Чернышов Е. А., Романов И. Д., Романов А. Д., Горбатов Р. О.

E. A. Chernyshov, I. D. Romanov, A. D. Romanov, R. O. Gorbатов

**СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ТЯЖЕСТИ ПОВРЕЖДЕНИЙ
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ МИННО-ВЗРЫВНЫХ ТРАВМ**

**MODERN APPROACHES TO GRAVITY ASSESSMENT OF DAMAGES WHEN MODELING
MINE AND EXPLOSIVE INJURIES**

Чернышов Евгений Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры теплофизики, автоматизации и экологии печей Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева (Россия, Нижний Новгород); тел.: + 7 (831) 436-03-02. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Mr. Evgeny A. Chernyshov – Doctor of Engineering, Professor of the Department of thermal physics, automation and ecology of furnaces Nizhny Novgorod state technical university named after R.E. Alekseev (Russia, Nizhny Novgorod); tel.: + 7 (831) 436-03-02. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Романов Иван Дмитриевич – инженер Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева (Россия, Нижний Новгород); тел.: + 7 (831) 436-03-02. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Mr. Ivan D. Romanov – engineer at Nizhny Novgorod state technical University named after R. E. Alekseev (Russia, Nizhny Novgorod); tel.: + 7 (831) 436-03-02. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Романов Алексей Дмитриевич – инженер Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева (Россия, Нижний Новгород); тел.: + 7 (831) 436-03-02. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Alexey D. Romanov – engineer at Nizhny Novgorod state technical University named after R. E. Alekseev (Russia, Nizhny Novgorod); tel.: + 7 (831) 436-03-02. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Горбатов Роман Олегович – врач – травматолог-ортопед, руководитель лаборатории аддитивных технологий Приволжского исследовательского медицинского университета Минздрава России (Россия, Нижний Новгород); тел.: + 7 (831) 436-03-02. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Mr. Roman O. Gorbатов – the doctor – the traumatologist-the orthopedist, head of the laboratory of additive technologies of the Volga research medical University of the Ministry of health of Russia (Russia, Nizhny Novgorod); tel.: + 7 (831) 436-03-02. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Аннотация. Особенностью современного общевойскового боя является широкое применение бронетехники. Однако в последнее время военные действия в конфликтах низкой интенсивности всё чаще носят партизанский характер, отличающийся широким применением мин и самодельных взрывных устройств. Особенностью минно-взрывных повреждений является то, что, не имея прямых аналогов среди традиционных механических повреждений, они представляют собой сложный, специфический вид политравмы, характеризующийся одновременным воздействием на пострадавшего совокупности механических и в ряде случаев термических и химических поражающих факторов. В настоящее время наиболее полно разработаны критерии для оценки повреждений, получаемых водителем и пассажирами при столкновении автомобиля. Критерии входят в регламенты по безопасности многих стран и используются во всём мире. Для расчётного определения тяжести повреждений экипажа при подрыве техники оценки наибольшее распространение получил программный комплекс LS DYNA. Однако расчётные модели в ряде случаев некорректно оценивают возможные последствия для организма человека, в частности повреждения внутренних органов, головного мозга, нижних конечностей. В статье приведена информация о различных методиках оценки повреждений, получаемых экипажем техники при подрывах на минах. Особое внимание уделено повреждениям нижних конечностей, получаемым при подрывах без пробития брони.

Summary. The peculiar feature of modern general fight is the broad application of armored vehicles. However, military operations in the conflicts of low intensity are of the guerrilla character with wide use of mines and improvised explosive devices. Explosive damages and mines represent the complicated and specific type of a polyinjury that is characterized by simultaneous impact on the victim of set of mechanical and in some cases thermal and chemical striking factors. Explosive damages and mines do not have direct substitutes among traditional mechanical damages. Nowadays criteria for assessment of the injuries received by the driver and passengers at car collision

are most fully developed. Criteria are included into safety regulations of many countries and are used around the world. To assess damages of crew when blasting the equipment LS DYNA program complex is widely applicable. However, calculating models in some cases do not correctly evaluate possible effects for a human body, in particular an internal injury, brain, the lower limbs. The authors provide information on different techniques of damage assessment sustained by crew when blasting on mines. Special attention is paid to injuries of the lower limbs received when blasting without armor destruction.

Ключевые слова: экипаж, техника, мина, взрыв, повреждение нижних конечностей.

Key words: crew, equipment, mine, explosion, damage of the lower limbs.

УДК 314

Особенностью современного общевойскового боя является широкое применение бронетехники. Однако в последнее время военные действия в конфликтах низкой интенсивности всё чаще носят партизанский характер, отличающийся широким применением мин и самодельных взрывных устройств (СВУ). Поэтому в ряде случаев широкое распространение получили защищённые от мин автомобили (Mine Resistant Ambush Protected). При этом для оценки потерь в различных странах используются различные методики, например, в [1-3] видно значительное расхождение данных о ранениях в разных источниках, в том числе в разные периоды одного конфликта. Кроме того, в разные фазы одного конфликта может значительно отличаться характер ранений. Например, в ходе наступательной фазы операции «Иракская свобода 1» чаще наблюдались ранения от стрелкового оружия, тогда как в оккупационную фазу преобладали осколочные ранения вследствие применения самодельных взрывных устройств. В целом во время операции в Ираке 2003 г. величина санитарных потерь Вооружённых сил США, пострадавших от минно-взрывных повреждений, составляла 31 % [4]. Распределение средств поражения американских войск в Афганистане и Ираке по частоте применения и пробивающей способности показано в работе [5]. Аналогичная ситуация складывалась и в отечественной практике, так в отдельные периоды вооружённых конфликтов на Северном Кавказе (1994–1997, 1999–2002) частота минно-взрывной травмы достигала 76 %, однако в целом в период первой кампании составила 28 %, второй кампании – 35 %. В работе [6] показана структура санитарных потерь хирургического профиля по локализации применительно к СССР/РФ. В целом в военных конфликтах низкой интенсивности второй половины XX – начала XXI в. ранения и травмы, имеющие взрывную этиологию, составляют значительную часть в структуре боевых санитарных потерь.

В статье [7] приведена информация по изменению боевых повреждений бронетанковой техники по годам боевых действий. Применительно к подрывам техники имеют место две тенденции: во-первых, санитарные потери при взрывах значительно превышают безвозвратные; во-вторых, среди минно-взрывных повреждений преобладают тяжёлые и крайне тяжёлые политравмы и комбинированные поражения, для которых характерны длительные сроки лечения, которые нередко заканчиваются инвалидностью.

Особенностью минно-взрывных повреждений является то, что, не имея прямых аналогов среди традиционных механических повреждений, они представляют собой сложный, специфический вид политравмы, характеризующийся одновременным воздействием на пострадавшего совокупности механических и в ряде случаев термических и химических поражающих факторов.

В настоящее время наиболее полно разработаны критерии для оценки повреждений, получаемых водителем и пассажирами при столкновении автомобиля. Критерии входят в регламенты по безопасности многих стран и используются во всём мире.

Основным критерием для оценки опасности получаемых человеком травм при подрыве техники было выбрано ускорение, действующее на голову манекена. Такой выбор обусловлен тем, что именно чрезмерные ускорения, действующие на головной мозг человека, приводят к тяжёлым последствиям, вплоть до летального исхода. На основе функции ускорения головы человека в зависимости от времени построен широко используемый в настоящее время в автомобильной про-

мышленности критерий НИС (Head Injury Criteria – критерий тяжести повреждений головы). По этому критерию оценивается пассивная безопасность автомобиля при столкновениях.

Однако применение этих критериев для оценки травм, получаемых экипажем техники при подрыве, является ограниченно обоснованным, так как процессы столкновения и подрыва автомобиля сильно отличаются в первую очередь скоростью нарастания перегрузок. Применительно к стандартам STANAG 4569 оговаривается только стойкость к подрывам, в то время как в AEP-55, Volume 2 (Edition 2) указаны способ определения и критерии оценки травмы. В табл. 1 приведены допустимые пределы нагрузок / Injury Assessment Reference Values for Hybrid III ATD with MIL-Lx; в табл. 2 приведена расшифровка AIS-code.

Таблица 1

Допустимые пределы нагрузок

Body region	Criterion	IARV	Pass/fail level
Head	Head Injury Criterion	HIC15	250
Neck	Axial compression force Axial tension force Shear force Bending moment (flexion) Bending moment (extension)	F_z - F_z + F_x + / F_y + Mocy + Mocy -	4.0 kN - 0 ms / 1.1 kN > 30 ms 3.3 kN @ 0 ms / 2.8 kN @ 35 ms / 1.1 kN > 45 ms 3.1 kN @ 0 ms / 1.5 kN @ 25-35 ms / 1.1 kN > 45 ms 190 Nm 77 Nm
Thorax	Thoracic Compression Criterion Viscous Criterion	TCCfrontal VCfrontal	30 mm 0.70 m/s
Spine	Dynamic Response Index	DRIz	17.7
Femur	Axial compression force	F_z -	6.9 kN
Tibia*	Axial compression force	F_z -	2.6 kN (Mil-LX, upper load cell) 5.4 kN (HIII, lower load cell)

Таблица 2

AIS-code

AIS-code	Степень травмы	Пример
1	Незначительная / Minor	Поверхностная рана / superficial laceration Перелом пальца ноги
2	Умеренная / Moderate	Перелом грудины / fractured sternum Перелом большеберцовой кости / tibia fracture (simple)
3	Серьёзная / Serious	Открытый перелом плечевой кости / open fracture of humerus Перелом большеберцовой кости / tibia fracture (complex)
4	Тяжёлая / Severe	Перфорирование трахеи / perforated trachea Amputation (above knee) ампутация (выше колена)
5	Критическая / Critical	Разрыв печени с потерей ткани / ruptured liver with tissue loss Pelvis crush (open) перелом таза
6	Максимальная / Maximum	Полный разрыв аорты / total severance of aorta

На рис. 1 и 2 приведены кривые определения вероятности повреждения в зависимости от различных НИС15 и F_z . На рис 4 показан пример оценки вероятности получения травмы разного уровня при одной нагрузке $F_z = 8$ кН.

Рис. 1. HIC injury risk curve
Вероятность получения травмы
в зависимости от HIC15

Рис. 2. Injury Risk
Вероятность получения травмы
в зависимости от F_z

Кроме того, в ряде стран, имеющих большой опыт борьбы с минами, внедряют собственные стандарты [18], как, например, в ЮАР, имеющей значительный практический опыт противоминной борьбы (RSA-MIL-std-37).

Работа [8] посвящена проблеме оценки травмобезопасности головы человека при ударе, вследствие которого может возникнуть черепно-мозговая травма. Отмечено, что методика подсчёта критерия HIC построена без учёта биомеханической структуры головы человека как многокомпонентной вязкоупругой системы и не соответствует общепринятым в механике и биомеханике методикам анализа задач подобного рода.

Известно, что при аварийном приземлении вертолётов и самолётов на экипаж действуют большие вертикальные перегрузки (18...30 g) при относительно малом времени действия (до 71 мс) [8], которые приводят к травмам экипажа. Одной из самых уязвимых частей тела при вертикальных перегрузках является позвоночник. Для предотвращения подобных травм были разработаны энергопоглощающие кресла, которые за счёт деформации энергопоглощающих элементов и, соответственно, просадки кресла, рассеивают энергию удара, тем самым снижая перегрузки. Подобные перегрузки действуют и при подрыве техники на mine, однако с большей амплитудой и меньшим временем действия (порядка 1...5 мс). Корпус техники при подрыве практически мгновенно приобретает вертикальную скорость и без соответствующей защиты экипаж получает серьёзные травмы позвоночника.

Ряд работ посвящён практическим экспериментам. Так, в работе [10] представлены результаты практических испытаний основных повреждающих факторов. В рамках исследования проведены испытания бронированной машины разминирования БМР-ЗМА. В качестве экспериментальной модели использовались свиньи и кролики. В работе [4] указано, что особенностью минновзрывных повреждений, полученных при подрыве бронетехники вне зависимости от факта её пробития или непробития, является то, что данные повреждения невозможно однозначно отнести к дистантным или контактными. Основным фактором, вызывающим повреждения у экипажа при подрыве бронетехники при условии её непробития, являются вертикальные ударные ускорения, порог летальности которых составляет 10 g при экспозиции 2,0 мс и более, порог травмобезопасности – 4 g при экспозиции менее 2,0 мс.

Для решения задачи сохранения жизни и уменьшения потенциального вреда здоровью при подрыве техники на mine применяют различные конструктивные мероприятия: увеличение клиренса бронеавтомобиля, использование V-образного днища, применение защитных экранов, использование пористых энергопоглощающих материалов, крепление сидений к крыше или бортам бронеавтомобиля, а также использование сидений энергопоглощающей конструкции [11].

В работе [12] дан обзор энергопоглощающих кресел, применяемых в автобронетанковой и авиационной технике начиная с 60-х гг. XX в. и до наших дней. Представлены различные виды

энергопоглощающих элементов, которые используются в креслах. Рассмотрена возможность применения вертолётных кресел для защиты экипажа автобронетанковой техники при подрыве на mine. Современные энергопоглощающие системы, самостоятельно настраивающиеся под вес пассажира и регулирующие силу срабатывания кресла экипажа, имеют значительную стоимость. Это ограничивает их массовое использование для автобронетанковой техники.

В работе [13] приведена сравнительная оценка влияния способов закрепления сидений в корпусе техники на безопасность экипажа при минном подрыве. Сравнительная оценка проводилась для двух способов крепления сидений в бронекорпусе. Первый способ предполагал крепление сидения к борту корпуса, второй – к крыше корпуса. Расчёт осуществлялся на конечно-элементных моделях в программном комплексе LS-DYNA.

В статьях [14; 15] описано математическое моделирование подрыва high-mobility multi-purpose wheeled vehicle – процесс подрыва смоделирован и фактически осуществлён подрыв техники на основе LS-DYNA. При этом показано, что при подрыве техники на минах на экипаж действуют значительные перегрузки, при этом одной из уязвимых частей тела являются ноги. Основными видами травм нижних конечностей являются: перелом пяточной кости, травматическая ампутация стопы, переломы малой и большой берцовых костей.

Для определения оценки травмобезопасности экипажа при натурных испытаниях подрывом образцов техники в кабину и обитаемые отсеки помещали антропоморфные манекены с определённым набором датчиков (см. рис. 3). Так, для определения оценки травмобезопасности нижних конечностей в манекене использовали специально разработанные макеты голени с вмонтированными пятикомпонентными тензодатчиками: один – в верхней части голени, другой – в нижней, один трёхкомпонентный датчик ускорения – в голени, другой – в стопе и ещё один однокомпонентный датчик ускорения – в пятке. Предельно допустимое значение усилия, замеренное в верхнем тензодатчике голени согласно стандарту STANAG 4569 (Edition2), составляет 5,4 кН, что соответствует 10 % вероятности получения травмы по шкале AIS2+.

На рис 5. показаны различия в моделях оценки тяжести повреждения нижних конечностей.

Рис. 3. Сравнение моделей нижних конечностей, применяемых при испытаниях [19]

Причиной получения повреждений нижних конечностей являются большие сжимающие силы, возникающие в костях нижних конечностей вследствие высокоскоростного их удара о пол. Возникающие сложные переломы могут привести к серьёзным сосудистым нарушениям, которые представляют реальную угрозу для жизни человека (см. рис 4, 5). Поэтому большое значение

приобретают меры, направленные на снижение вероятности повреждения нижних конечностей человека при подрыве броневедомобиля.

Рис. 4. Повреждение стопы при подрыве техники на СВУ (множественные переломы, разрывы тканей, видна отёчность конечности; фото сделано через час после подрыва)

Рис. 5. Переломы в области дистального метаэпифиза костей голени и пяточной кости, возникшие у военнослужащего, находившегося внутри бронированного транспортного средства в момент взрыва под его днищем СВУ

В работе [16] представлен метод оценки травмобезопасности нижних конечностей экипажа автобронетанковой техники при подрыве на минах с использованием специального макета ноги. Проведено математическое моделирование деформации макета нижней конечности при различных скоростях удара.

В современных броневедомобилях самой распространённой конструктивной мерой по снижению ударных нагрузок на ноги является фальшпол. Однако последние тенденции указывают на активное применение другого конструктивного решения – подставок для ног. Кроме того, испытываются различные варианты подвесных систем [20].

Рис. 6. Подвесная система крепления сидения (ноги находятся на платформе)

В работе [17] проведена сравнительная оценка травмобезопасности двух вариантов расположения нижних конечностей экипажа: первого – стопы ног полностью опираются на фальшпол, второго – стопы опираются на подставку. В обоих расчётных случаях стопы манекена находятся

на одном уровне от днища бронеавтомобиля. Расчёт проводился в программном комплексе LS DYNA. Для оценки степени передачи ударного импульса к ступням сидящего члена экипажа при моделировании использовалась модель манекена Hybrid III.

Известно, что вероятность повреждения сильно зависит от выбора обуви как для спортсменов, так и в случае подрыва на mine. В частности, в [21; 22] приведено сравнение результатов испытаний моделей голени различных систем (HIII (N) THOR-Lx (N) MiL-Lx (N)) в обуви.

Модель Frangible Surrogate Leg (FSL), показанная на рис. 7, начала разрабатываться Australia's Defence Science and Technology Organisation (DSTO) в начале 90-х гг. как часть его программы Human Surrogate Program. Североатлантический альянс (НАТО) признал [21], что FSL спроектирован и может физически смоделировать механические характеристики нижних конечностей и, следовательно, позволяет проводить оценку повреждений при подрыве.

Рис. 7. Макет костной системы, применяемый при анализе повреждения

Методики определения тяжести повреждений экипажа при подрыве техники значительно отличаются. Для её оценки наибольшее распространение получил программный комплекс LS DYNA. Однако расчётные модели в ряде случаев некорректно оценивают возможные последствия для организма человека, в частности повреждения внутренних органов, головного мозга, нижних конечностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Феличано, Д. В. Травма. В 3 т. Т 3. / Д. В. Феличано, К. Л. Маттокс, Э. Е. Мур; пер. с англ.; под. ред. Л. А. Якимова, Н. Л. Матвеева. – М.: Изд-во Панфилова, 2013. – 576 с.
2. Гуманенко, Е. К. Военно-полевая хирургия: учеб. для студентов мед. вузов / Е. К. Гуманенко. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008. – 768 с., с илл.
3. British Crown copyright 2003 / DSTL – published with the permission of the Controller of Her Majesty's Stationary Office.ё
4. Свирида, В. С. Особенности повреждений у личного состава экипажа бронетехники при её подрыве: дис. ... канд. мед. наук: 05.26.02 / Свирида Валерий Степанович. – СПб., 2013. – 112 с.
5. Horn, K. Lightning Body Armor / K. Horn // U.S. Army Technical Report of RAND Corp. – 2011. – 66 p.
6. Пантюхов, А. П. Прогнозирование санитарных потерь / А. П. Пантюхов // Организация медицинского обеспечения Вооружённых Сил. – 2007. – № 3. – С. 3-5.
7. Королёв, Г. Е. Исследование боевых повреждений образцов отечественной бронетанковой техники / Г. Е. Королёв, Р. З. Мамлеев // Вестник бронетанковой техники, 1991. – № 8. – С. 15-20.
8. Рабинович, Б. А. О неправомерности использования критерия НИС (HEAD INJURY CRITERIA) для оценки травмобезопасности головы человека при ударе / Б. А. Рабинович, Н. А. Кулаков // Журнал автомобильных инженеров. – 2015. – № 5(94). – С. 10-15.
9. United States Code of Federal Regulations, Title 14, Part 27. Airworthiness Standards: Normal Category Rotorcraft, 14 CFR 27.562 (Subpart 562) from october 1, 2002. – Washington (DC). – 2002.

10. Титов, Р. В. Определение порогов травмобезопасности и летальности при подрыве бронетехники / Р. В. Титов, И. А. Соловьев, В. С. Свирида, И. А. Шперлинг, А. А. Галака // Вестник Российской военно-медицинской академии. – № 3(51). – 2015. – С. 133-139.
11. Shu Yang and Chang Qi Blast-Resistant Improvement of Sandwich Armor Structure with Aluminum Foam Composite // School of Automotive Engineering, State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology. – Vol. 2013. – 8 p.
12. Кулаков, Н. А. Особенности конструкций энергопоглощающих кресел, используемых в автобронетанковой и авиационной технике / Н. А. Кулаков, Е. В. Гаврилов // Известия МГТУ (МАМИ). – 2014. – Т. 1. – № 1(19). – С. 29-38.
13. Рябов, Д. М. Оценка влияния способов закрепления сидений на живучесть экипажа при подрыве броневых автомобилей / Д. М. Рябов, А. А. Смирнов, Д. О. Бутарович // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – № 3. – С. 43-47.
14. Grujicic, M. Computational investigation of the effect of up-armouring on the reduction in occupant injury or fatality in a prototypical high-mobility multi-purpose wheeled vehicle subjected to mine blast / M Grujicic, G Arakere, W C Bell, I Haque: proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D // Journal of Automobile Engineering. – 2009. – 223: 903 DOI: 10.1243/09544070JAUTO1170.
15. Numerical simulation of armored vehicles subjected to undercarriage landmine blasts DOI: 10.1007/s00193-015-0576-1.
16. Гаврилов, Е. В. Разработка специального приспособления для оценки перегрузок ног экипажа автобронетанковой техники при подрыве на минах / Е. В. Гаврилов, И. В. Паниченко, Н. А. Кулаков // Вооружение, военная техника и боеприпасы: сб. науч. статей. Форум лучших студентов технических вузов России / редкол.: В. К. Балтян (отв. ред.) и др. – М.: Ассоциация техн. ун-тов, 2015. – С. 96-99.
17. Рябов, Д. М. Оценка влияния размещения нижних конечностей экипажа броневых автомобилей на травмобезопасность при подрыве / Д. М. Рябов, А. А. Смирнов, Д. О. Бутарович // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – № 3. – С. 43-48.
18. Reinecke, J. D. A safe and secure South Africa Vehicle landmine protection validation testing / J. D. Reinecke, I. M. Snyman, R. Ahmed, F. J. Beetge // Available from: Izak Marius Snyman, Mar 31, 2014. See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/30510871>.
19. Pandelani, Th. The evaluation of the south african surrogate leg for landmine protection injury measurements / Th. Pandelani, D. Reinecke, Fr. Beetge // Seventh South African Conference on Computational and Applied Mechanics SACAM10 Pretoria. – 2010.
20. Производитель кресел повышенной защищённости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.autoflug.de>, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 25.05.2018).
21. Pandelani, T. An investigation of the forces within the tibiae at typical blast loading rates – with different boots: thesis presented for the Degree of master of science in the Department of Mechanical Engineering in the special field of Impact Biomechanics University of Cape Town / Pandelani Thanyani. – 2014.
22. Bergeron, D. M. Assessment of foot protection against anti-personnel landmine blast using a frangible surrogate leg / D. M. Bergeron, G. G. Coley, M. S. Rountree, I. B. Anderson // UXO Forum, New Orleans. – 2001.