

Действие электрического тока на живую ткань носит разносторонний и своеобразный характер. Проходя через организм человека, электроток производит термическое, электролитическое, механическое, биологическое, световое воздействие.

Термическое воздействие тока характеризуется нагревом кожи и тканей до высокой температуры вплоть до ожогов.

Электролитическое воздействие заключается в разложении органической жидкости, в том числе крови, и нарушении ее физико-химического состава.

Механическое действие тока приводит к расслоению, разрыву тканей организма в результате электродинамического эффекта, а также мгновенного взрывоподобного образования пара из тканевой жидкости и крови. Механическое действие связано с сильным сокращением мышц вплоть до их разрыва.

Биологическое действие проявляется в раздражении и возбуждении живых тканей и сопровождается судорожными сокращениями мышц.

Световое действие приводит к поражению слизистых оболочек глаз.

Патофизиология

Традиционно тяжесть электротравмы зависит от факторов Ковенховена:

- Тип тока (постоянный или переменный)
- Напряжение и мощность (измеряют силу тока)
- Продолжительность воздействия (чем длительнее контакт, тем тяжелее травма)
- Резистентность организма
- Путь прохождения тока (определяет поврежденные ткани)

По новой концепции, сила электрического поля более точно прогнозирует тяжесть травмы.

Факторы Ковенховена

Переменный ток часто меняет направление; этот тип тока обычно снабжает электрические розетки в домах США и Европы. Постоянный ток не меняет своего направления; этот ток вырабатывается батареями. Дефибрилляторы и кардиовекторы обычно подают постоянный ток. То, как переменный ток воздействует на тело человека, зависит главным образом от его частоты. Переменный ток низкой частоты (50–60 герц [Гц]) используется в домашних сетях США – 60 Гц и в Европе – 50 Гц. Так как переменный ток низкой частоты вызывает сильное мышечное сокращение (тетанию), которое приводит к невозможности отнять руку от источника тока и соответственно увеличивает продолжительность его воздействия, подобный ток может быть более опасным, чем переменные токи высокой частоты, и в 3–5 раз опаснее постоянного тока такого же напряжения и силы. Постоянный ток, как правило, вызывает

однократное конвульсионное сокращение, которое часто отбрасывает пострадавшего от источника тока.

Как для переменного, так и для постоянного тока характерна закономерность: чем выше напряжение (В) и сила тока (А), тем серьезнее возникающая электротравма (при одной и той же длительности воздействия). Ток в домах США имеет от 110 В (стандартный электрический выход) до 220 В (применяется для больших приборов, например, холодильник, сушилка). Ток высокого напряжения (> 500 В) вызывает глубокие **ожоги**, а ток низкого напряжения (110–220 В) – мышечную тетанию и «примораживание» к источнику тока.

Максимальная сила тока, которая может не только вызвать сокращение мышц сгибателей руки, но и позволит кисти отпустить источник тока, называется «отпускающим током». Величина «отпускающего тока» зависит от мышечной массы человека. Для мужчины с массой тела 70 кг отпускающий ток составит 75 миллиампер (мА) для переменного тока и около 15 мА для постоянного. Переменный ток низкого напряжения с частотой 60 Гц, проходивший через грудную клетку даже в течение доли секунды, может вызвать **фибрилляцию желудочков** при такой низкой силе тока, как 60–100 мА; для постоянного тока требуется около 300–500 мА. Если ток воздействует непосредственно на сердце (например, через сердечный катетер или электроды кардиостимулятора), <1мА переменного или постоянного тока может вызвать фибрилляцию желудочков. Поражение тканей при воздействии электротока в первую очередь обусловлено превращением электрической энергии в тепловую, что приводит к термическому повреждению. Количество рассеянной тепловой энергии равно силе тока² × сопротивление × время; таким образом, при любой заданной силе тока и продолжительности воздействия, ткань с самой высокой резистентностью может быть наиболее сильно повреждена. Сопротивление тела (измеряется в Ом/см²) обеспечивается, прежде всего, кожей, так как все внутренние ткани (за исключением костей) имеют незначительное сопротивление. Толщина кожи и ее сухость увеличивают сопротивляемость; сухая, хорошо кератинизированная интактная кожа имеет среднее значение 20 000–30 000 Ом/см². У мозолистой ладони или стопы сопротивление может достигать 2–3 млн Ом/см²; в то время как тонкая кожа имеет сопротивление около 500 Ом/см². Сопротивляемость для поврежденной кожи (например, порез, ссадина, пункция иглой) или влажных слизистых оболочек (например, полость рта, прямая кишка, влагалище) может быть не выше 200–300 Ом/см².

Если сопротивление кожи высоко, в ней может быть рассеяно больше электрической энергии, что приводит к большим ожогам кожи, но меньшим повреждениям внутренних органов. Если сопротивление кожи мало, то ожоги кожи менее обширны или отсутствуют, и большее количество электрической энергии передается на внутренние структуры. Таким образом, отсутствие внешних ожогов не исключает электротравму, а тяжесть внешних ожогов не определяет тяжесть электротравмы.

Здравый смысл и предостережения

Отсутствие внешних ожогов не исключает электротравму, а тяжесть внешних ожогов не определяет тяжесть электротравмы.

Повреждение внутренних тканей зависит от их сопротивления, а также от плотности электрического тока (ток на единицу площади; энергия концентрируется, когда тот же самый ток проходит через меньшую площадь).

Например, когда электрическая энергия входит через руку (прежде всего через ткани с низким сопротивлением, например мышцы, сосуды, нервы), то плотность электрического тока увеличивается в суставах из-за значительной доли площади поперечного сечения сустава, состоящей из тканей с высоким сопротивлением (например, кость, сухожилия), что снижает площадь тканей с низким сопротивлением; таким образом, повреждение тканей с низкой сопротивляемостью более тяжелые в суставах.

Путь прохождения тока через тело пострадавшего определяет, какие структуры повреждены. Поскольку переменный ток меняет направление, обычно используемые обозначения «вход» и «выход» не вполне приемлемы; более точными являются термины «источник» и «земля». Рука является наиболее типичным «источником», за ней следует голова. Стопы – наиболее типичная точка «земля». Ток, проходящий по пути «рука-рука» или «рука-нога», как правило, проходит через сердце и может вызвать аритмию. Этот путь тока более опасный по сравнению с прохождением тока нога-нога. Ток, проходящий через область головы, может вызвать повреждение центральной нервной системы.

Сила электрического поля

Напряженность электрического поля – это сила электричества в участке, к которому она применяется. Он, наряду с фактором Коувенховена, также определяет степень повреждения тканей. Например, прохождение тока 20 000 В (20 кВ) через тело мужчины ростом 2 м даст электрическое поле с силой около 10 кВ/м. Точно так же ток в 110 В, прошедший через 1 см (например, через губу ребенка), создаст электрическое поле в 11 кВ/м; именно поэтому ток низкого напряжения, проходя через малый объем тканей, может вызвать такие же тяжелые повреждения, как и ток высокого напряжения, проходящий через большой объем тканей. И наоборот, если рассматривать в первую очередь напряжение, а не силу электрического поля, небольшие или незначительные травмы могут быть классифицированы как повреждения от высокого напряжения. Например, удар током, полученный зимой от шарканья ногой по ковру, соответствует напряжению в тысячи вольт, но вызывает несущественную травму.

Воздействие электрического поля может вызвать повреждение клеточной мембраны (электропорация), даже когда энергии недостаточно для того, чтобы вызвать любые тепловые повреждения.

Патология

Воздействие электрического поля низкого напряжения приводит к появлению немедленного неприятного ощущения (шок), но редко к серьезным или необратимым повреждениям. Воздействие электрического поля высокого напряжения вызывает тепловые или электрохимические повреждения внутренних тканей. Повреждения могут включать следующее

- Гемолиз
- Коагуляция белка
- Коагуляционный некроз мышц и других тканей
- Тромбоз
- Дегидратация

- Отрыв мышцы и сухожилия

Повреждения при воздействии электрического поля высокого напряжения могут обусловить массивный отек, который по мере свертывания крови в венах и отека мышц может привести к развитию компартмент-синдрома. Массивный отек может быть причиной гиповолемии и артериальной гипотензии. Деструкция мышц может привести к рабдомиолизу и миоглобинурии, а также к электролитным нарушениям. Миоглобинурия, гиповолемия и артериальная гипотензия увеличивают риск развития острого повреждения почек. Последствия нарушения функции органов не всегда коррелируют с объемом разрушенной ткани (например, фибрилляция желудочков сердца может возникнуть на фоне относительно небольшой деструкции ткани).

Клинические проявления

Ожоги могут иметь четко очерченные границы на коже, даже когда ток проходит неравномерно в более глубоко расположенные ткани. Возможны тяжелые непроизвольные сокращения мышц, судороги, фибрилляция желудочков или остановка дыхания вследствие поражения центральной нервной системы или паралича мышц. Повреждения головного мозга, спинного мозга и периферических нервов могут привести к различным неврологическим нарушениям. Остановка сердца может возникнуть без ожогов как, например, при несчастных случаях в ванной, когда влажный (заземленный) человек контактирует с сетевым током 110 В, например, от фена или радио. Маленькие дети, которые кусают или сосут вытянутые провода, могут получить ожог рта и губ. Такие ожоги могут стать причиной косметических деформаций и нарушить рост зубов, нижней и верхней челюстей. Кровотечение из губных артерий после отделения струпа на 5–10-й день наблюдается у 10% таких детей.

Электрический шок может вызвать сильнейшие сокращения мышц и падения (например, с лестницы или крыши), заканчивающиеся вывихами (электрический удар – одна из нескольких причин возникновения заднего вывиха плечевого сустава), переломами позвонков и других переломах, травмами внутренних органов и другими тупыми ранениями.

Скрытые или сложно поддающиеся определению неврологические, психологические и физические последствия могут развиваться и существенно нарушать состояние здоровья через 1-5 лет после травмы.