

УДК 616.-001:662.215.23

## ПОРОГОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ТРАВМИРОВАНИЯ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ВЗРЫВА

Иваницкий А.Г., Петрико Е.А.

Изучены литературные данные механизма воздействия избыточного давления взрыва топливовоздушных смесей на организм человека для определения возможных последствий. Установлено, что наиболее чувствительны к воздействию волны избыточного давления взрыва органы слуха, дыхания, желудочно-кишечного тракта и головной мозг, а основной травмирующий эффект зависит от величины избыточного давления взрыва. Определены пороговые значения травмирования человека при воздействии избыточного давления взрыва, на основании чего установлено, что на первоначальном этапе проведения экспериментальных исследований по определению последствий воздействия избыточного давления взрыва на человека возникает необходимость изучения аэродинамических характеристик поведения тела человека с учетом его антропометрических данных.

*Ключевые слова:* взрыв, избыточное давление взрыва, организм человека, механизм травмирования.

(Поступила в редакцию 7 апреля 2017 г.)

Проведенный анализ статистических данных взрывов, произошедших в мире, а также их последствий свидетельствует о том, что обеспечение безопасности людей при аварийных взрывах топливовоздушных смесей является актуальной на сегодняшний день задачей [1]. В связи с этим возникает необходимость детального изучения механизма воздействия избыточного давления взрыва топливовоздушных смесей на организм человека для определения возможных последствий.

При взрывах происходит быстрое изменение давления, плотности и температуры газовой среды. Сгорание большинства конденсированных взрывчатых веществ протекает в режиме детонации, при этом взрывная волна в веществе распространяется с постоянной скоростью при данных плотности и форме заряда. Значения скоростей детонации находятся в пределах от 1,5 км/с для некоторых промышленных взрывчатых веществ до 8 км/с для мощных типичных взрывчатых веществ; при этом давления взрывов достигают 20–38 ГПа. Что касается дефлаграционного горения, оно происходит при достижении скоростей распространения пламени значений сотен метров в секунду, но не превышающих скорость распространения звука в данной среде. При дефлаграционном горении газовая среда может нагреваться до 1500–3000 °С, а давление в закрытых объемах увеличивается до 0,6–0,9 МПа. Применительно к аварийным взрывам под дефлаграцией обычно понимают горение облака со скоростью 100–300 м/с, при котором генерируются волны избыточного давления с максимальным давлением 20–100 кПа. В определенных условиях дефлаграционное горение может перейти в детонационный процесс, при котором скорость распространения пламени превышает скорость распространения звука и может достигать 1–5 км/с. Как правило, взрывы топливовоздушных смесей протекают в режиме дефлаграционного горения [2].

Одним из опасных факторов взрыва является волна избыточного давления. Самыми важными характеристиками волны избыточного давления являются: скорость нарастания и максимальное значение избыточного давления, длительность положительной фазы (период времени, в течение которого наблюдается повышенное давление) и импульс. Тело человека способно легко адаптироваться к изменению давления в широком диапазоне. Когда давление изменяется постепенно, его действие компенсируется изменением давления в органах, содержащих воздух. Если давление изменяется быстро, увеличивается разность давлений, что может привести к повреждению внутренних органов. Таким образом, наиболее чув-

ствительны к воздействию волны избыточного давления взрыва органы слуха, дыхания, желудочно-кишечного тракта и головной мозг [3].

В целом воздействие волны избыточного давления взрыва на человека представляет собой сложный процесс, в котором необходимо учитывать действие следующих параметров: разность между нормальным давлением и избыточным давлением взрыва; величина перепада давления перед фронтом волны избыточного давления взрыва и позади нее; действие динамического давления, оказываемого волной и продолжительность ее действия. В результате анализа литературных источников [3, 4] установлено, что основной травмирующий эффект зависит от величины избыточного давления взрыва.

Механизмы поражения живого организма воздушной ударной волной складываются из нескольких моментов: прямого или непосредственного воздействия, метательного эффекта и действия звукового раздражения. Момент соприкосновения фронта ударной волны с телом и полное его обтекание характеризуется величиной давления во фронте ударной волны. В начальный период на поверхности тела, обращенной к взрыву, за счет эффекта отражения возникает скачок давления, в несколько раз превышающий давление во фронте волны. При этом человек испытывает сотрясение всего тела и общий лобовой либо касательные удары. В силу преобладания в спектре ударной волны высоких частот, она одновременно легко проникает в тело, порождая сложную систему продольных и поверхностных волн. Скорость их прохождения близка к скорости звука в среде той или иной плотности. Ударные волны, распространяясь в теле по неоднородным средам и микроструктурам, вызывают 3 вида повреждающих эффектов: расщепляющие (обусловлены растягивающими усилиями, возникающими при отражении, преломлении и интерференции ударных волн на границах раздела тканей с неодинаковой плотностью), инерционные (заключаются в образовании градиента скорости в соседних тканях и органах, имеющих различную массу и удельную плотность, что ведет к разрушению их структуры за счет разности ударных перегрузок тканей на соседних участках), кавитационные (обусловлены выделением большого количества тепла и образования пузырьков газа в жидкостях организма при мгновенном поглощении энергии ударной волны) [5].

Метательный эффект представляет собой в сотни и тысячи раз более длительный и более стабильный процесс, занимающий всю положительную фазу сжатия. В этот период человек подвергается влиянию динамического напора волны. Поверхность тела, обращенная к центру взрыва, испытывает давление, равное сумме давлений отражения и скоростного напора; боковые поверхности – давление, равное давлению во фронте ударной волны, противоположная взрыву сторона – еще меньшее. Разница давлений рождает смещающую силу, параллельную плоскости земли. Возникает разница и в силе обдувания тела сверху и снизу потоком сжатого воздуха, вследствие чего образуется подъемная сила. В результате такого сочетания сил образуется результирующая сила, направленная вверх и в сторону от центра взрыва. Человек, попавший в зону вблизи центра мощного взрыва, может быть отброшен на несколько десятков метров. Тяжесть поражения определяется количеством движения, которое сообщается телу при взаимодействии со взрывной волной и зависит от проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению распространения взрывной волны, а также характера изменения избыточного давления. Следует отметить, что с увеличением массы человека его сопротивляемость к действию взрывной волны возрастает.

Одновременно с травмированием человека, воздействие взрывной волны на окружающую среду приводит к возникновению осколков и обломков, которые также способны причинить значительные повреждения.

В целом, все нарушения, возникающие в организме в результате действия взрывной волны, принято разделять на первичные, вторичные и третичные: первичные поражения возникают в результате непосредственного воздействия взрывной волны на организм; вторичные поражения возникают в результате действия на организм предметов, приведенных в действие взрывной волной; третичные поражения возникают в результате ударов тела,

приведенного в движение действием взрывной волны, о расположенные рядом твердые поверхности [6].

Соотношение указанных повреждений будет зависеть от мощности и вида взрыва, расстояния от его центра, степени защищенности людей и условий распространения ударной волны: рельефа местности, наличия окружающих предметов, времени года, метеорологических и других условий.

Рассмотрим подробнее механизм повреждения наиболее подверженных к травмированию при взрыве органов (дыхания и слуха), механизм повреждения человека в целом при его взрывном перемещении, а также механизм повреждения осколками и обломками.

Как было сказано ранее, при взрыве чаще всего травмируются органы дыхания – легкие. Баротравма легких является причиной легочных кровотечений и отеков, разрыва легких, потери дыхательного запаса и т. д. Механизм повреждения легких при взрыве заключается во внезапной мощной компрессии заключенного в грудной клетке легкого. Ребра при этом играют роль рычагов, которые ударяют по поверхности легкого или (на противоположной стороне) образуют для сдавливаемого легкого жесткую подкладку.

Осложнением баротравмы легких может быть пневмоторакс или гемоторакс. Чаще скопление воздуха в плевральной полости сочетается с внутривнутриплевральным кровотечением. В зависимости от характера сообщения плевральной полости с внешней средой различают закрытый, открытый и клапанный пневмоторакс. Гемоторакс является следствием повреждения сосудов грудной стенки и легкого. Реже выявляются опасные ранения сердца, аорты, полых и легочных вен.

При баротравме легких в трахее и бронхах отмечается жидкая кровь, участки вздутия и ателектаза легочной ткани, множественные разрывы, очаговые кровоизлияния. Чаще всего страдают легкие на стороне, обращенной к центру взрыва (взрывное легкое). В паренхиме легких наблюдают кровоизлияния, локализующиеся преимущественно в области верхушек, поверхности печени и прикорневой зоны. Под плеврой легких заметны множественные точечные геморагии, располагающиеся соответственно межреберным пространствам.

В настоящее время в литературных источниках [3, 4] приведены сведения о том, что воздействие ударной волны влечет за собой быстрое внутреннее смещение грудной клетки, что и является одной из главных причин возникновения взрывной травмы. Быстрое смещение стенки грудной клетки может создать локальную волну давления на ткани легких, в то время как невозможно быстро освободить избыток энергии, при этом происходит кровоизлияние легких и отек повреждений.

В то время, как ударная волна подходит к грудной клетке человека, которая обладает более высокой плотностью, она отражается от объекта и рассеивается вокруг него. Величина отраженного давления связана как с падающей силой удара, так и с углом падения взрывной волны. Падающая волна будет проникать внутрь грудной стенки и генерировать ее сдвиг и сжатие легких в пределах человеческой груди.

Скорость движения стенки грудной клетки, в основном, определяется тремя факторами: величиной внешних нагрузок, вызываемых взрывной волной; волновым давлением, вызванным движением стенки грудной клетки; внутренним давлением, обусловленным сжатием легких и других органов.

Следует отметить, что в настоящее время достаточно стремительно развивается направление моделирования поведения организма человека при воздействии взрывных волн различных параметров. Модели разрабатываются на основе результатов проведенных ранее экспериментов [7]. В настоящее время разработана детальная 3D-модель конечных элементов овечьей грудной клетки для определения повреждения отдельно левого и правого легкого, а также объемного повреждения легких вследствие воздействия избыточного давления взрыва [8]. Общая модель грудной клетки была построена на основе компьютерной томографии трупов овец, однако большинство сведений и характеристик поведения ребер при различных значениях избыточного давления взрыва взяты из литературных ис-

точников, где отражены результаты проведенных ранее экспериментальных исследований повреждающего действия взрыва на живые организмы [9, 10].

Метод моделирования поведения грудной клетки используется не только для установления изменения перемещения грудной клетки, но и для прогнозирования последствий возникновения и тяжести травм легких человека. В [11] представлены результаты численного моделирования динамических характеристик грудной клетки человека, нагруженной взрывной волной. Данная модель, в основу которой положена реальная геометрическая форма человеческого тела, является наиболее точной с точки зрения определения вероятности травмирования легких и имеет весьма важное практическое значение. Установлено, что максимальную скорость движения внутрь при нагрузке имеют третьи, четвертые и пятые ребра, следовательно, в этих местах будут наблюдаться наибольшие повреждения легких.

По данным источника [11] установлено, что человек не пострадает, в том случае, когда максимальная скорость движения грудной стенки внутрь не превышает 3,6 м/с, наблюдается незначительная травма легкого при скорости грудной клетки 3,6-7,5 м/с, средние и серьезные травмы наблюдаются, когда скорость смещения грудной клетки составляет 7,5-16,9 м/с. Программное обеспечение позволяет анализировать величины напряжений и смещение грудной клетки человека при воздействии взрывной волны.

Таким образом, пороговым давлением, приводящим к повреждениям легочной ткани при расположении человека на открытой местности, является избыточное давление взрыва порядка 200-345 кПа [11]. Величина избыточного давления, приводящего к смертельным повреждениям, составляет около 660 кПа. Для замкнутых пространств пороговые уровни снижены в 5 раз.

Также при взрыве часто наблюдается травмирование органа слуха, причем первым проявлением является потеря слуха. Повреждение слуха при взрыве происходит по одному из трех механизмов. При первом возможен разрыв барабанной перепонки. Это обычно происходит у взрослых при разнице в давлении между средним и наружным ухом примерно в 100 кПа, что чаще всего наблюдается как линейная перфорация туго натянутой части перепонки. Второй механизм состоит в смещении слуховых косточек, которое может сопровождать разрыв барабанной перепонки или же наблюдается как изолированное повреждение. Наконец, при третьем механизме оглушение может быть обусловлено действием взрывной волны на внутреннее ухо, что приводит к возникновению перилимфатической фистулы и других повреждений.

Данные оригинального исследования, в котором использовались трупы, а давление в наружном слуховом проходе повышалось до разрыва барабанной перепонки, показали, что среднее давление разрыва у взрослых составляет порядка 150 кПа, у детей – 200 кПа. Следует отметить, что в группе из 100 человек велика вероятность того, что у кого-то прочность барабанной перепонки окажется менее 50 кПа [12].

В результате так называемого взрывного перемещения воздуха, тело человека может быть перенесено на некоторое расстояние. Во время такого перемещения перевороты и скольжение по поверхности могут привести к травмированию. Также во время перемещения существует вероятность столкновения с жесткими предметами. Тяжесть последствий в основном зависит от скорости удара, твердости и формы объекта или преграды и части человеческого тела, подверженной воздействию при столкновении. Наиболее уязвимой частью тела в случае столкновения является череп.

Результаты ранее проведенных экспериментальных исследований последствий воздействия ядерных взрывов на манекены (объекты испытаний) показали, что скорость взрывного перемещения человека зависит от его положения относительно распространения взрывной волны. Так, в случае расположения манекена перпендикулярно направлению распространения взрывной волны вероятность его травмирования и гибели в случае перемещения и удара о жесткие преграды значительно выше, чем при его расположении лежа (в данном случае смещения были незначительными) [3].

При определении пороговых скоростей удара животных о жесткие преграды, приводящих к гибели, использовали результаты свободного падения подопытных животных с различных высот на бетонную плиту. Так, в 50 % случаев наблюдалась гибель мышей, крыс, морских свинок и кроликов при скоростях удара 11,6; 13,4; 9,4 и 9,4 м/с соответственно. В последующем, при экстраполяции этих данных на человека установлено, что в 50 % смерть наступит при скорости около 7,9 м/с. Кроме того, было определено, что в 1% случаев гибель наступает уже при скорости удара 6,1 м/с.

Известна также зависимость скорости удара человека и частоты переломов при этом: скорость удара о твердую ровную поверхность примерно от 4,3 до 7 м/с приводит к растрескиванию костей черепа; перелом ног и лодыжек происходит при скоростях удара от 3,6 до 4 м/с; перелом поясничного отдела позвоночника наблюдали при скорости удара в сидячем положении 2,4 м/с.

В источнике [13] приведены результаты компьютерного моделирования воздействия ударной волны на тело человека с учетом его антропометрических данных. При проведении исследований тело человека делилось на сегменты, что позволило рассмотреть поведение отдельно взятых частей тела человека при воздействии опасных факторов взрыва. Результаты моделирования показали, что после воздействия воздушной ударной волны человек начинает двигаться и, в зависимости от величины вторичных (отраженных) волн, положение его тела, а также форма изменяется. Установлено, что основные повреждения при таком перемещении в пространстве человек получает при воздействии отраженных волн.

Наряду с повреждающим действием газообразных продуктов взрыва и взрывной волны, возникающих в окружающей среде, важное значение при определении повреждающих воздействий приобретают осколки и части разрушившихся аппаратов, агрегатов, установок и т. д. Характер и тяжесть осколочного поражения зависят прежде всего от кинетической энергии осколка, определяемой его скоростью и массой. Осколки при взрывах, как правило, причиняют слепые и касательные раны, реже – сквозные. Осколки, имеющие небольшую скорость полета (около 50 м/с), могут наносить закрытые повреждения – ушибленные раны, ссадины, разрывы внутренних органов, переломы и др. [14].

Помимо энергетических параметров осколков при формировании повреждений имеет значение их форма и размеры, а также особенности анатомического строения поражаемой части тела. Движение осколков характеризуется «кувырканием», вследствие чего в поражаемом объекте они встречают большое сопротивление, быстрее теряют свою скорость, чем пуля, и наносят повреждения непосредственно в зоне своего продвижения. На основе анализа литературных данных, минимальной массой осколков, которые уже способны поражать кожу человека, считается 0,07–0,1 г.

Результаты проведенного исследования механизма воздействия избыточного давления взрыва на организм человека представлены в таблице 1.

**Таблица 1. – Пороговые значения травмирования человека при воздействии избыточного давления взрыва**

60 кПа	50-ти процентная вероятность гибели человека вследствие удара о жесткую преграду при взрывном перемещении
78 кПа	гибель человека вследствие удара о жесткую преграду при взрывном перемещении
150 кПа	среднее давление разрыва барабанной перепонки у взрослого человека
200 кПа	повреждение легочной ткани при расположении человека на открытой местности
660 кПа	повреждение легких, приводящее к гибели

Из таблицы видно, что пороговое значение избыточного давления взрыва, которое приводит к гибели человека, при взрывном перемещении значительно ниже, чем пороговые значения повреждения органов слуха и дыхания человека. Следовательно, на первоначальном этапе проведения экспериментальных исследований по определению последствий воздействия избыточного давления взрыва на человека возникает необходимость изучения аэродинамических характеристик поведения тела человека с учетом его антропометрических данных.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иваницкий А.Г., Миканович А.С., Петрико Е.А. Проблемы определения вероятности поражения человека избыточным давлением взрыва / А.Г. Иваницкий, А.С. Миканович, Е.А. Петрико // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2012. – № 1 (15). – С. 4-9.
2. Бесчастнов, М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение / М.В. Бесчастнов. – М. : Химия, 1991. – 432 с.
3. Lee's loss prevention in the process industries. A 3rd ed. / edited by Sam Mannan. . – London, 2005. – 3708 p.
4. Тюрин, М.В. Повреждения воздушной ударной волной и разработка специальных средств защиты и безопасности : автореф. дис. докт. мед. наук : 05.26.02 / Тюрин М.В.; Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины МЧС России – Санкт-Петербург, 2000. – 42 с.
5. Исаков, В.Д. Судебно-медицинская экспертиза взрывной травмы / В.Д.Исаков, Р.В.Бабаханян, А.А.Матышев и др. – Санкт-Петербург, 1997. – 120 с.
6. Richmond, D.R. Biological effects of blast and shock. Technical Progress Report / D.R. Richmond, C.S. White; Lovelace Foundation for Medical Education and Research Albuquerque. – New Mexico. – 1966. – P. 57.
7. Иваницкий А.Г., Петрико Е.А. Оценки последствий воздействия избыточного давления взрыва топливоздушных смесей на человека / А.Г. Иваницкий, Е.А. Петрико // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2014. – № 1 (19). – С. 67-72.
8. Gibbons, M. Finite Element Modeling of Blast Lung Injury in Sheep [Text] / Melissa M. Gibbons, Xinglai Dang, Mark Adkins; Journal of Biomechanical Engineering. – USA. – 2015. – 9 p.
9. White, C.S. The biodynamics of air blast / C.S. White, R.K. Jones, G.E. Damon. –Lovelace Foundation for Medical Education and Research, Albuquerque, NM. – 1971.
10. Bowen, J.G. Estimate of man's tolerance to the direct effects of air blast. Lovelace Foundation for Medical Education and Research / J.G. Bowen, E.R. Fletcher, D.R. Richmond. – Albuquerque, New Mexico. – 1968. – 120 p.
11. Kang, J. Numerical simulation on dynamic response of the chest wall loaded by the blast wave / J. Kang, C.Yu, H.Li, J.Chen, H.Lui; Engineering Review. – 2015. – 113-120 p.
12. Чигарев, А.В. Биомеханика / А.В. Чигарев, Г.И. Михасев, А.В. Борисов. – Минск, 2000. – 284 с.
13. Explosion and Blast-Related Injuries: Effects of Explosion and Blast From Military Operations and Acts of Terrorism / edit. N.M. Elsayed, J. Atkins. – Elsevier Inc., 2008. – 380 p.
14. Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials. CPR 16E. – Committee for the Prevention of Disaster caused by dangerous substances. The Hague: Directorate-General of Labour of the Ministry of Social Affairs and Employment, 1992. – 337 p.

## THRESHOLD VALUES OF HUMAN INJURY WHEN EXPOSED TO EXCESS EXPLOSION PRESSURE

Aliaksandr Ivanitski, candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Alena Piatryka

The state educational establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Minsk, Belarus

*Purpose.* To study the mechanism of the effect of excessive pressure on fuel in order to determine the possible consequences.

*Methods.* The analysis of literature sources and conduction of experimental studies.

*Findings.* It was found that the most sensitive to excessive pressure are the organs of hearing, respiration, gastrointestinal tract and brain, the main traumatic effect depending on the excess pressure. The threshold values of human injury risk at the onset of excessive explosion pressure are determined.

*Conclusion.* It is established that the initial stage is conduction of experimental studies to determine the consequences of the effect of excessive pressure on human body taking into account its anthropometric data.

*Keywords:* explosion, excessive explosion pressure, human body, the mechanism of injury.

(The date of submitting: April 7, 2017)

### REFERENCES

1. Ivanitsky A.G., Mikanovich A.S., Petriko E.A. Problems of determining the likelihood of human injury by excessive explosion pressure. *Vestnik Komandno-Inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*. 2012. №1 (15). Pp. 4-9.(rus)
2. Beschastnov, M.V. *Industrial explosions. Evaluation and Prevention*. M.: Chemistry, 1991. 432 p. (rus)
3. *Lee's loss prevention in the process industries*. A 3rd ed. Edited by Sam Mannan. London, 2005. 3708 p.
4. Tyurin M.V. *Damage by an air shock wave and development of special means of protection and safety: the author's abstract*. Dr. med. sci diss. Synopsis: 05.26.02. All-Russia Center for Emergency and Radiation Medicine, EMERCOM of Russia. St. Petersburg, 2000. 42 p. (rus)
5. Isakov V.D. Babakhanyan R.V., Matyshev A.A. and others. *Forensic examination of explosive trauma*. St. Petersburg, 1997. 120 p. (rus)
6. Richmond D.R., White C.S. *Biological effects of blast and shock. Technical Progress Report*. Lovelace Foundation for Medical Education and Research Albuquerque. New Mexico. 1966. P. 57.
7. Ivanitsky A.G., Petriko E.A. Estimates of the consequences of the effect of excessive pressure of the explosion of fuel-air mixtures on humans. *Vestnik Komandno-Inzhenernogo institute MChS Respubliki Belarus'*. 2014. №1 (19). Pp. 67–72. (rus)
8. Gibbons M., Dang X., Adkins M. Finite Element Modeling of Blast Lung Injury in Sheep [Text]. *Journal of Biomechanical Engineering*. USA. 2015. 9 p.
9. White C.S. Jones R.K., G.E. Damon. The biodynamics of air blast. *Lovelace Foundation for Medical Education and Research*, Albuquerque, NM. 1971.
10. Bowen J.G., Fletcher E.R., Richmond D.R. Estimate of man's tolerance to the direct effects of air blast. *Lovelace Foundation for Medical Education and Research*. Albuquerque, New Mexico. 1968. 120 p.
11. Kang J., Yu C., Li H., Chen J., Lui H. *Numerical simulation on dynamic response of the chest wall loaded by the blast wave*. Engineering Review. 2015. 113-120 p.
12. Chigarev A.V., Mikhachev G.I., Borisov A. *Biomechanics*. Minsk, 2000. 284 p.
13. Elsayed N.M., Atkins J. *Explosion and Blast-Related Injuries: Effects of Explosion and Blast From Military Operations and Acts of Terrorism*. Elsevier Inc. 2008. 380 p.
14. *Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials*. CPR 16E. Committee for the Prevention of Disaster caused by dangerous substances. The Hague: Directorate-General of Labour of the Ministry of Social Affairs and Employment, 1992. 337 p.