



© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2018  
УДК 617.58-001.48-036.17-037

## Антропоморфные манекены для изучения механизма минно-взрывной травмы нижних конечностей и прогнозирования тяжести повреждений

*АНИСИН А.В., кандидат медицинских наук, майор медицинской службы (av.anisin@mail.ru)  
ЛОГАТКИН С.М., доктор медицинских наук, полковник медицинской службы запаса  
ДЕНИСОВ А.В., кандидат медицинских наук, подполковник медицинской службы*

Военно-медицинская академия им. С.М.Кирова, Санкт-Петербург

*Представлен обзор и анализ материалов доступных зарубежных публикаций по заявленной теме за последние 5 лет. Многие годы механизм минно-взрывной травмы изучался с использованием человеческих трупов и антропоморфных манекенов гражданского и военного назначения. Однако сравнительные исследования последних лет показали, что методики, применяемые для проведения «краш-теста», не в полной мере учитывают реальные физические процессы, происходящие при взрыве. Это вызвало потребность разработки виртуальных или математических моделей. В идеале нужна модель, наиболее полно и с максимально возможной точностью отражающая реакцию тела человека при подрыве. Такую модель создать пока не представляется возможным. Основной проблемой является отсутствие адекватной экспериментальной базы данных, необходимых для расчетов алгоритмов, на которых будет функционировать такая модель. Таким образом, создание методов изучения минно-взрывной травмы нижней конечности в настоящее время находится на стадии смены исследовательской парадигмы, когда традиционные подходы признаны устаревшими, а новые еще только предстоит разработать.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* минно-взрывная травма нижних конечностей, методы изучения механизма травмы, виртуальные модели, антропоморфные манекены.

*Anisin A.V., Logatkin S.M., Denisov A.V. – Anthropomorphic manikins for studying the mechanism of the mine-explosive trauma of the lower extremities and predicting the severity of injuries. The review of the materials of available foreign publications on the topic of mine-blasting injury for the last 5 years is presented. For many years, its mechanism was studied using human corpses and anthropomorphic mannequins of civil and military use. However, comparative studies in recent years have shown that the techniques used to perform the «crash test» do not fully take into account the actual physical processes occurring during the explosion. This caused the need to develop virtual or mathematical models. Ideally, we need a model that most fully and with the greatest possible accuracy reflects the reaction of the human body under a blast. It is not yet possible to create such a model. The main problem is the lack of an adequate database of experimental data necessary for calculating the algorithms on which such a model will operate. Thus, the creation of methods for studying the mine-blast injury of the lower limb is currently at the stage of changing the research paradigm, when traditional approaches are recognized as obsolete, and new ones are yet to be developed.*

*К е у о р д s:* Mine-blast trauma of the lower limbs, methods of studying the mechanism of injury, virtual models, anthropomorphic mannequins.

**Ц**ель настоящего обзора – характеристика современных методов изучения и прогнозирования тяжести минно-взрывной травмы нижней конечности и оценка перспектив их развития. Проведен анализ доступных зарубежных публикаций по данной проблеме за 5 лет

– с января 2013 по январь 2018 г. Взрывная травма вообще, а взрывная травма нижних конечностей в особенности, в войнах XXI в. оказалась преобладающим видом боевой патологии, что связано с особенностями ведения боевых действий в современных условиях. Так, по



данным Rigo Ноенсандр (участвовал в боевых действиях в Афганистане в 2006–2010 гг. как командир военно-медицинского подразделения), на долю взрывной травмы пришлось 69% всех боевых поражений [8]. По сведениям американских военных ортопедов (2016), переломы и травматические ампутации нижних конечностей составляют 46% от всех видов современной боевой ортопедической травмы [2].

Хотя данное повреждение не является новым видом боевой травмы, взрывная травма нижних конечностей стала доминировать в общей его структуре вследствие использования практически всем личным составом средств индивидуальной бронезащиты и повсеместного применения бронетехники для транспортировки военнослужащих. Это объясняется тем, что указанные средства в армиях стран НАТО не предназначены для защиты ног, а внутри бронетехники нижние конечности особенно страдают от непосредственной трансдукции взрывной волны через днище бронетранспортера.

Многие десятилетия в XX в. и в 2000-х годах механизмы взрывной травмы изучались с использованием человеческих трупов и антропоморфных манекенов. Однако эти модели для изучения и прогнозирования тяжести взрывной травмы не вполне адекватны, что начало выясняться уже в разгар афгано-иракской кампании, когда на фоне растущих потерь пришлось срочно менять конструкцию боевых машин [7]. Критическая оценка моделей, применявшихся для изучения механизма взрывной травмы, началась уже после завершения данной военной кампании.

Для прогнозирования тяжести взрывной травмы нижних конечностей традиционно использовались несколько моделей коммерческих антропоморфных манекенов, изначально созданных для проверки безопасности автомобильного транспорта при столкновениях, т. е. для выполнения так называемого «краш-теста» (*crash test*), из которых наибольшее распространение получила модель Hybrid III. В основу оценки результатов «краш-теста» положены статистические данные по повреждениям различных областей

тела человека в результате дорожно-транспортных происшествий, преимущественно при фронтальных ударах и их сопоставление с измеряемыми параметрами (ускорения, силы и др.) в аналогичных экспериментах с применением антропоморфных манекенов. В военных целях также разработан специализированный имитатор голени человека MiL-Lx.

До конца 1940-х годов «краш-тест» проводился с использованием биоманекенов (целых трупов людей и их частей), биомоделей (животных) и добровольцев-испытателей. Все перечисленные объекты ставили больше вопросов, чем давали ответов. В связи с этим в 1949 г. американскими фирмами Alderson Research Labs и Sierra Engineering Co был разработан инженерный манекен для выполнения «краш-теста» под названием Sierra Sam. В 1971 г. был выпущен первый антропоморфный манекен серии HYBRID – HYBRID I. В следующем году появилась его усовершенствованная модель HYBRID II, а в 1976 г. HYBRID III.

С тех пор последняя модель продолжала непрерывно совершенствоваться. В настоящее время Hybrid III оснащен 58 датчиками, позволяющими в течение 100–150 мс получить до 35 тыс. значений измеряемых параметров, которые первоначально хранятся в защищенном носителе информации внутри грудной клетки манекена, а после тестирования переносятся в лабораторный компьютер. Цена HYBRID III составляет около 150 тыс. евро за базовую модификацию. В конце 2000-х годов появился усовершенствованный антропоморфный манекен типа THOR, выпускаемый американской фирмой GESAC, Inc., активно сотрудничающей с министерством обороны США. Оба манекена (HYBRID III и THOR) имеют отдельные модули, имитирующие нижние конечности [5].

Тестовый манекен НАТО MIL-Lx ATD для оценки травмобезопасности нижней конечности представляет собой специализированный имитатор голени человека, производимый американской фирмой Humanetics. Он предназначен для оценки эффективности защиты нижних конечностей членов экипажей бронетехники при подрывах на противотранспортных минах.



В его конструкции реализованы современные технические решения для аналогичных манекенов голени семейств HYBRID III и THOR. В настоящее время выпускаются две модификации данного устройства: Model 4509J для прогнозирования повреждений верхней половины голени и Model 4929J — для нижней половины голени. Обе модели оснащены пятиканальными датчиками [9].

Сравнение реакции манекенов HYBRID III и MiL-Lx и реакции трупа человека на взрыв под днищем показало следующее.

Исследовательский коллектив из США опубликовал данные эксперимента по сравнению реакции манекенов HYBRID-III (левая нога) и MiL-Lx (правая нога) с реакцией трупа человека на подднищевый взрыв [1]. Использовались 5 человеческих трупов и 5 антропоморфных манекенов. Взрыв противотранспортной мины моделировался оригинальным устройством ODYSSEY, разработанным в университете штата Виргиния, США. Фактическая осевая нагрузка на нижнюю конечность при ударе варьировала от 234 до 686 г у трупов и от 278 до 565 г у манекенов. В числе прочих параметров изучалась реакция голени на взрыв в положении сидя. Установлено, что реакция голени на моделированный взрыв у всех трех тестируемых моделей была различной как по времени, так и по величине измеренной силы. Если реакции трупа и MiL-Lx можно назвать похожими, то реакция HYBRID III получена существенно отличающейся [1].

Приводятся данные исследовательского коллектива из Великобритании о результатах эксперимента по сравнению реакции двух манекенов HYBRID III и MiL-Lx на подднищевый взрыв в положении тела манекена сидя и стоя, а также при использовании трех видов защитных матов [10]. Взрыв в данном случае моделировался коммерческим устройством AnUBIS [3]. Изучалась пиковая осевая сила воздействия, развивающаяся в голени манекенов при трех уровнях мощности взрыва: малая, средняя и большая. Скорость движения ударной пластины AnUBIS для мощности малой интенсивности составляла примерно 3 м/с,

средней — 6 и высокой 9–10 м/с [10]. Результаты исследования показали, что пиковая осевая сила в голени в положении манекена сидя приходится примерно на 10 мс после взрыва и составляет для манекена HYBRID III без защитного мата при среднем уровне мощности взрыва 6 кН и для манекена MiL-Lx — 3,5 кН. В положении манекена стоя та же сила в голени при тех же условиях развивается несколько позже, примерно через 12 мс, и составляет соответственно 13 кН и 9 кН. Таким образом, с помощью исследуемых манекенов при одних и тех же условиях регистрируется сила, отличающаяся в полтора-два раза.

Из приведенных работ британской и американской исследовательских групп следует, что в экспериментах антропоморфные манекены с использованием соответствующих методик не в полной мере воспроизводят реальную ответную реакцию голени при подрыве мины под днищем транспортного средства.

Возможной причиной таких различий является то, что статистические данные по автотранспортным происшествиям получены при достаточно большой (по сравнению со взрывом) эффективной длительности ударного ускорения (около 5 мс). Взрывное же воздействие при непробитии днища бронемшины происходит за время, как правило, менее 3 мс. Кроме того, развиваемая при «краш-тесте» мощность удара также существенно уступает взрыву [11]. После того, как стала ясна несостоятельность «краш-тестового» аналога взрывной травмы, ученые обратились к разработке виртуальных моделей.

Американо-китайская исследовательская группа — ученые университета им. А. Уэйна (г. Детройт, США) и университета провинции Хунань (г. Чанша, КНР) — разработала виртуальную модель нижней конечности, позволяющую рассчитывать минимальную нагрузку по оси голени, вызывающую ее перелом при различных параметрах взрыва под днищем, защитных приспособлений и положения конечностей военнослужащих, находящихся в бронетехнике [6]. В основу проекта положена ранее созданная модель человека университета им. Уэйна (Wayne State



University Human Model – WSUHM). Новая модель ограничена нижней конечностью и состоит из 3 054 603 гексаэдральных элементов со средним размером 3 мм.

После того как было установлено, что реакция голени на взрыв у трупа более похожа на реакцию манекена MiL-Lx, чем манекена Hybrid-III, британская и американская исследовательские группы объединились (Newell N., Salzar R., Bull A.M., Masouros S.D.), чтобы на базе данных, полученных в экспериментах с голенью трупа и манекена MiL-Lx, создать адекватную виртуальную модель голени для проведения последующих опытов.

В опубликованных материалах [11] авторы отмечают, что их работа – не первая попытка создания виртуальной модели голени для изучения ее реакции на взрыв. Они ссылаются на совместную американско-китайскую публикацию 2013 г., описывающую подобную математическую модель, которая была создана только для определения величины критических параметров взрывного удара, приводящего к возникновению перелома голени [6]. Авторы же статьи [11] своей целью ставили создание модели, пригодной для решения более широкого круга задач. В математической модели используется так называемый метод конечных элементов (*finite element model*).

Суть метода заключается в том, что сложную зависимость, выраженную графически в форме нелинейной кривой, делят на множество кусочков, в каждом из которых данную зависимость можно упрощенно представить в виде прямой. В результате задача сводится к решению системы линейных уравнений. С целью облегчения расчетов авторы делают ряд принципиальных упрощений, например представляют голень в виде симметричного стержня, в то время как настоящая голень – это конгломерат, состоящий из двух неравных костей с существенным преобладанием мышечной массы в задней полусфере. Другим значимым упрощением явилось отсутствие стопы, от которой была оставлена только пятка. Временной шаг модели определен в 0,2 мс, общая протяженность временной шкалы составила 25 мс. Авторы считают, что с учетом ограниче-

ний, вытекающих из вышеупомянутых упрощений, созданная ими модель может быть использована для предварительного тестирования защитных устройств нижней конечности и как основа для разработки более совершенных виртуальных моделей.

Необходимо отметить, что основным отличием механизма травмы при взрыве противопехотной и противоднищевой мины является то обстоятельство, что если пострадавший прямо не наступил на противопехотную мину, а взрыв произошел рядом с ногой, то энергия взрывной волны не передается вдоль оси нижней конечности. Это делает моделирование травмы с помощью традиционных «краш-тестовых» манекенов и базирующихся на них числовых моделей физически несостоятельным.

Коллектив ученых Армейской лаборатории Абердинского полигона в США для изучения механизма повреждения противопехотной миной использует физическую модель голени под названием «модифицированная усиленная хрупкая искусственная нога» (*frangible surrogate lower leg – eFSLLM*). Это коммерческий продукт, разработанный и выпускаемый австралийской фирмой Adelaide T&E Systems. В частности, с помощью данного метода исследователи показали, что при поражении противопехотной миной важную роль играет не только первая взрывная волна, но и следующее сразу за ней ударное облако мелких частиц почвы, покрывавшей мину [12].

Таким образом, существующие модели для исследования и прогнозирования тяжести минно-взрывной травмы еще далеки от совершенства, а получаемые с их помощью результаты противоречивы и имеют ограниченную область практического применения. Этот вывод справедлив даже в отношении оценки эффективности защиты ног личного состава, находящегося в бронетехнике, от взрывов противотранспортных мин под днищем, хотя эта проблема считается наиболее актуальной в связи с массовым характером такого рода травм. А о каком-либо более или менее надежном методе всеохватывающего моделирования взрывной травмы нижних конечностей от противопехотной мины и говорить не при-



ходится. Проблема неожиданно оказалась слишком сложной даже в условиях адекватного финансирования.

Какой выход из сложившейся ситуации видят западные эксперты? В статье, опубликованной в июньском номере за 2017 г. ведущего военно-медицинского периодического издания Великобритании «Журнал королевского медицинского корпуса армии», группа экспертов описывает современный подход к числовому моделированию взрывной травмы [4]. Речь идет о трех взаимосвязанных модальностях различной степени точности:

1. *Высокоточная модель* симулирует физические процессы при взрывной травме с максимально возможной точностью (насколько позволяет современное состояние физики, техники и информационных технологий). Речь идет о виртуальной числовой модели. Авторы считают, что будущее именно за ней. Однако до настоящего времени данный подход находится, по выражению авторов, в зачаточном состоянии. Для его работы пока еще нет адекватной экспериментальной базы данных, необходимых для расчетов алгоритмов, на которых будет функционировать эта модель.

2. *Модель средней степени точности*, т. н. «симуляция уязвимости личного состава» (*personnel vulnerability simulation – PVS*), работает с использованием алгоритмов, полученных из имеющихся физических и инженерных расчетов возможного взаимодействия поражающих факторов взрыва и человеческого тела. Процесс моделирования протекает значительно быстрее.

3. *Модель низкой степени точности*, например т. н. устройство «прогнозирование человеческой травмы» (*human injury predictor – HIP*), использует упрощенные алгоритмы, что позволяет дать быструю, хотя и весьма ориентировочную оценку для больших групп при значительной неопределенности условий поражения (к примеру, оценить последствия детонации импровизированного взрывного устройства в городской толпе).

Таким образом, методы изучения и прогнозирования тяжести взрывной травмы нижней конечности в настоящее время находятся на стадии смены исследовательской парадигмы, когда традиционные подходы признаны устаревшими, а новые еще только предстоит разработать.

## Литература

1. *Bailey A. et al.* Comparison of Hybrid-III and PMHS Response to Simulated Underbody Blast Loading Conditions / Proceedings of IRCOBI Conference 11–13 September 2013. Gothenburg. – P. 158–171.

2. *Belmont P.J. et al.* Musculoskeletal Injuries in Iraq and Afghanistan: Epidemiology and Outcomes Following a Decade of War // *J. Am. Acad. Orthop. Surg.* – 2016. – Vol. 24, N 6. – P. 341–348.

3. Blast Mitigation // *Ingenia*. – 2015. – Is. 65. – P. 31–33. URL: <http://www.ingenia.org.uk> (дата обращения: 10.01.2018).

4. *Breeze J. et al.* Injury representation against ballistic threats using three novel numerical models // *J. R. Army Med. Corps.* – 2017. – Vol. 163, N 3. – P. 193–198.

5. Crash test dummy // *Wikipedia*. URL: <https://en.wikipedia.org/> (дата обращения: 10.01.2018).

6. *Dong L. et al.* Blast effect on the lower extremities and its mitigation: a computational study // *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* – 2013. – Vol. 28. – P. 111–124.

7. *Herbert N.* MoD Armoured Vehicles Failing British Troops / *CJL Armoured Chauffeur Driven Protection*. September 29, 2017. URL: <https://www.armoured-cars.co.uk> (дата обращения: 09.01.2018).

8. *Hoencamp R.* Task Force Uruzgan, Afghanistan 2006–2010: medical aspects and challenges / Doctoral thesis. – Hague, 2015. – 177 p.

9. Military Lower Extremity (50th Male) Legs // *Humanetics*. URL: <http://www.humaneticsatd.com/specialty-products/legforms/mil-lx-legs> (дата обращения: 10.01.2018).

10. *Newell N. et al.* A Comparison of MiL-Lx and Hybrid-III Responses in Seated and Standing Postures with Blast Mats in Simulated Under-Vehicle Explosions / Proceedings of IRCOBI Conference 11–13 September 2013. – Gothenburg, 2013. – P. 135–145.

11. *Newell N. et al.* A validated numerical model of a lower limb surrogate to investigate injuries caused by under-vehicle explosions // *J. Biomech.* – 2016. – Vol. 49, N 5. – P. 710–717.

12. *Rafaels K.A. et al.* Lower Leg Injuries in Dismounted Military Personnel from Buried Explosives / Proceedings of IRCOBI Conference 11–13 Sept. 2013. – Gothenburg, 2013. – P. 171–182.





## Аппарат для экспресс-диагностики вирусных инфекций в полевых условиях

Rapidly field deployable viral diagnostics. Editorial review.

*Keywords:* diagnostic tools, infectious diseases, viruses.

*MeSH terms:* Diagnostic Equipment, Virus Diseases.

27 апреля 2018 г. престижный международный журнал *Science* на своем сайте выложил статью<sup>1</sup>, анонсирующую создание портативной аппаратуры для быстрой диагностики вирусных инфекций в полевых условиях. Публикация подготовлена большой международной группой исследователей<sup>2</sup>.

До сих пор экстренная диагностика вирусных инфекций в очаге была крайне затруднительной. Методы, основанные на определении вирусных нуклеиновых кислот, характеризовались высокой чувствительностью и специфичностью, но требовали многократных манипуляций с тестируемым образцом, сложного и дорогостоящего стационарного оборудования. Методы, основанные на определении вирусного антигена, наоборот, были просты и недороги, но отличались недостаточной чувствительностью и специфичностью и требовали месяцев для разработки тестовой системы.

В реферируемой статье авторы использовали молекулярно-биологическую методику диагностики с аббревиатурой *SHERLOCK*<sup>3</sup>. Она основывается на определении нуклеиновых кислот с помощью т. н. *изотермальной рекомбинантно-полимеразной амплификации (Isothermal amplification via recombinase polymerase)* на базе рибонуклеазы *Cas13*. *SHERLOCK* позволяет определять наличие вирусных

частиц даже в концентрации 1 частица на мл (!) с чувствительностью и специфичностью 100%. Тестирование с предъявлением образцов 4 вирусов рода Флавивирус<sup>4</sup> показывает, что метод не только легко различает отдельные вирусы, но также и их серотипы. Он даже способен генотипировать вирусы вплоть до однонуклеотидного полиморфизма, исключая при этом обычно используемые для этой цели полимеразную цепную реакцию и флуоресцентную масс-спектрометрию, требующие сложной процедуры подготовки образца, дорогостоящей и громоздкой аппаратуры.

*SHERLOCK* работает с уже выделенными нуклеиновыми кислотами. Чтобы сделать ее пригодной для выявления вирусов в нативных образцах, таких как кровь, моча, слюна, авторы дополнили *SHERLOCK* второй методикой под аббревиатурой *HUDSON*<sup>5</sup>. Последняя позволяет использовать для диагностики пробы мочи и слюны прямо от больного, а пробы крови – в трехкратном разведении фосфатным буфером. При этом весь процесс анализа полностью автоматизирован, а время его проведения занимает менее 2 часов.

Комбинированная диагностическая платформа *SHERLOCK/HUDSON* легко транспортируется, а реактивы лиофилированы, что исключает необходимость в холодильнике.

<sup>1</sup> Field-deployable viral diagnostics using CRISPR-Cas13 / Myhrvold C. et al. // *Science*. 2018. Vol 360, Is 6387. P. 444–448. Abstr. URL: <http://science.sciencemag.org/content/360/6387/444>, доступ к полному тексту платный.

<sup>2</sup> Великобритания, Бразилия, Гондурас, США.

<sup>3</sup> Specific Eight-sensitivity Enzymatic Reporter unLOCKing.

<sup>4</sup> Конкретно вирусы зика, денге, желтой лихорадки и лихорадки Западного Нила.

<sup>5</sup> Heating Unextracted Diagnostic Samples to Obliterate Nucleases.