h\tau_n^2} \left[1 + \left(\frac{\ln \frac{H}{h}}{2\pi} \right)^2 \right].$$

Полученные из решения дифференциального уравнения формулы позволят рассчитать жесткость C и поглощение энергии удара k , если будут измерены следующие параметры соударения системы каска–падающий груз: высота падения груза, высота отскока h , продолжительность падения τ_n и продолжительность отскока τ_0 .

Задача получения данных для расчета поглощения удара k и жесткости C сводится к практическому определению значений величин вышеперечисленных параметров соударения.

Жесткость, поглощение энергии удара и усилие, передаваемое каской на голову, является суммирующим результатом взаимодействия основных звеньев каски – корпуса, подвески и внутренней оснастки. Поэтому определение этих характеристик необходимо не только для каски в целом, но и для отдельных ее звеньев. В связи с трудностями в определении этих величин отдельно для внутренней оснастки и подвески, они приняты за одно упругое звено и впредь считается, что их значения выражаются как разность соответствующих показателей каски в сборе и отдельно корпуса. Условимся впредь поглощение энергии и жесткость конструкции называть упругими характеристиками каски. Выбор образцов для исследований определен поставленными задачами.

Для обоснования требований к качеству защиты от удара нами были рассмотрены основные свойства шахтерских касок разных производителей, характеризующие степень защиты головы работающего: механическую прочность, амортизацию энергии удара и стойкость к действию острых падающих предметов. В качестве критерия повреждения при обосновании предельно допустимой силы удара по голове брался «относительно безопасный порог по сотрясению головного мозга», являющийся нарушением функции для организма человека.

Вертикальный удар по каске возможен в том случае, когда горнорабочий работает в позах: стоя, выпрямившись, сидя за пультом управления горной техники, стоя на коленях выпрямившись. Проходчик в этих позах работает соответственно 34,7%, 17,9% и 4,9% – 57,5% всего рабочего времени, электрослесарь – 20%, 0%, 0%, машинист электровоза – 12%, 69,5% и 0% (81,5%), доставщик-такелажник 25,2%, 0%, 10,3% (35,5%). Амортизация (A) и переданная на макет головы энергия вертикального удара ($E_{\text{пер}}$) для касок различных производителей, в зависимости от действующей энергии (E_0) изменяется следующим образом:

при $E_0 = 0,5$ Дж $E_{\text{пер}}$ будет составлять 0,04...0,03 Дж, $A = 90,9 \dots 93,2\%$;

при $E_0 = 20$ Дж $E_{\text{пер}} = 4,5 \dots 10,0$ Дж, $A = 77,5 \dots 50,0\%$;

при $E_0 = 40$ Дж $E_{\text{пер}} = 11,0 \dots 15,0$ Дж, $A = 72,5 \dots 62,5\%$;

при $E_0 = 60$ Дж $E_{\text{пер}} = 7,5 \dots 21,0$ Дж, $A = 87,5 \dots 65,0\%$;

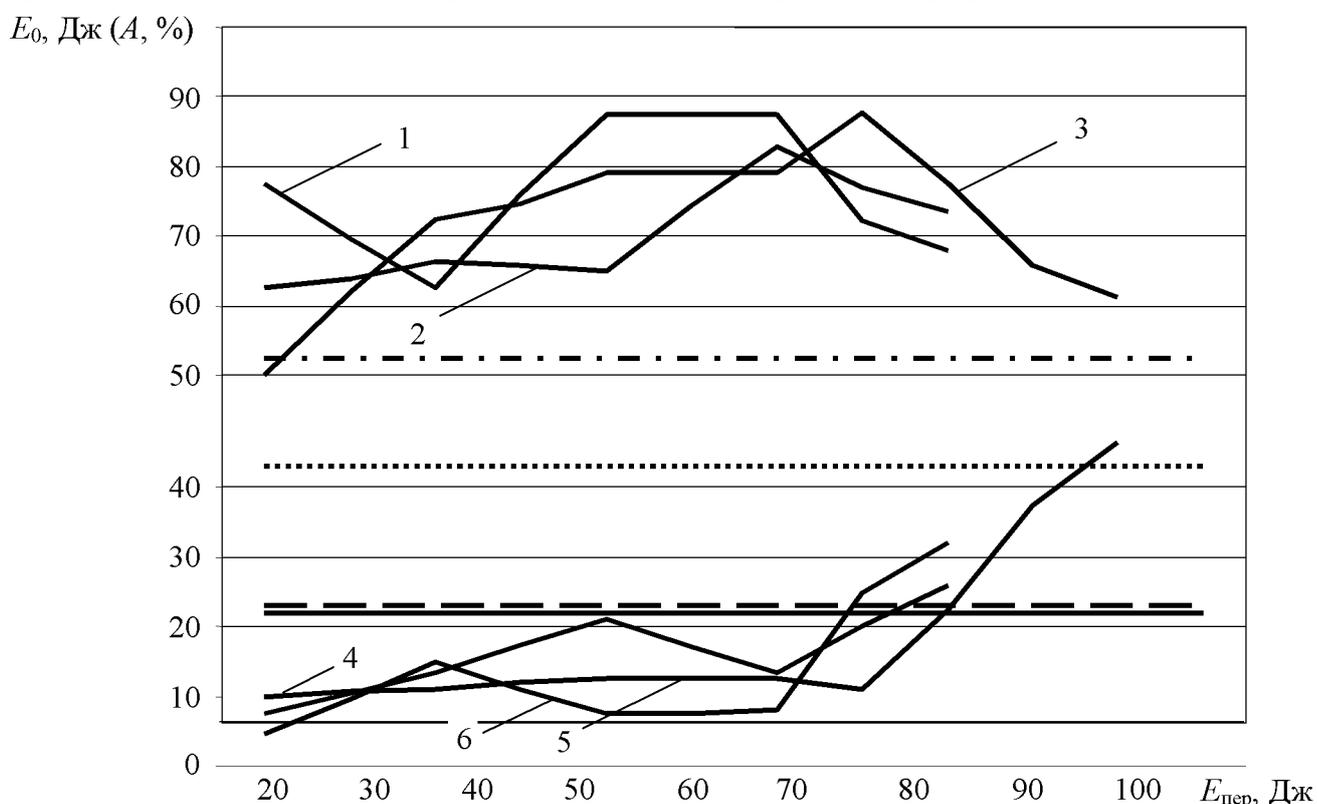
при $E_0 = 80$ Дж $E_{\text{пер}} = 8,0 \dots 13,5$ Дж, $A = 87,5 \dots 83,0\%$;

при $E_0 = 90$ Дж $E_{\text{пер}} = 11,0 \dots 25,0$ Дж, $A = 87,7 \dots 72,2\%$;

при $E_0 = 100$ Дж $E_{\text{пер}} = 22,5 \dots 21,0$ Дж, $A = 87,5 \dots 32,0\%$.

В основу выбора касок были положены конструктивные различия в корпусах (с 1, 3, и 5 ребрами жесткости) и внутренней оснастке, выполненной из полиэтилена высокого давления или текстильной ленты.

Как видно из графика зависимостей переданных энергий от действующих (рисунок), при испытаниях различных конструкций касок наблюдалась следующая закономерность – при $E_0 = 20 \dots 40$ Дж для каски «ШЗ-1» и $20 \dots 60$ Дж для каски «Шахтер-1» происходит быстрое нарастание $E_{\text{пер}}$ за счет растяжения подвесок внутренних оснасток и прогиба корпуса.



Зависимость переданной энергии от энергии удара для шахтерских касок различных конструкций: 1 – каска ШЗ-1; 2 – «Шахтер-1»; 3 – каска ЗКЗП; — B; — — C; D; - . A; 4 – каска ЗКЗП; 5 – «Шахтер-1»; 6 – каска ШЗ-1

Нами были проведены испытания с целью определить распределение амортизации между корпусом каски и подвесками внутренней оснастки. Было установлено, что в различных конструкциях касок поглощение энергии ударных нагрузок в 60,5...74,1% происходит за счет деформации корпуса, 25,9–38% – за счет растяжения деталей подвесок. Поэтому у касок «ШЗ-1» уже при $E_0 = 60...80$ Дж произошло разрушение центрального ребра жесткости корпуса каски. Это привело к тому, что величина переданной энергии снизилась в 1,9...2,0 раза, а амортизация возросла в 1,4. У касок «Шахтер-1» при $E_0 = 80$ Дж произошло разрушение двух передних подвесок внутренних оснасток касок, вследствие чего величина переданной энергии снизилась в 1,6 раза, а амортизация возросла в 1,3. Такое улучшение защитных свойств касок объясняется поглощением конструкцией действующей энергии вследствие разрушения элементов корпуса каски у «ШЗ-1» и элементов внутренней оснастки у каски «Шахтер-1». Известен случай, когда удар куском породы весом в 10 кг, упавшим с высоты 1,2...1,5 м, при $E_0 = 118...147$ Дж, разрушил каску, но не нанес повреждений голове.

При $E_0 \geq 90$ Дж в месте приложения удара происходит касание корпуса каски макета головы, и $E_{пер}$ достигает уровня энергии, при которой происходит сотрясение головного мозга.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что защитные функции изученных нами касок «ШЗ-1» и «Шахтер-1» различаются в основном за счет конструктивных особенностей корпуса каски и внутренней оснастки, поскольку для их изготовления использовался полиэтилен высокого и низкого давления одинаковых марок. Низкие защитные свойства каски «ШЗ-1» объясняются недостаточной жесткостью купольной части корпуса с одним центральным ребром жесткости, что приводит к его разрушению при $E_0 = 80$ Дж. Разрушение каски «Шахтер-1» при $E_0 = 80$ было вызвано неравномерным распределением энергии удара на лучи амортизатора, следствием чего явилось разрушение передних подвесок.

У разработанной нами каски «ЗКЗП» колебания уровней $E_{пер}$ (10,0...12,5 Дж) являются незначительными по сравнению с предыдущими касками в диапазоне $E_0 = 20...90$ Дж, и только при энергиях выше 90 Дж они возрастают, достигая при энергии 100 Дж уровней, при которых происходит сотрясение головного мозга за счет касания корпуса каски макета головы, но без разрушения конструкции каски. Столь высокие защитные свойства касок «ЗКЗП» в широком диапазоне энергий удара объясняются тремя причинами: равномерным распределением энергии удара на все имеющиеся лучи амортизатора каски; применением во внутренней оснастке в качестве лучей амортизатора амортизирующих лент, обладающих более высокими (по сравнению с полиэтиленом) способностями к поглощению кинетической энергии, что увеличивает долю внутренней оснастки в поглощении энергии

ударной нагрузки, и распределением оптимальных толщин корпуса каски в области максимального удара.

Таким образом, применяемые в угольной промышленности каски защищают в основном при вертикальном ударе от $E_0 \leq 80$ Дж, что регламентировано существующими стандартами [7–9]. В то же время установлено, что конструкции таких касок, как: «ЗКЗП» (Украина), «Универсал» (Украина), «V-Gard» компании «MSA AUER GmbH» (Германия) и «Husqvarna» компании «Husqvarna AB» (Швеция) достигают уровня защиты в 90 Дж. Как показали экспериментальные исследования, энергии 100 Дж и выше приводят к касанию корпуса каски макета головы. Энергия $E_{пер}$ и в этом случае равна энергии, приводящей к сотрясению головного мозга. Добиться дальнейшего снижения $E_{пер}$ за счет улучшения конструкции каски невозможно из-за физико-механических свойств полиэтилена. При возрастании энергий удара до 120...130 Дж $E_{пер}$ достигает энергий, при которых происходят переломы костей черепа (45...52,5 Дж), а при 140...180 Дж разрушаются каски всех без исключения конструкций.

Травмы головы шахтера, работающего на пластах пологого и крутого падения, в указанных группах существенно различаются. Травматизм на пластах крутого падения несколько выше, чем пологого, что объясняется значительной высотой падения травмирующего предмета. Травмирование рабочих очистных забоев на крутых пластах составляет 76,1%, в то время как на пологих эта цифра равна 53,7%.

Анализ травм головы по видам работы за три года показал, что наибольшее их количество приходится на работы, связанные с добычей угля – 49% на пологих и 62% – на крутых пластах. Травмы при проведении проходческих работ – 9...18% (таблица).

Анализ травм головы по видам работ на шахтах с пологим и крутым залеганием пластов

Шахты	Выполняемые работы	Количество случаев	%
С пологим залеганием пластов	Добычные	106	49,5
	Проходческие	40	18,7
	Ремонтные	20	9,3
	Доставка материалов	1	0,5
	Прочие работы	47	22,0
	Всего	214	100,0
С крутым залеганием пластов	Добычные	157	62,0
	Проходческие	23	9,1
	Ремонтные	22	8,7
	Доставка материалов	28	11,1
	Прочие работы	23	9,1
	Всего	253	100,0

Рассмотренные нами зависимости распространяются на травмирующие объекты, имеющие гладкую поверхность, так как удар при испытаниях

проводился полусферой. В то же время куски породы и угля имеют острые грани, машины – выступающие части элементов конструкций и т. д., что резко сокращает площадь приложения действующей энергии. В таких случаях наиболее показательным является метод испытания перфорирующим конусом. Как показали лабораторные испытания, применяемые в угольной промышленности каски защищают в основном от удара острым предметом с $E_0 \leq 30$ Дж, что регламентировано стандартами.

Испытания различных конструкций касок показал, что для многих из них этот предел выше. Установлено, что касание конуса макета головы «ШЗ-1» при испытании корпуса каски (2,0 мм) наступает при $E_0 = 40$ Дж, центрального ребра жесткости $E_0 = 50$ Дж. Корпус и боковые ребра жесткости касок «Шахтер-1» и «ЗКЗП» пробиваются энергией $E_0 = 50$ Дж.

1. Громов А. П. Моделирование в судебной травматологии // Моделирование повреждений головы, грудной клетки и позвоночника. – М., 1972. – С. 5–14.
2. Фон-Гирке Х. Е., Бринкли Дж. В. Ударные ускорения // Основы космической биологии и медицины. – М.: Наука, 1985. – Т. 2. – С. 232–264.
3. Сабуренко Ю. Ф., Сабуренко В. Ф. К вопросу о механизме черепно-мозговой травмы ударом // Вопросы нейрохирургии. – 1969. – № 5. – С. 11–12.
4. Крюков В. Н. Механика и морфология переломов. – М.: Медицина, 1986. – С. 158.
5. Сундуков В. А., Дудинь Н. И., Скворцов А. А. К характеристике некоторых повреждений мягких тканей и костей черепа в эксперименте // Моделирование повреждений головы, грудной клетки и позвоночника. – М., 1972. – С. 88–91.
6. Маслов А. М., Сонин А. А. Определение параметров физического воздействия при падении тяжести на голову // Судебно-медицинские аспекты моделирования биомеханики повреждений. – М., 1988. – С. 99–101.
7. ГОСТ 12.4.091-80. ССБТ. Каски шахтерские пластмассовые. Общие технические условия.
8. ГОСТ 12.4.128-83. ССБТ. Каски защитные. Общие технические условия.
9. ДСТУ EN 397-2001. Каски захисні промислові.