

МЕХАНИЧЕСКАЯ ТРАВМА С ПОЗИЦИЙ ВОЛНОВОЙ ДИНАМИКИ

С.В. Леонов¹, А.В. Михайленко², А.В. Никитаев³

¹ Начальник отдела медико-криминалистической идентификации 111 ГГЦ СМ и КЭ (нач. - д.м.н. П.В. Пинчук), профессор кафедры судебной медицины и права МГМСУ (зав.каф. - проф., д.м.н. П.О. Ромодановский)

² к.м.н., заведующий отделением судебно-медицинской криминалистики Киевского городского клинического бюро судебно-медицинской экспертизы (начальник бюро В.Т. Юрченко)

³ врач судебно-медицинский эксперт Керченского районного отделения Крымского республиканского учреждения «Бюро судебно-медицинской экспертизы» (начальник бюро Е.Д. Иванченко)

Актуальность. Еще из школьного курса физики мы помним, что если в определенной точке упругой среды возбудить колебания, то они будут распространяться с определенной скоростью, за счет передачи возмущений от одной точки к другой. Любое взаимодействие травмирующего предмета с биологической тканью есть динамический процесс, который будет сопровождаться распространением упругих волн в данной ткани. С ними связан перенос энергии колебаний от источника колебаний к периферийным участкам среды. При этом при достаточно большой амплитуде образующиеся волны могут вызывать разрушение материала. При анализе судебно-медицинской литературы по данной тематике мы столкнулись с крайней скудностью информации. Даже механизмы огнестрельной травмы и травмы ускорения в судебной медицине оцениваются практически лишь с учетом одного-двух механических факторов - скорости взаимодействия и прочностных характеристик мишени [6,7,8].

С другой стороны, имеется огромное количество технической литературы, посвященной процессу соударения тел и связанных с ним ударно-волновыми процессами [1,2,3,4]. Это побудило нас рассмотреть механическую травму с учетом положений волновой динамики.

Цель и задачи исследования. Изучить теоретические основы распространения волн в биологических тканях при механической травме и установить возможность применения полученных теоретических данных в судебной медицине.

Результаты исследования и их обсуждение. Волны, которые могут распространяться в твердых телах принято делить на: объемные, поверхностные, волноводные и канализованные [4]. Кроме этого выделяют упругие, пластичные и ударные волны. Объемные акустические волны распространяются во всем объеме тела. Одним из признаков, по которому различают между собой волны, является форма фронта волны. Они бывают сферические, плоские, цилиндрические и т.д. Другим признаком служит направление вектора смещения колеблющихся частиц, по этому признаку различают объемные продольные и объемные поперечные волны (**P**, **S**). Поверхностные волны распространяются вблизи свободной поверхности твердого тела, либо на границе раздела двух различных сред. Их фазовая скорость направлена параллельно этой поверхности, и они интенсивно убывают с глубиной. Волноводные акустические волны могут существовать в стержнях и тонких слоях, а канализованные в выступах или канавках различного профиля на поверхности тела [4]. Волны сжатия (**P**-волны или продольные волны) заставляют частицы материала колебаться подобно спиральной пружине, вдоль направления распространения путем чередования участков сжатия и разрежения (рис.1-а). Они могут возникать во всех средах (твердых, жидких и газообразных). Волны сдвига (**S**-волны или поперечные волны) заставляют частицы колебаться перпендикулярно направлению распространения, подобно гитарной струне. **S**-волны распространяются только через материал, обладающий упругостью (рис. 1-б).

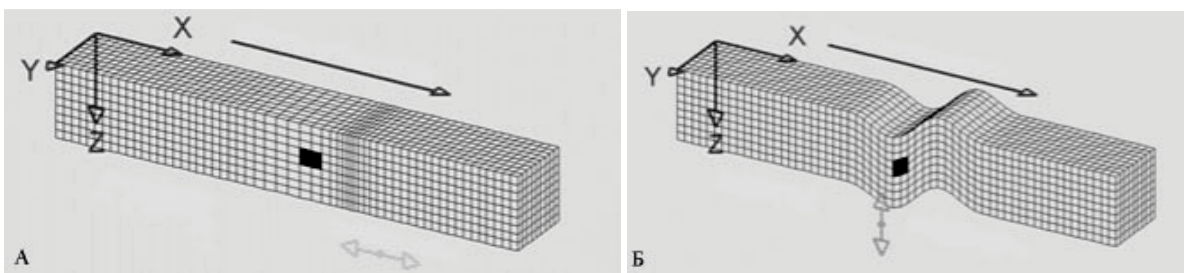


Рис. 1. Характер распространения продольной (А) и поперечной (Б) волн

В твердых телах, в частности в костях скелета, наряду с продольными, могут возникать и поперечные, сдвиговые волны.

В жидкостях, в том числе и в мягких биологических тканях, которые содержат до 75% воды, распространяются продольные волны. Однако имеется другая возможность возникновения сдвиговых волн в мягких тканях, в результате преломления и отражения продольных волн на границе контактных слоев с разными механическими характеристиками (рис. 2). Из рисунка видно, что от границы раздела отражается не одна, а две волны. Одна продольная, а другая сдвиговая (поперечная). Во вторую среду проходят также две волны.

Скорости распространения волн в любых средах зависят от двух факторов: упругости и плотности материала. Упругие свойства твердых тел зависят от типа деформации. Так, к примеру, упругие свойства трубчатой кости неодинаковы при кручении, сжатии и изгибе. И соответствующие данным типам деформации волновые колебания будут распространяться с разной скоростью.

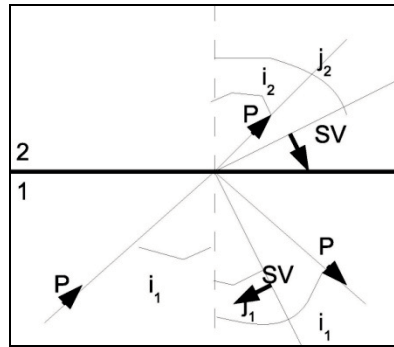


Рис 2. Схема падения луча продольной волны под углом на границу раздела контактных сред (P- продольная волна, SV- отраженная и преломленная волна сдвига)

При сжатии, изгибе и кручении в кости будут возникать соответственно волны сжатия (рис. 3-а), волна изгиба (рис.3-б) и волна кручения (рис. 3-в). Деформациям изгиба соответствует волна, не являющаяся ни чисто продольной, ни чисто поперечной. Деформации же кручения, дают чисто поперечную волну. Скорость волны изгиба в стержне зависит от длины волны. Такую волну называют "дисперсионной". Волны кручения в стержне - чисто поперечные и недисперсионные.

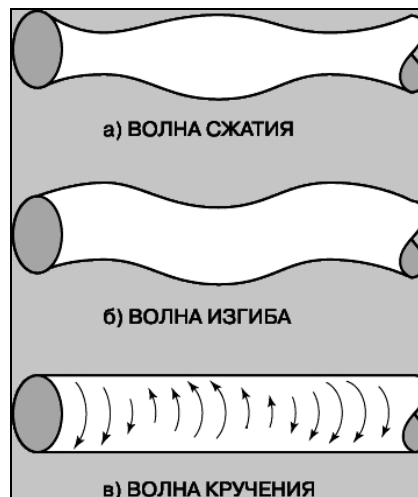


Рис. 3. Возможные типы волн в стержневых объектах при а) сжатии, б) изгибе и в) кручении

В твердых телах скорость продольных волн равна:

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

где E – модуль Юнга, характеризующий упругие свойства вещества, ρ – плотность материала.

Скорость распространения волн в жидкостях зависит от коэффициента сжимаемости жидкостей:

$$C = \sqrt{\frac{1}{\beta \rho}}$$

где ρ – плотность жидкости; β – коэффициент адиабатической сжимаемости, равный отношению изменению объема $\Delta V/V$ при изменении давления на ΔP .

Так скорость распространения упругих (акустических) волн в воде и мягких биологических тканях – около 1500 м/с, в костной ткани – примерно 3500 м/с. Скорости объемных продольных и поперечных волн зависят от механических свойств материала, в котором они распространяются. Скорость Р-волн примерно в два раза больше скорости S- волн:

$$C_l = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad C_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

где C_l – фазовая скорость продольной волны, C_t – скорость поперечной волны λ и μ – постоянные Ламе, ρ – плотность материала. Коэффициент λ описывает напряжения при изменении объема. Константа μ характеризует сдвиговые деформации и называется модулем сдвига. Индексы у скоростей соответствуют английским названиям волн (longitudinal и transversal, соответственно).

Поверхностные волны распространяются вдоль свободной поверхности тела или вдоль границы твердого тела с другими средами и затухают при удалении от нее. Они локализируют энергию возмущений, созданных на поверхности, в сравнительно узком приповерхностном слое. В биологических тканях возможно несколько типов поверхностных волн, основные из которых волны Рэлея и Стоунли.

Волны **Рэлея**, теоретически открытые Дж. Рэлеем (J.W. Rayleigh) в 1885 г., [9] могут существовать в твердом теле вблизи его свободной поверхности. Фазовая скорость данной волны параллельна поверхности и составляет порядка $0,9 C_l$. При этом частицы колеблются по эллиптической траектории в плоскости перпендикулярной поверхности (рис. 4-А). Волны **Стоунли** распространяются вдоль плоской границы двух твердых полупространств, мало различающихся по модулю упругости и плотности. Они описаны Стоунли (R. Stoneley) в 1924 г. Эта волна состоит, как бы из двух рэлеевских волн (рис. 4-Б). Фазовая скорость волны меньше скоростей продольной и поперечной волн в каждой из сред. Следует отметить, что в среднем волны давления несут 7% энергии, волны сдвига – 26%, а волны Рэлея – 67 % [5]. Разрушительные эффекты поверхностных волн находятся на этапе изучения, но, безусловно, их следует искать на границе контактных слоев.

Для огнестрельной, взрывной травмы, травмы ускорения и автотравмы характерен импульсный тип нагружения. При этом контакт между травмирующим предметом и телом составляет мили - и микросекунды.

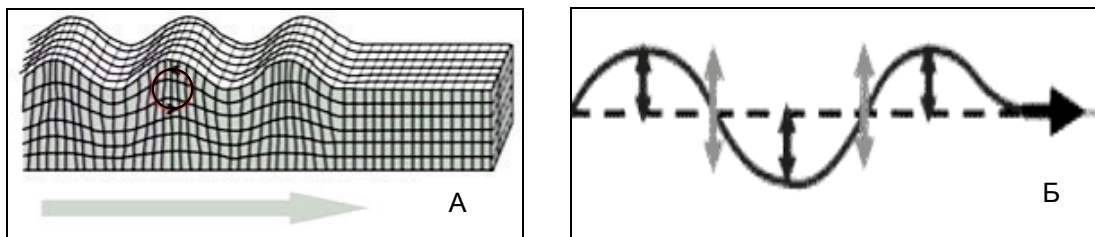


Рис. 4. Характер распространения поверхностных волн: А- волна Рэлея; Б - волна Стоунли.

Одним из ведущих критериев, отличающих динамическое (импульсное) и квазистатическое нагружение является сравнение времени возрастания нагрузки до максимума T_{\max} и времени двойного пробега звуковой волны по конструкции $2L/C$ (где L –линейный размер конструкции, C - скорость звука в среде). Для квазистатических процессов данное соотношение имеет вид $T_{\max} > 2L/C$, для динамического $T_{\max} < 2L/C$. Разрушения при импульсном нагружении конструкции отличаются от разрушений, в рамках квазистатических процессов. Во-первых, при импульсах короткой продолжительности ни одна образующаяся трещина еще не успевает развиться, а импульс уже проходит и напряжения снимаются. Это связано с тем, что скорость распространения трещин меньше скорости распространения импульса. Во-вторых, при коротком импульсе в любой момент времени только малая часть образца находится в напряженном состоянии и разрушения могут образовываться в одной области независимо от того, что происходит в другом месте конструкции. В-третьих, когда импульс сжатия падает на свободную границу, он приводит к образованию отраженной волны. Интерференция таких отраженных импульсов может привести к возникновению напряжений достаточно больших, чтобы произвести разрушение в материале. В зависимости от распределений напряжений в теле разрушение может быть двух типов: отрыв (откол) и сдвиг. Разрушение сдвигом является вязким, связано с касательными напряжениями и проходит по направлению максимального сдвига, поверхность которого ориентирована под углом 45° к главным напряжениям. На данный тип разрушения влияет форма носовой части ударника (снаряда), тип нагрузки, скорость деформации и механические свойства мишени. Откольные явления

происходят благодаря лишь волновым процессам и связаны с взаимодействием отраженной волны с падающей волной сжатия.

ВЫВОДЫ. Механическую травму с импульсным характером нагружения следует рассматривать с учетом волновой динамики. Такая необходимость связана с качественно иными механизмами разрушения, в основе которых лежит взаимодействие упругих, пластических и ударных волн. Данный подход позволит экспертам не только переосмыслить механогенез огнестрельной, взрывной травмы, травмы ускорения, но и выявить новые диагностические признаки.

Литература

1. **Зукас** Дж. А. Динамика удара. – М., 1985. - 275 с.
2. **Канель** Г.И., Разоренов С.В. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К. - 1996. - 408 с.
3. **Кинслоу** Р. Высокоскоростные ударные явления. – М.: Мир.- 1973. - 531 с.
4. **Кулеш** М. А., Шардаков И.Н. Волновая динамика упругих сред. Перм. ун-т. П, 2007. - 60 с.
5. **Морозов** Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения. – М.: Машиностроение, 1999. - 544 с.
6. **Озерецковский** Л.Б., Гуманенко Е.К., Бояринцев В.В. Раневая баллистика. История и современное состояние огнестрельного оружия и средств индивидуальной бронезащиты – СПб., 2006. – 321 с.
7. **Попов** В.Л., Дыскин Е.А. Раневая баллистика. - СПб., 1994. – 3115 с.
8. **Попов** В.Л., Шигеев В.Б., Кузнецов Л.Е. Судебно-медицинская баллистика. - СПб., 2002.
9. **Lord Rayleigh** On Waves Propagated along the Surface of an Elastic / Rayleigh Lord// Solid. Proc. London Math. Soc. - 1885. - S1-17 (1): 4-11.

МЕХАНИЧЕСКАЯ ТРАВМА С ПОЗИЦИЙ ВОЛНОВОЙ ДИНАМИКИ

С.В. Леонов, А.В. Михайленко, А.В. Никитаев

Резюме. Выявлены особенности распространения объемных и поверхностных волн в биологических тканях при механической травме. Рассмотрены основные процессы взаимодействия волн, ответственные за разрушение тканевых структур. Установлена возможность и необходимость применения основ волновой динамики применительно к механической травме с импульсным характером нагружения.

Ключевые слова: продольные волны, волны сдвига, поверхностные волны, волны Рэлея, волны Стоунли, волновая динамика, интерференция волн, механическая травма, откольные явления, огнестрельная травма.

MECHANICAL INJURY FROM THE POINT OF WAVE DYNAMICS

S.V. Leonov, A.V. Mixaylenko, A.V. Nikitayev

Summary. Identified characteristics of volume and surface waves in biological tissues by mechanical injury. Examined the main processes of interaction of waves that are responsible for the destruction of the tissue structure. On the example of gunshot wounds flat bones examined spall processes and identified their wave nature. Established the possibility and the need for a framework of wave dynamics in relation to mechanical trauma with pulsed mode of loading.

Keywords: longitudinal waves, shear waves, surface waves, Rayleigh waves, Stoneley waves, wave dynamics, mechanical injury, gunshot injury.

УДК 616.718-001.5-091:611.718

ОСОБЕННОСТИ ПОВРЕЖДЕНИЯ КОСТЕЙ СКЕЛЕТА НАСЕЛЕНИЯ ГЕНУЭЗСКОЙ КОЛОНИИ XIII-XIV в.в. ГОРОДИЩА «МИРМЕКИЙ»

Пономарев Д.Ю., Никитаев А.В.

Керченское районное отделение Крымского Республиканского учреждения
«Бюро судебно-медицинской экспертизы»

Резюме. Проведено исследование костных останков, обнаруженных в ходе археологической экспедиции на античном городище Мирмекий. Проведен анализ травмы костей скелета. На примере рубленых повреждений проведена реконструкция событий с использованием 3-D моделирования. Показаны перспективы и необходи-