

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 тока<sup>2</sup> × 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/см<sup>2</sup>) 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/см<sup>2</sup>. У мозолистой ладони или стопы сопротивление может достигать 2–3 млн Ом/см<sup>2</sup>; в то время как тонкая кожа имеет сопротивление около 500 Ом/см<sup>2</sup>. 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/см<sup>2</sup>.

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.