

# Кинематика травмы

John P. Hunt ■ Sharon L. Weintraub ■ Alan B. Marr

Кинематика — раздел механики, изучающий движение тела или системы тел вне зависимости от их массы и от сил, воздействующих на них. От греч. *kinma*, *kinmat* — «движение».<sup>1</sup>

Как можно догадаться по происхождению слова, суть кинематики заключается в изучении движения. Все повреждения, за исключением температурных и радиационных, связаны с взаимодействием пострадавшего и движущегося объекта. Классическая механика объясняет многие травмы и типы получения травм, как проникающих, так и тупых, с учетом анатомических особенностей и физических свойств тела пострадавшего. Травма связана не только с энергией повреждающего объекта, но и с тем, как именно этот объект воздействовал на пострадавшего. Такие обстоятельства травмы, как положение пострадавшего в кабине транспортного средства в момент аварии и особенности конкретной аварийной ситуации или траектория полета пули и расположение пострадавшего, формируют специфические виды получения травм. Знание деталей события, приведшего к травме, может помочь лечащему врачу выявить скрытые, но ожидаемые в данных обстоятельствах повреждения.

Материал в этой главе изложен поэтапно. В первую очередь будет проведен обзор основополагающих законов физики и материаловедения, определяющих взаимодействие между пострадавшим и травмировавшим его предметом. После этого будут рассмотрены подробнее проникающие и тупые травмы, а также будут описаны механизмы травм, характерные для конкретных органов и частей тела. Авторы надеются, что это даст читателю более полное представление о видах травм, и о том как возникает травматическая ситуация и к каким повреждениям она может привести.

## ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ

### Законы Ньютона, импульс, количество движения, энергия и работа

Первый закон Ньютона утверждает, что всякое тело продолжает удерживаться в состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние. Первый закон Ньютона принят в качестве определения понятия инерции. Второй закон Ньютона основан на первом, он определяет, что сила ( $F$ ) есть произведение массы тела ( $m$ ) и его ускорения ( $a$ ).

$$F = ma$$

Сила воздействует на тело не мгновенно, а в течение определенного времени. Если обе части приведенного выше уравнения привести ко времени, то мы получим следующее равенство:

$$F(t) = ma(t)$$

Произведение силы и времени известно как импульс, а приведение ускорения ко времени дает нам понятие скорости. Количество движения ( $p$ ) определяется как произведение массы тела ( $m$ ) на его скорость ( $v$ ).

$$p = mv$$

Следовательно,

*Импульс — это изменение количества движения*

Важным моментом является то, что воздействие импульса приведет к изменению количества движения, и, аналогичным образом, изменение количества движения приведет к возникновению силы.<sup>2</sup> Эти умозаключения приводят нас к третьему закону Ньютона, который утверждает, что любому действию (силе) всегда есть равное и противоположно

направленное противодействие.<sup>3</sup> В качестве примера, иллюстрирующего это утверждение, можно привести ситуацию, когда два тела с одинаковой массой движутся навстречу друг другу с одинаковой скоростью, а в момент столкновения друг с другом их скорости падают до нуля. При этом согласно второму закону Ньютона, каждое тело воздействует на другое тело, приводя к изменению их количества движения. Описанное иллюстрирует закон сохранения импульса, который утверждает, что сумма импульсов всех тел замкнутой системы остается постоянной, пока на систему не окажет свое воздействие какая-то внешняя сила. Количество движения этой двухобъектной системы после столкновения останется таким же, каким оно и было до воздействия.<sup>4</sup>

Следующими важнейшими законами являются закон работы и закон энергии. Работа ( $W$ ) определяется как сила, примененная на определенном расстоянии, и ее формула часто записывается следующим образом:

$$W = Fdx,$$

$$\text{где } F = ma, \text{ и } a = vdv/dx$$

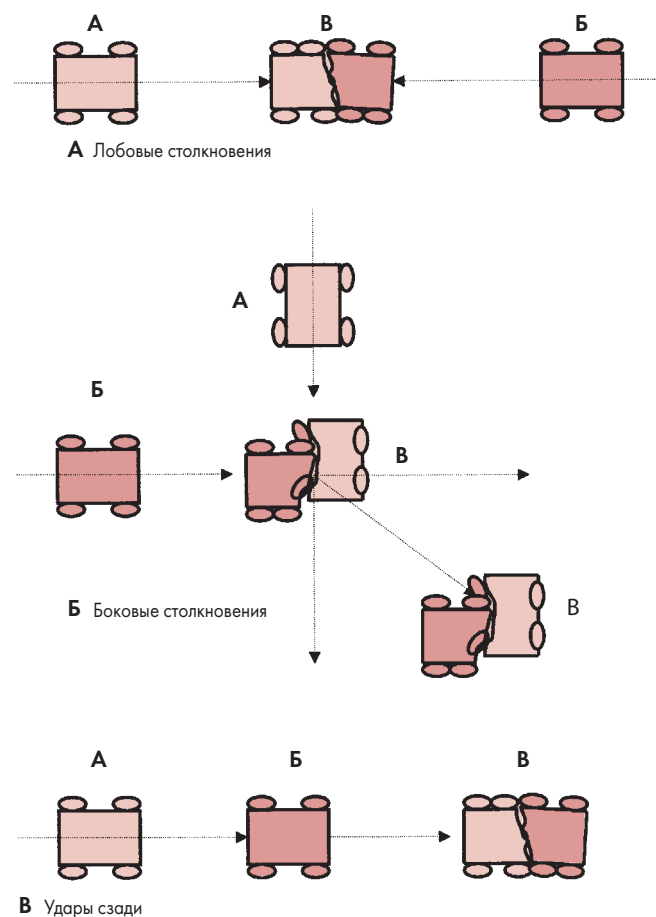
В результате чего, после произведения вычислений, мы получаем хорошо известную формулу расчета кинетической энергии:  $1/2mv^2$ .

$$W = 1/2mv_2^2 - 1/2mv_1^2$$

Таким образом, работа, совершаемая движущимся объектом, который взаимодействует с другим объектом, равняется кинетической энергии первого объекта до совершения работы минус кинетическая энергия после взаимодействия. Проще говоря, совершенная работа равняется изменению кинетической энергии первого объекта.<sup>5</sup> В случае, если в результате совершения упомянутой работы другое тело приходит в движение, то с этого момента это другое тело приобретает свою собственную кинетическую энергию, равную количеству совершенной работы. Джеймс Джоуль в 1840 г. сформулировал первый закон термодинамики, который гласит, что энергию нельзя ни создать, ни уничтожить.<sup>6</sup> Речь идет об эластичном столкновении, так как и кинетическая энергия, и количество движения сохраняются, а столкнувшиеся объекты не деформируются и не соединяются.

В травматологии большинство столкновений являются неэластичными. При неэластичных столкновениях сохраняется количество движения, но не кинетическая энергия. В таких ситуациях кинетическая энергия вызывает деформацию, причем такую деформацию, в результате которой может произойти взаимное проникновение столкнувшихся объектов и сформироваться единый объект. Ниже приведена иллюстрация неэластичного столкновения.

Передача энергии и сохранение количества движения может быть проиллюстрировано на примере столкновения двух автомобилей (см. рис. 7-1). На схеме А представлено лобовое столкновение двух автомобилей, имеющих одинаковую массу и скорость, а следовательно, одинаковую кинетическую энергию и количество движения. Количества движения действительно одинаковы, однако они направлены в противоположных направлениях. Таким образом, суммарное количество движения системы до столкновения равняется нулю, и, по закону сохранения движения, это количество должно остаться равным нулю и после столкно-



**РИСУНОК 7-1.** Энергия и количество движения при различных типах автомобильно-дорожных происшествий. **А** При фронтальных столкновениях происходит максимальное изменение количества движения за минимальный промежуток времени, а следовательно, создаются максимальные силы. **Б** Боковые столкновения. Когда автомобили А и Б сталкиваются, получающееся в результате количество движения направляет их в их окончательное положение В, и присущие каждому из них количества движения рассеиваются по осям  $x$  и  $y$  на большее расстояние и в течение более длительного времени, что приводит к возникновению сил меньших, чем те, которые возникают в результате лобового столкновения. **В** Удары сзади. Так как автомобили в данном случае двигаются в одном и том же направлении, изменения в количествах движения и в производимых силах являются минимальными среди всех рассмотренных случаев.

вения. В результате столкновения оба автомобиля придут в состояние покоя. Это можно сравнить с тем, как если бы один из автомобилей врезался в неподвижную стену. В соответствии со вторым и третьим законами Ньютона внезапное лобовое столкновение порождает силу, которая в одинаковой степени воздействует на оба автомобиля. С учетом того, что итоговая скорость равняется нулю и итоговая кинетическая энергия равняется нулю, можно сделать вывод, что вся кинетическая энергия преобразовалась в работу, воздействие которой остановило другую машину и привело к деформациям, таким как разбитие стекла, изгибание металла, а также к проникновению инородных предметов в пассажирский салон. Если количество движения у ав-

томобилей А было больше, чем оно же у автомобиля Б, по причине того, что у автомобиля А была большая масса или большая скорость, то в этом случае результирующая масса В будет иметь остаточное количество движения, направленное в том направлении, в котором до столкновения двигался автомобиль А.

При боковом столкновении направления движения автомобилей А и Б перпендикулярны друг другу. Следовательно, по оси, по которой направлено движение автомобиля А, автомобиль Б имеет количество движения, равное нулю, а по оси, по которой направлено движение автомобиля Б, автомобиль А имеет движение, равное нулю. Образовавшийся в итоге конгломерат В сохраняет количество движения как автомобиля А, так и автомобиля Б, и направляет его в результирующем направлении, как это показано на рисунке 7-1 (Б). В результате столкновения описанного типа происходят изменения в количестве движения и в созданных силах значительно меньше, чем это характерно для лобовых столкновений. Образовавшаяся система В продолжает иметь свою скорость, а следовательно, и свою кинетическую энергию. Это означает, что некоторая часть первоначальной кинетической энергии не была преобразована в работу, и автомобилям, участвовавшим в столкновении, был нанесен меньший вред. Говоря в общем, чем ближе конкретное столкновение к лобовому, тем большие изменения происходят в количестве движения и, следовательно, тем большие силы создаются.

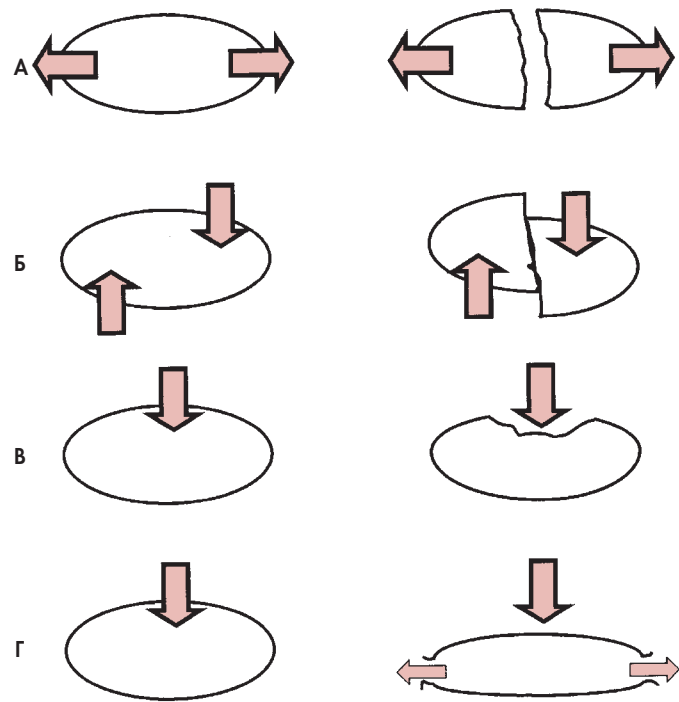
Что касается ударов сзади (рис. 7-1, В), то в этом случае автомобили обычно движутся в одном и том же направлении. Поэтому изменения в количестве движения и в создаваемых силах невелики настолько, насколько мало преобразование кинетической энергии в работу. Описанные выше принципы можно применить к столкновениям любого типа, идет ли речь о проникновении пули в тело пострадавшего, об автомобиле, сбившем пешехода, или о случаях, когда водитель разбивает лобовое стекло.

## СВОЙСТВА БИОМАТЕРИАЛОВ

### Давление, напряжение, эластичность и модуль Юнга

Давлением принято называть воздействие силы на некий материал, измеряемое в количествах силы, действующей на единицу площади. Такое давление может привести к деформации материала. Напряжение — это величина деформации, вызванной давлением, деленная на расстояние, к которому применялось давление.<sup>7</sup>

Напряжение может быть вызвано растяжением, сдвигом, сжатием или сдавливанием (близко к напряжению сжатия) (рис. 7-2). Напряжение при растяжении для определенной структуры или органа возникает тогда, когда к ним прилагается противоположно направленная сила. Силы противоположно направлены и сконцентрированы в определенной точке. В результате этого существенно нарушается целостность рассматриваемой структуры, и она разделяется на части.



**РИСУНОК 7-2.** Биомеханика повреждений. **А** Напряжение растяжения — противоположно направленные силы оказывают растягивающее действие по одной оси. **Б** Напряжение сдвига — противоположные силы оказывают сдавливающее или растягивающее действие, но не по одной оси. **В** Напряжение сжатия — напряжение, воздействующее на структуру и, как правило, приводящее к простым деформациям. **Г** Напряжение сдавливания — сдавливающие силы повышают давление внутри системы, выходя за пределы прочности.

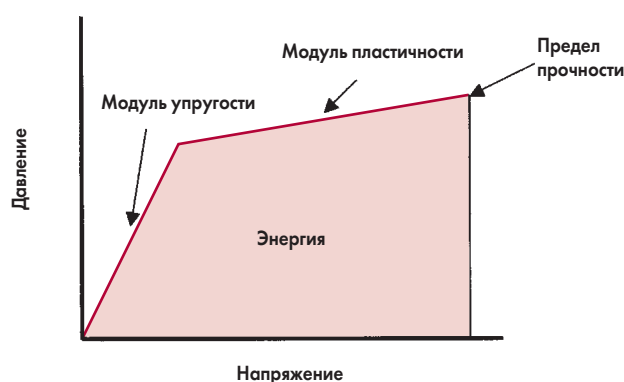
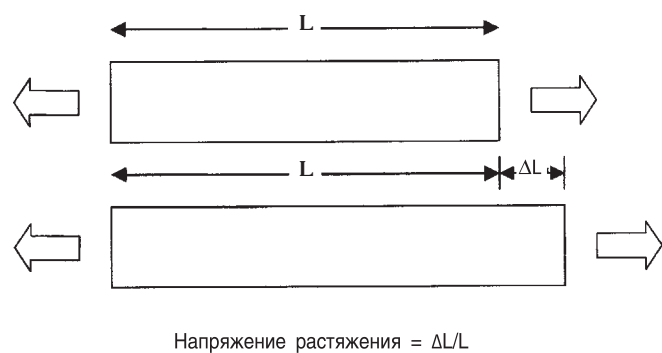
Напряжение сдвига происходит, когда противоположно направленные силы прилагаются к одной и той же структуре, однако прилагаются они к разным точкам в пределах этой структуры. К таким последствиям может привести воздействие противоположно направленных внешних сил или резкое изменение количества движения в пределах одной структуры или между двумя соединенными друг с другом структурами.<sup>8</sup>

Напряжение сжатия — это прямая деформация, происходящая в результате толчка или удара. Энергия, образующаяся при приложении силы, воздействует на структуру и вызывает ее повреждение в виде дробления, что, в свою очередь, приводит к деформациям и нарушениям целостности структуры органа.

Чрезмерное сдавливание — это тип напряжения сжатия, применяемого к газам или к жидкостным емкостям. Энергия, оказывающая свое воздействие на жидкостные или газосодержащие структуры, может деформировать ее и привести к уменьшению ее объема. Согласно закону Бойля

$$P_1 V_1 = P_2 V_2,$$

произведение давления и объема до приложения силы к системе должно быть равно произведению этих величин после воздействия указанной силы.<sup>4</sup> Таким образом, уменьшение



**РИСУНОК 7-3.** Понятие давления, напряжения, модуля эластичности, модуля пластичности, предела прочности и энергии на примере давления, приложенного к определенной структуре. Напряжение растяжения — это изменение длины материала под воздействием давления, разделенное на первоначальную длину. Это понятие применимо для напряжения сжатия и напряжения сдвига. Что касается взаимосвязи давления и напряжения, модуль упругости — это та часть кривой, где не происходит постоянной деформации, в отличие от модуля пластичности, где под воздействием растяжения возникает перелом или разрыв. Приложенная энергия — это область под кривой.

первоначального объема системы приведет к повышению давления внутри нее. Если же повышающееся давление, которое и является воздействующей силой, переходит предел прочности системы, она разрушается.<sup>9</sup>

Если на графике давление показывается как напряжение, то здесь можно видеть несколько вполне определенных аспектов. Модуль упругости в данном случае — это та часть кривой, в которой сила не приводит к постоянной деформации, а о материале можно сказать, что он остается более эластичным, если после завершения воздействия он способен вернуться в свое первоначальное состояние.<sup>10</sup> Часть кривой после этого именуется модулем упругости, он определяет устойчивость системы к постоянной деформации после завершения воздействия.<sup>11</sup> Растяжение, сдвиг и сжатие — это те уровни напряжения, при которых происходят переломы или разрывы.<sup>12</sup> Также это понятие известно под названием

«критическая точка». Область под линией кривой — это количество энергии, приложенной для достижения определенного уровня сжатия или напряжения (рис. 7-3).<sup>13</sup> Говоря в общем, чем больше уровень сопротивления конкретного материала, тем более низким уровнем эластичности он обладает и тем больше энергии передается ему в момент столкновения. Легкие не поглощают энергию, тогда как селезенка, печень и кости обладают такой способностью.<sup>14</sup>

## ПРОНИКАЮЩИЕ ТРАВМЫ И БАЛЛИСТИКА

Простым примером передачи энергии может служить изучение огнестрельного оружия и боеприпасов, именуемое баллистикой. Теодор Кохер первым предположил, что кинетическая энергия пули распространяется в четырех направлениях: собственно тепло; энергия, вызывающая перемещение ткани по внешнему радиусу; энергия, вызывающая формирование первоначальной траектории в результате прямого повреждения тканей; энергия, затрачиваемая на деформирование пули.<sup>15</sup> Несмотря на ограниченные технические возможности для изучения баллистики, Кохер был, по большей части, прав.

Наши более обширные знания о поведении пуль внутри цели получены, в основном, из наблюдений за движением пули в желатине. Физические свойства желатина близки к физическим свойствам мышц, и на основании опытов с ним можно сделать некоторые выводы о том, как энергия передается через ткани. В результате таких экспериментов были описаны некоторые характерные особенности проникновения пули в ткани. Среди них можно отметить следующие: а) глубина проникновения (расстояние, которое пуля проходит внутри тканей, соответствует расстоянию, которое пуля проходит с момента попадания в блок желатина и до того, как она остановится); б) разрыв (оценивается при рентгеноскопии, его величина определяется по разнице между весом всей пули до выстрела и весом собранных после выстрела ее осколков); в) постоянные полости (нарушение целостности тканей в результате прямого контакта с пулей и сохранение этих полостей в желатине); г) временные полости (степень «растяжения» при прохождении снаряда, оцениваемая на основании расстояния от края постоянной полости до внешней границы области трещин в желатиновом блоке).<sup>16</sup>

Действие пули и тяжесть повреждения зависит от трех факторов: скорости, конструкции пули, а также структуры цели.<sup>17</sup> Выдающийся хирург XVIII века Джон Хантер утверждал, что «если скорость шара мала, то и вред от него невелик, и имеется немного шансов на то, чтобы произошел перелом костей или нечто подобное». <sup>18</sup> Это пронизательное наблюдение отражает исключительную важность фактора скорости при определении количества кинетической энергии, которую конкретный снаряд может сообщить цели (кинетическая энергия =  $\frac{1}{2}mv^2$ ). А раз так, то высокоскоростные пули в большинстве случаев будут причиной более серьезных нарушений целостности тканей, чем менее скоростные. Скорости и кинетические энергии пуль, выпущен-

ных из наиболее распространенных типов огнестрельного оружия, перечислены в таблице 7-1.

Количество энергии (или работы), передаваемой снарядом ткани, равняется кинетической энергии снаряда в момент, когда он проникает в ткань, без кинетической энергии этого же снаряда в момент его выхода из ткани. Пули обладают исключительными аэродинамическими свойствами и практически не возмущают воздух при полете. До некоторой степени сходную ситуацию мы имеем и при перемещении пули в тканях (например, если пуля движется строго прямо и проходит через ткани навывлет, то цели в этом случае будут нанесены минимальные повреждения). Вред, наносимый пулей на пути ее перемещения, заключается в формировании постоянных и временных полостей. Временные полости — это мгновенное растяжение или смещение тканей на пути следования пули. Математически это можно обосновать таким образом, что область тупой травмы, окружающей траекторию пули и поврежденные ткани, соответствует значению модуля Юнга для эластичной деформации. Объем временных полостей увеличивается с увеличением скорости пули. Наибольшая часть временных полостей находится на поверхности, где скорость летящей пули является наибольшей.<sup>20</sup> Понятие временной полости использовалось для обоснования необходимости дополнительной тщательной санации тканей при ранениях, полученных от высокоскоростных снарядов. В действительности наблюдения за процессом заживления раны и эксперименты на животных, включающие в себя изучение тканей временных полостей под микроскопом, показали, что временное моментальное растяжение тканей не приводит к гибели клеток или разру-

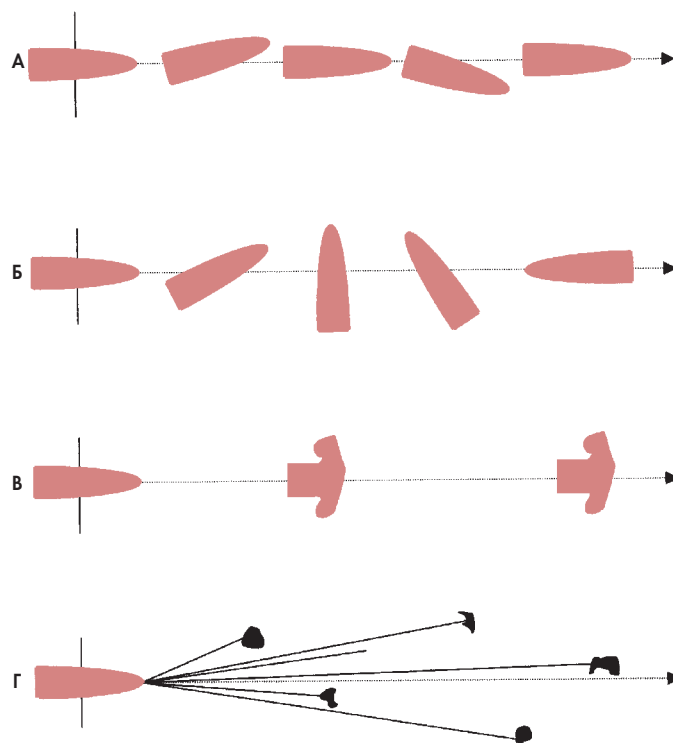
шению тканей.<sup>21</sup> А если так, то детальная санитарная обработка ран, полученных от высокоскоростных снарядов, может быть ограничена работой с явно нежизнеспособными тканями.

К образованию постоянных полостей приводит сдавливающее воздействие пули, и в данном случае взаимосвязь сдавления и напряжения тканей, вовлеченных в повреждение, — это пластическая часть модуля Юнга, или же участок кривой, находящийся за пределом прочности. Пули могут быть сконструированы таким образом, что их действие меняется, и постоянная полость увеличивается после попадания пули в цель. Повысить поражающую способность пули можно четырьмя способами, все они основаны на увеличении площади поверхности тканей, затронутых снарядом, что способствует передаче кинетической энергии цели. Сюда можно отнести: а) поворот, отклонение продольной оси движения пули от прямой линии; б) переворачивание, вращение пули вперед относительно центра тяжести; в) деформацию, сплющивание пули, что повышает ее диаметр, обычно примерно в два раза, увеличивает площадь поверхности, а значит, увеличивает площадь контакта с тканями в четыре раза (к деформациям способны снаряды с выемкой в головной части, тупоконечные пули с мягкой оболочкой, разрывные пули типа «дум-дум»); г) фрагментацию, когда

ТАБЛИЦА 7-1

Скорость и кинетическая энергия пули при выстреле из различных типов огнестрельного оружия

КАЛИБР	СКОРОСТЬ (ФУТОВ В СЕКУНДУ)	ЭНЕРГИЯ (ФУТОФУНТЫ)
<b>Короткоствольное оружие</b>		
0,25 дюйма	810	73
0,32 дюйма	745	140
0,357 дюйма	1410	540
0,38 дюйма	855	255
0,40 дюйма	985	390
0,44 дюйма	1470	1150
0,45 дюйма	850	370
9 мм	935	345
10 мм	1340	425
<b>Длинноствольное оружие/военное оружие</b>		
0,243/Винчестер	3500	1725
М-16	3650	1185
7,62 НАТО	2830	1535
УЗИ	1500	440
АК-47	3770	1735



**РИСУНОК 7-4.** Поворот, вращение, деформация и фрагментация. **А** Поворот отражает способность пули отклоняться во время полета от прямой линии; **Б** Вращение — это перевороты пули в полете «головной вперед» относительно своего центра тяжести; **В** Деформации происходят в момент выстрела и увеличивают площадь поверхности цели, контактирующей с пулей; **Г** Фрагментация представляет собой рассеивание осколков пули. Все четыре варианта увеличивают площадь поверхности цели, контактирующей со снарядом.

множественные осколки повреждают ткани во многих местах, увеличивая степень тяжести повреждений. Обычно все это происходит при воздействии высокоскоростных снарядов. Пули, не способные к фрагментации, будут иметь большую глубину проникновения, тогда как пуля, распавшаяся на фрагменты, не проникнет также же глубоко, но вызывает повреждение тканей на большей площади.<sup>22-24</sup> Если пуля способна поворачивать, вращаться, деформироваться или распадаться на фрагменты, то она, очевидно, вызовет более серьезные нарушения целостности тканей. Это происходит не на поверхности, а в глубоких структурах (см. рис. 7-4).

Для определения степени тяжести ранения также используются характеристики поврежденных тканей.<sup>25</sup> Причем при оценке степени тяжести повреждений эластичность тканей — это более важный признак, чем количество энергии, сообщенной этим тканям.<sup>26</sup> Разрушение постоянных полостей и растяжение, вызванное образованием временных полостей, лучше выдерживается и компенсируется более эластичными тканями, такими как ткани легких, в отличие от более жестких тканей, таких как костная ткань. Ножевые ранения характеризуются очень малым количеством сообщенной энергии, и для них характерно образование только постоянных полостей. В том случае, если тканям сообщается лишь небольшое количество энергии, причиной серьезных повреждений является прямой удар по жизненно важным органам, таким как сердце, магистральные сосуды, легкие или органы брюшной полости.

## МЕХАНИЗМЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТУПЫХ ТРАВМ И ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Механизмы передачи энергии и приложения сил в случае тупых травм гораздо более сложны, чем механизмы, характерные для проникающих повреждений. Среди наиболее часто встречающихся механизмов тупых травм — дорожно-транспортные происшествия, ситуации, когда транспортное средство сбивает пешехода, а также падения со значительной высоты. В этих условиях происходит воздействие различных типов энергий и сил, причем как со стороны пострадавшего, так и со стороны того объекта, с которым произошло столкновение. Среди других обстоятельств, которые осложняют процесс оказания надлежащей помощи пострадавшему, значительную роль играет большая площадь поверхности, по которой распространяется энергия, по сравнению с проникающими травмами, а также большее количество точек контакта с повреждающим объектом, что способствует более значительному распространению энергии в теле пострадавшего. Взаимодействия и направления векторов силы и распространения энергии часто обуславливают специфику повреждений.

### Дорожно-транспортные происшествия

Хотя зачастую не так-то просто определить вектор энергии и силы, оказавших воздействие на пострадавшего во время дорожно-транспортного происшествия, смертность в результате таких несчастных случаев напрямую связана с об-

щим количеством такой энергии и силы. Это хорошо видно из того, что смерть в результате дорожно-транспортных происшествий чаще наступает вследствие лобовых столкновений, летальность при которых достигает 60%. Далее по нисходящей располагаются боковые столкновения (20–35% смертельных исходов), перевороты автомобиля (8–15%) и удары в заднюю часть автомобиля, при которых уровень смертности наиболее низок (3–5%).<sup>27,28</sup> Уровень смертности в результате переворачивания автомобиля меньше, чем можно ожидать, потому что при таких происшествиях количество движения рассеивается, а силы, возникающие и воздействующие на салон автомобиля, распространяются бессистемно и затрагивают многие другие части автомобиля. Хотя существуют определенные силы и способы обмена энергией, характерные для дорожно-транспортных происшествий, само транспортное средство дает некоторую степень защиты от прямого воздействия сил, возникающих при столкновении. Пострадавшие, которых выбросило из автомобиля, имеют скорость самого автомобиля, так как им было сообщено значительное количество движения. Такие пострадавшие обычно ударяются о неподвижный объект или об землю и испытывают воздействие достаточно серьезных нагрузок. Пострадавшим, вылетевшим из автомобиля, в четыре раза чаще требуется госпитализация в палату интенсивной терапии, для них характерны более высокие средние значения по шкале оценки тяжести повреждений (в пять раз), у них в три раза выше вероятность получения тяжелых черепно-мозговых травм и в пять раз более вероятно развитие вторичных повреждений.<sup>29</sup>

Крайне важно понимание изменений в количестве движения, воздействующих сил, а также типов энергии, обмен которыми происходит между столкнувшимися автомобилями. Тем не менее выявить специфические типы повреждений помогает именно поведение пассажиров, находящихся в салоне автомобиля, под влиянием всего вышеперечисленного. При фронтальных столкновениях скорость передней части автомобиля резко падает, в то время как непристегнутые пассажиры, сидящие на передних сиденьях, продолжают двигаться вперед, в соответствии с первым законом Ньютона. Прежде всего, действуют нагрузки на нижние конечности, особенно на стопы и колени, так как пол и крылья автомобиля продолжают движение вперед. Поэтому относительная скорость сближения и изменение в количестве движения остаются небольшими. Контакт грудной клетки и головы с рулевой колонкой и лобовым стеклом в результате столкновения происходит позже, а, следовательно, скорости сближения и замедления, изменения в количестве движения и воздействующих сил — все эти показатели будут значительно больше.<sup>27,30</sup>

Типы повреждений зависят от пути, который проделывает пострадавший. Если пострадавший сползет под рулевую колонку и перегородку между двигателем и кабиной, первыми в контакт с перегородкой войдут колени, в результате чего может возникнуть задний вывих и повреждение подколенной артерии. Далее могут быть повреждены верхняя часть живота и грудная клетка. Сдавление и длительное движение паренхиматозных органов приводит к повреждениям

печени и селезенки. Сдавление грудной клетки может привести к переломам ребер, к травмам сердца или к пневмотораксу из-за того, что легкие могут лопнуть, как бумажный пакет. И наконец, внезапная остановка может привести к тому, что воздействие деформирующих сил вызовет смещение грудной аорты, что, в свою очередь, может стать причиной ее частичного или полного разрыва. Другой типичный путь, который может проделать пострадавший, — это перевернуться через рулевую колонку. В этом случае основной удар приходится на голову, которой пострадавший резко ударяется о лобовое стекло, так, что на нем расходятся трещины. В этой ситуации весьма вероятно возникновение прямых повреждений мозга, мозг может удариться о черепную коробку, что приведет к его смещению и повреждению от противоудара. Как только голова останавливается, силы начинают воздействовать на шею, что может привести к ее переразгибанию или к компрессионным повреждениям, в зависимости от угла воздействия. Как только останавливаются голова и шея, грудная клетка и брюшная полость ударяются о рулевую колонку, и итогом такого удара становятся такие же повреждения, как были описаны выше, когда речь шла о ситуации, в которой пострадавший сползает под рулевую колонку.

Боковые удары, особенно со стороны сидящего пассажира, могут иметь крайне серьезные последствия из-за того, что расстояние между врезавшимся автомобилем и пассажиром минимально. Следовательно, сопротивление медленному нарастанию количества движения врезавшегося автомобиля до его столкновения с пассажиром ограничено. Если боковая часть автомобиля, в котором сидит пассажир, обеспечивает минимальное сопротивление, то последний может подвергнуться воздействию всего количества движения врезавшегося автомобиля. Удар обычно приходится на боковую поверхность грудной клетки, живота и таза. Поэтому повреждения органов брюшной полости и грудной клетки происходят значительно чаще в результате боковых ударов, чем при фронтальных столкновениях.<sup>31</sup> Повреждения грудной клетки включают в себя переломы ребер, смещение фрагментов ее костного каркаса, а также ушибы легких. Боковое сдавление нередко является причиной повреждения печени, селезенки и почек. Наконец, может произойти смещение головки бедренной кости в вертлужной впадине.

Удары в заднюю часть автомобиля обычно связаны с повреждениями шейного отдела позвоночника в результате резкого удара, они являются весьма наглядным примером, иллюстрирующим действие первого закона Ньютона. Когда в автомобиль пострадавшего что-то врезается сзади, тело, поддерживаемое сиденьем, приобретает ускорение в направлении «спина–грудь» с изменением количества движения, чего нельзя сказать о голове. Сила инерции продолжает удерживать голову в состоянии покоя. Значительный рывок тела вперед вызывает резкое отклонение головы назад, что приводит к переразгибанию шеи. Такой тип повреждений можно наблюдать и при лобовых столкновениях, когда внезапное замедление тела при том, что голова продолжает двигаться вперед, сменяется смещением назад в результате отскока.<sup>32, 33</sup>

## Травмы пешеходов

Основные типы травм пешеходов хорошо известны и зависят от размеров транспортного средства и пострадавшего. Около 80% взрослых людей, сбитых автомобилем, получают повреждения нижних конечностей. Это вполне очевидно, ведь высота бампера большинства автомобилей находится как раз на уровне коленей взрослого человека. Это первая точка на теле пострадавшего, которая вступает в контакт с автомобилем в момент столкновения, следовательно, наибольшая сила действует как раз на нижние конечности. Если такой же удар пострадавший получает от грузового автомобиля или другого транспортного средства с более высоким центром массы, чаще возникают серьезные повреждения грудной клетки и живота, так как первый удар приходится именно по этим частям тела. При взаимодействии машины и пешехода сила, приложенная в область коленей, приводит к ускорению нижней части тела, в то время как телу и голове это ускорение не сообщается и они, следуя первому закону Ньютона, продолжают оставаться в состоянии покоя. Нижние конечности, получив резкий толчок вперед и выступая в качестве оси, бросят тело и голову пострадавшего на капот автомобиля — результат приложения сил второго порядка к этим частям тела. Типичными травмами в этом случае являются переломы большеберцовых и малоберцовых костей, переломы ребер, разрыв селезенки, а также повреждения головного мозга.<sup>34, 35</sup>

## Падения

Падения с высоты могут привести к воздействию на организм пострадавшего очень значительных сил. Энергия, приобретаемая телом пострадавшего в процессе падения, при приземлении становится кинетической энергией, величина которой напрямую зависит от высоты, с которой падает пострадавший. Согласно основной физической формуле, описывающей сохранение энергии падающего тела, произведение массы, гравитационного ускорения и высоты, потенциальная энергия до падения, равняется кинетической энергии при ударе тела об землю. Принимая во внимание тот факт, что масса и гравитационное ускорение для падающего тела остаются постоянными, скорость и, следовательно, количество движения и кинетическая энергия напрямую зависят от высоты, с которой происходит падение.<sup>4</sup> Чем больше изменение в количестве движения в результате падения, тем больше воздействие нагрузки или силы на тело пострадавшего. Конкретные виды повреждений будут значительно различаться между собой в зависимости от того, какая именно часть тела пострадавшего ударилась о землю первой и как именно распределялась нагрузка.

Средняя высота, с которой падает пострадавший при типичной травме в результате свободного падения, составляет не более чем 20 футов. В одном из исследований были обобщены данные о последствиях падения с высоты в интервале от 5 до 70 футов. 72,6% от всех повреждений составили переломы, из них 19–22% — переломы позвоночника, в 3,7% случаев были отмечены неврологические расстройства.<sup>36</sup> Около 6% пострадавших имели повреждения органов брюшной полости, в большинстве случаев потребовалось

оперативное лечение. Менее чем в 1% случаев отмечены разрывы кишечника и мочевого пузыря.<sup>37</sup>

## АНАТОМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

### Травмы головы (черепно-мозговые и челюстно-лицевые травмы)

Большинство закрытых травм черепа происходят в результате дорожно-транспортных происшествий, в США их частота составляет примерно 1,14 миллиона случаев ежегодно.<sup>38,39</sup> Степень тяжести травматического повреждения головного мозга представляет собой основной, наиболее важный фактор, влияющий на вероятность смертельного исхода и нетрудоспособность после травмы. Кроме того, этот показатель может влиять на вероятность смертельного исхода при сопутствующих внечерепных травмах.<sup>33,40,41</sup> Наши знания в области биомеханики повреждений головного мозга основываются на данных экспериментов на свинных головах, использовании двухмерных высокоскоростных рентгеновских аппаратов и применении компьютерных конечноэлементных моделей.<sup>42</sup>

Широкое понятие травматического повреждения головного мозга охватывает огромное количество механизмов травм. Все они являются следствием нагрузок, которые испытывает голова пострадавшего, что, в свою очередь, приводит к воздействию различных замедляющих сил на головной мозг. Повреждение головного мозга может стать следствием удара или прямого сдавливающего воздействия. Непрямой компонент повреждения головного мозга со стороны, противоположной удару, известен как «повреждение в результате противоудара». Это происходит вследствие того, что мозг не жестко связан с черепом. Если к голове была приложена сила, вызвавшая в точке удара компрессионное напряжение и приведшая череп в движение вдоль вектора направления силы, то движение головного мозга внутри черепной коробки запаздывает. В результате черепная коробка приходит в состояние покоя или даже немного отдает назад, а мозг, все еще продолжающий движение вдоль оси первоначальной нагрузки, ударяется о свод черепа, при этом возникает новое напряжение сдавливания. Существование ударно-противоударного механизма повреждения доказывается клиническими наблюдениями и подтверждается трехмерными моделями головы, а также данными, полученными в результате испытаний с повышенным давлением на трупах.<sup>43</sup> Также существует предположение о том, что ускорение мозга относительно черепной коробки может привести к растягивающим деформациям вен, что может стать причиной их повреждения и формирования субдуральных гематом.<sup>44</sup>

Повреждения верхних отделов головного мозга действительно можно объяснить с помощью этих линейных принципов, однако повреждения более глубоких структур мозга, такие как диффузное повреждение аксонов (ДПА), значительно более сложны. Несколько исследователей предприняли попытку объяснить ДПА как следствие деформации

сдвига между различными отделами головного мозга, однако существует и другая модель, известная как «стереотаксический феномен». Эта модель основана на принципах распространения волн, и в ней вогнутая поверхность черепа выступает в качестве «коллектора», где различные волны фокусируются и направляются в очаг внутри головного мозга, вызывая нарушения целостности тканей, причем даже в случаях минимальных повреждений на поверхности головного мозга.<sup>45</sup> Это «распространение волн» внутри глубоких структур головного мозга вызывает нарушение их структурной целостности, и в этом видят причину потери сознания, которая является одним из наиболее серьезных признаков тупой черепно-мозговой травмы.<sup>46</sup> В результате деформации сдвига повреждение получает ствол мозга. Это можно объяснить воздействием противоположно направленных сил на головной мозг и позвоночник перпендикулярно их осям, при том что ствол мозга и позвоночник являются относительно неподвижными по сравнению с мобильным головным мозгом.

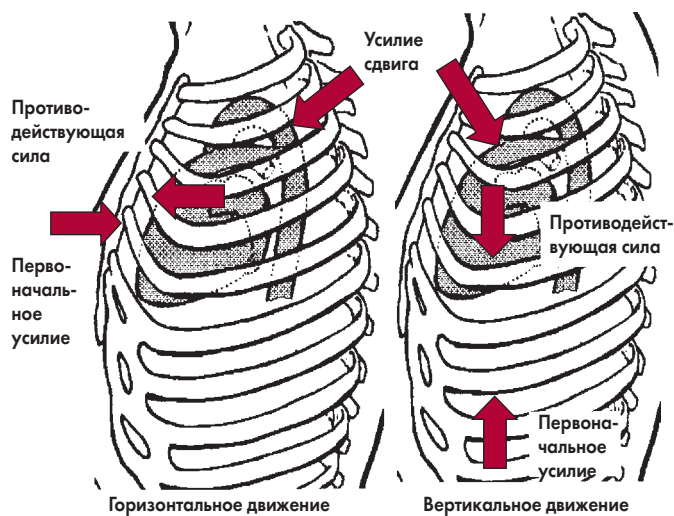
Челюстно-лицевые травмы механически связаны с повреждениями головы и мозга и представляют собой достаточно типичное следствие травм, полученных в результате дорожно-транспортных происшествий. Классический вектор силы, приводящей к переломам средней части лица, аналогичен тому, который является причиной травматических повреждений головного мозга, и сила, направленная по этому вектору, начинает действовать при ударе пассажира автомобиля о рулевую колонку, приборную панель или о лобовое стекло. Практически все эти виды повреждений являются вторичными по отношению к напряжению сдавливания. Такой механизм получения травм приводит к самой высокой летальности среди водителей и пассажиров, находящихся на переднем сиденье; на заднее сиденье разрушительные силы воздействуют в меньшей степени.

### Повреждения грудной клетки

Основным механизмом получения тупых травм грудной клетки является вдавление стенок туловища внутрь в результате внешнего воздействия. Степень тяжести скелетно-мышечных повреждений грудной клетки зависит как от величины и степени деформации стенок грудной клетки, так и от степени сдавливающего усилия, приложенного извне. Типы повреждений органов грудной клетки зачастую отражают взаимодействия между теми органами, которые располагаются относительно неподвижно, и теми, которые более мобильны и подвержены сдавлению. Такая точка зрения допускает различия в количестве движения между смежными структурами, приводящими к напряжению сдавливания, растяжения или сдвига.

В результате деформации грудной клетки тупым ударом реберный корсет вдавливается внутрь. В зависимости от силы и степени воздействия при столкновении с травмирующим агентом, ребра могут сломаться в результате сдавливающего напряжения, воздействующего на их внешнюю поверхность, и последующего напряжения растяжения с их внутренней стороны. Более того, волны напряжения могут проникать глубже в грудную клетку, вызывая неболь-





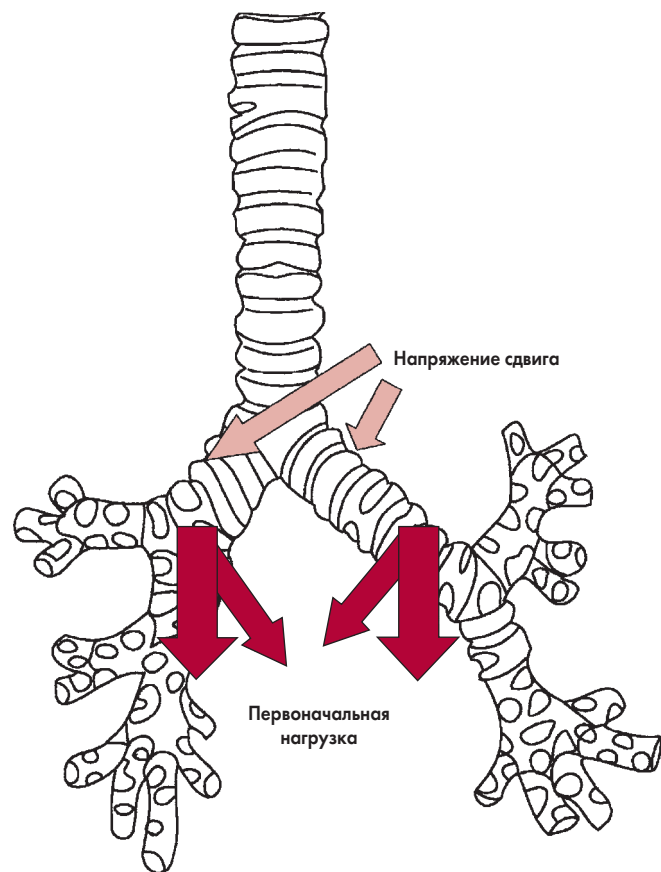
**РИСУНОК 7-5.** Различные механизмы повреждения грудной аорты. При горизонтальном смещении сердца дуга аорты смещается горизонтально в сторону от ее нисходящей части, что приводит к возникновению напряжения сдвига, а также к разрыву соединительных связок. Вертикальное перемещение приводит к смещению сердца по направлению к нижней части тела, что, в свою очередь, является причиной создания напряжения вдоль аорты.

шие быстрые деформации, или сдвиговые усилия, в органах, имеющих значительный перепад давления на протяжении их поверхности (например, граница между воздухом и тканями на поверхности легких). Описанный выше сценарий рассматривается в качестве механизма возникновения ушиба легкого.

Тупое воздействие на грудную клетку и податливость легких могут явиться причиной возникновения избыточного давления, и, как следствие, пневмоторакса. Прямая нагрузка, приложенная к грудной клетке, сдавливает легкие и повышает давление в этом заполненном воздухом органе до уровня, превышающего предельные значения, в альвеолах и в висцеральной плевре. Такой механизм возникновения избыточного давления может привести к разрыву миокарда. Высокоскоростная рентгеновская съемка, применяемая при тупых травмах передней поверхности грудной клетки у свиней, показала, что сердце может подвергаться сдавлению до половины его размеров, при этом давление в его камерах может увеличиваться вдвое.<sup>47</sup> При достижении критической точки, происходит разрыв, который влечет за собой катастрофические последствия.

Существует несколько примеров развития не прямых повреждений, вызванных несинхронным смещением смежных, связанных между собой структур, и создания напряжения сдвига на контактирующих поверхностях.<sup>48</sup> Примерами такого механизма повреждений служат повреждения сосудов средостения и бронхов. Смещение грудной аорты — классический пример травмы при замедлении, спровоцированной действием сдвигающих сил. Такая травма может произойти в результате фронтального или бокового удара,<sup>49</sup> повреждения такого типа могут иметь место при про-

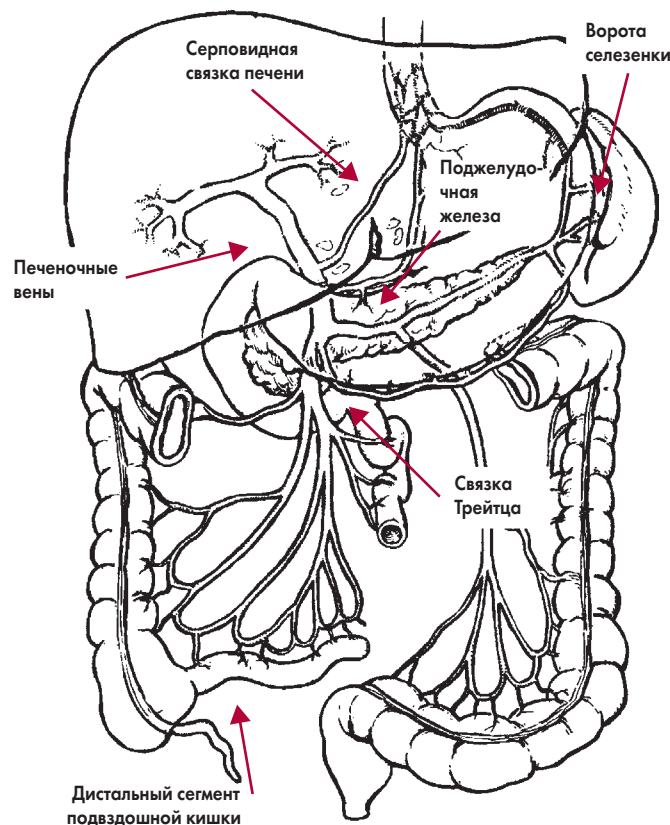
должительном движении достаточного мобильного сдавливаемого сердца относительно аорты, которая связана с другими, менее подвижными структурами. При фронтальном и боковом ударе сердце приходит в движение по горизонтали относительно аорты, которая связана с позвоночным столбом соединительными связками. Это является причиной возникновения сдвиговых усилий, действующих как раз на уровне этих связок. В том случае, когда давление оказывается в вертикальном направлении, например при падении с высоты, когда пострадавший приземляется на нижние конечности, возникает относительное несоответствие возникших смещений и на грудную аорту начинает действовать напряжение растяжения (см. рис. 7-5). Повреждение бронхов — еще один пример действия описанного выше механизма. Относительная податливость и мобильность легкого является причиной несоответствия количества движения в горизонтальной или вертикальной плоскости, в зависимости от тяжести воздействующей нагрузки, по сравнению со взаимосвязанными трахеей и ее килем. Это создает напряжение сдвига на уровне крупных бронхов (см. рис. 7-6), а также объясняет, почему большинство тупых повреждений бронхов затрагивают киль трахеи на глубину до 2 см.



**РИСУНОК 7-6.** Механизмы возникновения повреждений бронхов. Киль трахеи связан со средостением и позвоночником, в то время как легкие являются исключительно подвижным органом, что в совокупности приводит к возникновению напряжения сдвига в главных бронхах в ответ на горизонтальное или вертикальное смещение легких.

### Повреждения органов брюшной полости

Органы брюшной полости более уязвимы по сравнению с органами грудной клетки, защищенными грудиной и ребрами. Повреждения, наблюдаемые при тупых травмах органов брюшной полости, имеют несколько механизмов. Если говорить о паренхиматозных органах, то, вероятно, за наиболее часто наблюдаемые повреждения печени, селезенки и почек отвечает прямое сдавливающее усилие, разрушающее паренхиму. Силы сдвига также могут привести к разрывам этих органов. Как и в описанных выше случаях, для увеличения разницы в движении требуется точка приложения деформирующих сил. Это может произойти в селезеночном кармане в результате повреждения сосуда, в области сосудистых ножек или же в области соединительных связок почек и диафрагмы. Усилия сдвига в области печени спереди действуют на серповидную связку, а также на вены печени — сзади, этим можно объяснить частые повреждения паренхимы именно в этих областях. Другое значительное повреждение, вызванное этим механизмом, — повреждение почечной артерии. Почечная артерия отходит от брюшной аорты, которая является абсолютно неподвижной благодаря прочному соединению с позвоночником. С дистальной стороны артерия соединена с почкой, имеющей сравнительно большую подвижность. Разница в количестве движения между ними приводит к сдвиговым деформациям почечной



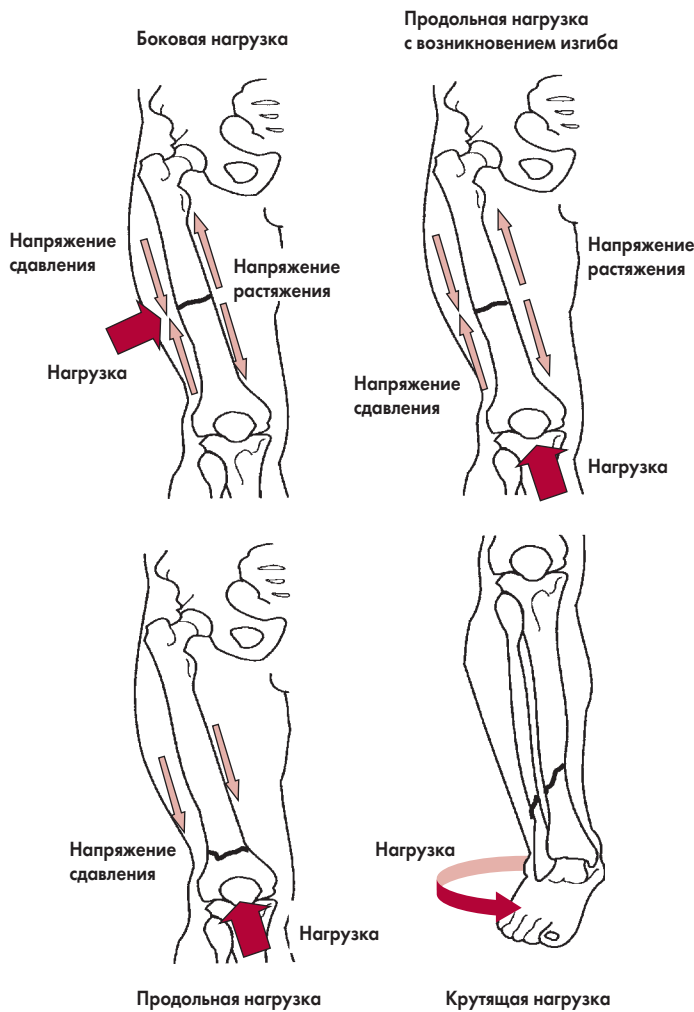
**РИСУНОК 7-7.** Точки возникновения напряжения сдвига при тупой травме живота. Такие точки возникают, если относительно неподвижная структура располагается рядом с более подвижной.

артерии, что, в свою очередь, может привести к ее разрыву.<sup>50</sup> Аналогичные силы действуют между позвоночником и поджелудочной железой (см. рис. 7-7). Позвоночник относительно неподвижен, хвост поджелудочной железы значительно мобильнее, и разница в количестве движения между этими двумя органами, приводит к повреждениям шейки или тела поджелудочной железы. Биомеханика такого типа повреждений предполагает, что способность тела противостоять воздействию сил понижается с возрастанием скорости воздействия. Чем выше скорость, на которой произошло столкновение, тем выше степень повреждений.<sup>13</sup> Примерно у 3% пострадавших отмечается перфорация полых органов при тупых травмах.<sup>51</sup> Причины таких повреждений до сих пор остаются предметом споров. Некоторые исследователи полагают, что это связано с воздействием сдавливающих сил, приводящих к декомпрессии при создании чрезмерно высокого давления. Другие считают, что такие повреждения являются вторичными последствиями действия напряжения сдвига. Оба объяснения выглядят достаточно правдоподобными, и клинические наблюдения подтверждают соответствующие выводы. Большинство повреждений тонкой кишки происходят в пределах 30 см от связки Трейца или от илеоцекального клапана, что служит подтверждением теории сдвиговых сил (см. рис. 7-7). Однако повреждения происходят и на значительном отдалении от указанных точек фиксации. Кроме того, экспериментально было установлено, что так называемая «псевдонепроходимость» временно перекрытого просвета во время воздействия нагрузки может привести к образованию разрушающего внутреннего давления, как это описано в теории чрезмерно высокого давления.<sup>53</sup> Вероятнее всего, в определенных обстоятельствах возможны оба описанных механизма. Наиболее типичным примером псевдонепроходимости является тупое повреждение двенадцатиперстной кишки, когда расположенный забрюшинно пилорический отдел может помешать нормальному перемещению газа и стать причиной возникновения повышенного давления, превосходящего прочность стенок кишки.

Другим важным примером избыточного давления можно считать разрыв диафрагмы. Очевидно, что закон Бойля действует и в брюшной полости. Значительное тупое воздействие силы, например при ударе передней брюшной стенки пострадавшего о рулевую колонку, приводит к временной деформации и уменьшению объема брюшной полости. В результате этого повышается внутрибрюшное давление. Нижняя точка брюшной полости — это диафрагма, левая сторона которой является основным участком сброса давления, так как печень поглощает давление и, таким образом, защищает правую сторону диафрагмы. Смещению левой половины диафрагмы способствует и относительная податливость легких.

### Костно-мышечные повреждения

Несомненно, наиболее распространенным типом тупых травм в индустриальных государствах являются повреждения костно-мышечной системы. Соотношение ортопедических операций и общехирургических, торакальных и ней-



**РИСУНОК 7-8.** Механизмы возникновения переломов.

рохирургических вмешательств составляет приблизительно 5:1. Как отмечалось ранее, использование ремней безопасности и воздушных подушек позволило в значительной степени снизить частоту тяжелых внутричерепных и внутрибрюшных повреждений; однако применение этих приспособлений не уменьшило частоты возникновения скелетно-мышечных травм. Повреждения такого типа обычно не смертельны, но зачастую требуют оперативного вмешательства и некоторого реабилитационного периода. Кроме того, в результате таких травм многие пациенты получают постоянную нетрудоспособность.<sup>54</sup> С принятием законов об обязательном использовании ремней безопасности и воздушных подушек в автомобилях частота возникновения травм нижних конечностей заметно увеличилась. Предполагается, что ранее эти пострадавшие получили бы несовместимые с жизнью травмы головного мозга и грудной клетки, а сопутствующие смертельным травмам переломы бедренных, большеберцовых и малоберцовых костей по понятным причинам не были бы включены в общий список повреждений.

Тип и степень тяжести повреждения определяются количеством движения и кинетической энергией при ударе,

основными характеристиками тканей, а также углом воздействия на конечность. Высокоэнергетические повреждения могут привести к значительным повреждениям мягких тканей в сочетании с нейро-сосудистыми повреждениями и многоосколочными переломами. Низкоэнергетические повреждения часто приводят к сдавлению и разрыву мягких тканей в сочетании с простыми переломами. Повреждения мягких тканей обычно возникают после сжимающего напряжения, приводящего, например, к их размозжению. Однако механизмы растяжения и сдавления имеют место и при возникновении скальпированных ран или при разрывах соответственно.

Большая часть того, что было сказано о костно-мышечных повреждениях, касается также и переломов длинных костей. Хотя практически каждый перелом является следствием воздействия целого комплекса давлений, сил и напряжений, существует четыре основных биомеханизма (см. рис. 7-8). При боковой нагрузке, приложенной примерно к середине длинной кости, в месте приложения нагрузки к компактному веществу кости, возникает изгиб и напряжение давления. При этом костная ткань с другой стороны кости будет испытывать напряжение растяжения, так как кость изгибается по направлению от точки приложения нагрузки. Сначала на поверхности кости, испытывающей напряжение растяжения, возникнут мелкие переломы, так как костная ткань хуже переносит напряжение растяжения, чем напряжение сдавления.<sup>55</sup> После достижения критической точки с той стороны кости, которая противоположна точке приложения нагрузки, значительно увеличивается напряжение сдавления, а при достижении критической точки со стороны кости, ближайшей к точке приложения нагрузки, происходит полный перелом. Этот механизм получения травм можно увидеть в действии у пассажиров при боковых ударах, у пешеходов, сбитых легковыми автомобилями и получивших удар в область большеберцовых и малоберцовых костей, а также при травмах верхних конечностей при прямо приложенной нагрузке, например, при ударе тупым предметом.

Боковая нагрузка, вызывающая «изгиб», создает напряжение растяжения на поверхности кости со стороны, противоположной точке приложения нагрузки, и напряжение сдавления на костной поверхности со стороны приложения нагрузки. Если продольное усилие приводит к изгибу, то возникает напряжение такого же типа. Если же изгиба не происходит, то все возникающее напряжение становится напряжением сдавления. Крутящая нагрузка приводит к винтообразному перелому.

При воздействии продольной нагрузки на длинную кость, также может возникнуть изгиб, а типы напряжения сдавления и напряжения растяжения будут такими же, как это было описано выше. Если же изгиба не происходит, то действует только напряжение сдавления, и может произойти компрессионный перелом. В области бедра такой перелом обычно бывает дистальным со смещением диафиза бедренной кости в мыщелок. Такие механизмы возникновения переломов можно увидеть при падениях с высоты, однако наиболее часто они встречаются при фронтальных ударах,