

ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ

Травмирующее воздействие электрического тока*

Куликов В. Н., инж.

ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии, Москва

На основе результатов, полученных при всесторонних электрофизиологических исследованиях, даются представления о критериях опасности и механизмах поражения человека электрическим током в зависимости от условий травм.

Ключевые слова: электротравма, механизмы поражения током, электрическое сопротивление тела человека, фибрилляция сердца, электробезопасность.

Высокий уровень электротравм (ЭТ) как в нашей стране, так и за рубежом обусловлен недостаточной изученностью механизма травмирующего воздействия тока на человека и отсутствием единого мнения по данному вопросу. Это затрудняет принятие эффективных защитных мер для его снижения. Одни рассматривают ЭТ главным образом как нервно-рефлекторный процесс и считают, что смерть может наступить от болевого

шока, вызванного сильным раздражением кожных рецепторов в месте контакта с токоведущим элементом (ТЭ). Другие утверждают, что наиболее частой причиной летального исхода от воздействия тока является асфиксия (удушение), вызванная прекращением дыхания с последующей остановкой работы сердца. Большинство же придерживается мнения, что летальный исход от ЭТ обусловлен фибрилляцией сердца, возникающей при непосредственном протекании тока через сердечную мышцу.

* В порядке обсуждения. *Ред.*

Установление первичности поражения жизненно важных систем организма и приоритета его механизмов имеет особое значение, поскольку каждая система, ее нервные аппараты характеризуются свойственными им особенностями физиологической реакции на раздражитель, а следовательно, по-разному реагируют на воздействие электрического тока и имеют свои критерии опасности. Но при разработке стандартов электробезопасности из трех механизмов в качестве основного (единственного) был принят фибрилляционный, что, по мнению автора, не только ошибочно, но и стало многолетним тормозом в развитии проблемы электробезопасности.

Наиболее часто смерть от воздействия электрического тока наступает мгновенно, а все тяжелые травмы сопровождаются мгновенной потерей сознания, являющейся признаком первичности поражения центральной нервной системы (ЦНС). Прекращение же работы сердечно-сосудистой системы или дыхания — вторично, поскольку при фибрилляции сердца потеря сознания наступает через несколько секунд, а при остановке дыхания — через несколько минут. Необходимо также отметить, что по данным судебно-медицинской экспертизы основной причиной смерти от воздействия электрического тока является поражение системы дыхания [1] (чаще — от нервного паралича дыхательного центра, реже — от асфиксии, возникающей при длительном “приковывании” к электрической цепи).

Основной причиной ошибочного выбора механизма поражения, а соответственно и допустимых уровней воздействия на человека электрических токов и напряжений прикосновения является то, что исследования по их определению выполняются в условиях, не адекватных реальным условиям получения травм.

Опыты проводятся в ходе преднамеренного процесса протекания тока через зажатые в руках токоведущие элементы (ТВЭ) при плавном подъеме напряжения от единиц до нескольких десятков вольт и сводятся в основном к уточнению и усреднению значений ощутимого и неотпускающего токов. Но поражения при захвате ТВЭ руками случаются относительно редко [2]. Наиболее уязвимые места при поражениях — тыльная сторона ладони, голова, шея, грудь. Опыты на животных при определении значений смертельных токов также выполняются в неадекватных условиях. Подавляющее же число ЭТ со смертельным исходом происходит от элек-

трических ударов переменным током во время случайных однофазных прикосновений человека к токоведущим элементам, находящимся под напряжением 380/220 В. Большая плотность тока в точке касания вызывает сверхсильное раздражение болевых рецепторов кожной чувствительности. Мгновенное неожиданное появление боли нарушает регулирующие функции защитных систем организма. Наступает молниеносная гипоксия (недостаточное снабжение кровью мозга), которая приводит к мгновенной потере сознания (параличу высших функций коры головного мозга), рефлекторному расстройству кровообращения и глубокому нарушению регуляторной деятельности ЦНС. Центры управления сердечно-сосудистой системы и дыхания получают неадекватные сигналы и рефлекторно вызывают фибрилляцию сердца или дыхания либо то и другое одновременно, что приводит к клинической смерти [3].

В ряде случаев раздражение нервных клеток, обладающих определенным пределом работоспособности, настолько велико, что они погибают, мозговые функции необратимо прекращаются и наступает моментальная смерть, хотя кровообращение и самостоятельное дыхание еще некоторое время могут сохраняться.

Тяжесть ЭТ при рефлекторном механизме поражения зависит от комплекса взаимосвязанных между собой факторов: интенсивности и продолжительности воздействия тока, места прикосновения человека к ТВЭ, индивидуальной восприимчивости (реактивности) его к боли, физического и особенно психического состояния в момент травмы. В зависимости от этих факторов значение смертельно опасного тока (напряжения) может находиться в широком диапазоне — от нескольких до сотен миллиампер. Подтверждением этого могут служить и результаты инструментального изучения несчастных случаев В. Е. Манойловым [1]. Из 100 % исследованных поражений 18 % произошли при токах до 5 мА, 24, 32 и 26 % — соответственно при токах 5 – 10, 11 – 20, 21 мА и выше. Из рисунка [4], где приведены пороговые значения неощутимого и переносимого (отпускающего) токов в зависимости от площади контакта человека с токоведущим элементом (кривые 1 и 2), видно, что при малых площадях они примерно на два порядка ниже, чем при площадях 50 – 70 см (зона А).

Рефлекторный механизм поражения возможен при любом пути протекания тока,

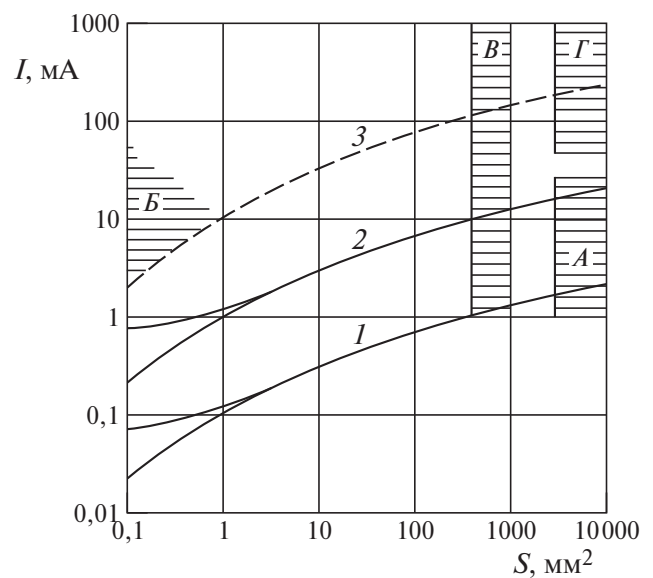
даже через один палец. Наиболее частой причиной смертельного исхода при рефлекторном воздействии тока является поражение дыхательного центра, реже — фибрилляция и асистолия сердца.

В эксперименте при кратковременном воздействии тока в несколько миллиампер (сопровождается чрезмерно болевой реакцией) в точке соприкосновения человека с ТВЭ на его кожном покрове появлялись ожоги (электрометки). Такая ситуация в реальных условиях неожиданного воздействия тока смертельно опасна. Наиболее вероятным временем воздействия при смертельной травме считают 0,2 – 0,3 с. При этом пороговое значение нефибрилляционного тока, по данным МЭК, составляет примерно 150 мА (зона Г). На основе приведенных данных была получена приближенная кривая 3 зависимости смертельно опасного тока от площади контакта. Как видно из рисунка, значения смертельно опасных токов могут составлять от нескольких до сотен миллиампер.

При протекании тока через зажатые в руках электроды (как это обычно делается во время изучения воздействия тока на человека) из-за большой площади контактов плотность тока на кожном покрове незначительна, поэтому основное его воздействие проявляется на интерорецепторах (мышцах, сердце, легких и др.), находящихся на пути тока. При токе 25 – 50 мА возникает сильное сокращение дыхательных мышц грудной клетки, в результате чего может наступить смерть от асфиксии. Причем вероятность поражения органов дыхания во многом зависит от длительности протекания тока. Ток более 50 мА, непосредственно воздействуя на миокард, может вызвать фибрилляцию сердца, опасность возникновения которой в значительной степени определяется временем его воздействия.

Фибрилляция в “чистом виде” возможна в редких случаях, так как напряжения 12 – 90 В часто недостаточны для ее возникновения, а при 220 и 380 В обычно происходит пробой кожного покрова в одной или нескольких наиболее чувствительных точках, и воздействие тока становится рефлекторным или смешанным.

При прикосновении или захвате ТВЭ, находящегося под напряжением выше 1 кВ, тяжелые последствия чаще всего наступают от ожога дугой. При этом наблюдаются также повреждения различных органов и тканей, сопровождающиеся инфицированием и сеп-



Кривые зависимости пороговых значений неощутимого 1, переносимого (отпускающего) 2 и смертельно опасного 3 токов от площади контакта человека с токоведущим элементом:

A и B — зоны традиционных исследований воздействия тока соответственно на человека и на животных; B — зона невыдерживаемых токов, в которой отмечено наибольшее количество смертельных случаев; Г — зона значений смертельно опасного тока в зависимости от времени воздействия

сисом. Возрастание степени поражения в зависимости от напряжения происходит практически линейно.

В электроустановках напряжением 35 кВ и выше ожоги могут появляться и без непосредственного контакта с ТВЭ, а лишь при случайном приближении на опасное расстояние. Когда это расстояние меньше или равно разрядному, возникает искровой разряд, переходящий затем в электрическую дугу. В месте ожога при высоковольтной травме мгновенно гибнут чувствительные рецепторы кожного покрова, и звено рефлекторного действия оказывается автоматически выключенным.

Весьма опасно протекание тока через голову. При непосредственном воздействии на нервные клетки даже слабый ток (около 1 мА) вызывает безболезненные, но неприятные мерцания, которые остаются на некоторое время после его отключения. Как показывает анализ случаев летального исхода при протекании через голову тока от сети 12 В, смерть пострадавших наступала через несколько минут после сильного перевозбуждения. Приблизительное значение тока при этом — 5 – 7 мА, время воздействия — менее 1 с.

Известно (из опытов на собаках), что протекающий непосредственно через сердце ток 10 – 15 мА обуславливает его фибрилля-

цию, ток 0,8 А ее не вызывает (только кратковременно останавливает сердце), а ток более 1 А способен прекратить фибрилляцию. Возможно, подобные закономерности наблюдаются и при протекании тока через головной мозг. Малые токи могут вызвать его перевозбуждение, большие — запредельное торможение. Этот феномен должен быть исследован, но ясно, что внезапное прямое воздействие тока в несколько миллиампер может быть смертельно опасным, хотя многие травмы, полученные при значительно больших токах, летальных исходов не вызывали. На практике ЭТ обычно возникают при сочетании двух или нескольких видов поражений.

При анализе ЭТ и разработке защитных мер необходимо знать значение электрического сопротивления тела человека (ЭСТЧ). Имея данные о нем и о диапазонах допустимых токов, протекающих через тело человека, можно найти значения опасных напряжений, которые позволяют правильно оценить угрозу поражения и определить требования к защитным мерам в электроустановках. Однако вычислить ЭСТЧ весьма сложно вследствие своеобразного поведения отдельных тканей организма и его биологической активности. Кроме того, определение этого важного параметра, соответствующего реальным условиям возникновения травм, связано с риском для жизни экспериментатора.

Исследования автора [5] показали, что ЭСТЧ в зависимости от множества факторов также находится в широком диапазоне — от десятков Ом до сотен мегаом и должно определяться для каждого конкретного условия возникновения травм или проведения эксперимента. Рекомендуемое значение сопротивления 1 кОм соответствует весьма редким условиям и не может быть использовано при определении электрических параметров в цепи протекания тока через тело человека для всех условий получения травм.

Таким образом, механизмы поражений при электротравме различны и зависят от условий возникновения травм [6]. Каждому

механизму соответствуют свои критерии опасности (ток, напряжение, продолжительность воздействия, электрическое сопротивление тела человека). Наиболее распространенным механизмом (а их более пяти и множество сочетаний) является рефлекторный, при котором ток в несколько миллиампер может вызвать смертельный исход (в классическом эксперименте он едва ощутим).

Отвлеченное линейное нормирование предельно допустимых уровней напряжения прикосновения и токов без учета конкретных условий возникновения травмы совершенно недопустимо при разработке стандартов электробезопасности. При одних условиях, например, напряжение 12 В смертельно опасно, а при других — неощутимы 380 и даже 500 В.

Для успешной борьбы с электротравматизмом необходимо принципиально пересмотреть взгляды на критерии опасности электрического тока (напряжения) [7]. Человек должен знать, при каких условиях напряжение безопасно, когда оно опасно или смертельно опасно.

Список литературы

1. **Манойлов В. Е.** Основы электробезопасности. — М.-Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985.
2. **Якобс А. И.** Электрозащитная эффективность. — Электричество, 1996, № 4.
3. **Куликов В. Н.** Рефлекторный механизм поражения человека электрическим током. — Промышленная энергетика, 2006, № 2.
4. **Куликов В. Н.** К вопросу о допустимых уровнях кратковременного воздействия на человека электрических токов и напряжения промышленной частоты. — Промышленная энергетика, 2006, № 1.
5. **Куликов В. Н.** Об электрическом сопротивлении тела человека. — Промышленная энергетика, 2005, № 7.
6. **Куликов В. Н.** Основные механизмы поражения человека электрическим током. — Промышленная энергетика, 2006, № 12.
7. **Куликов В. Н.** О необходимости пересмотра взглядов на критерии опасности электрического тока для организма человека. — Промышленная энергетика, 2001, № 2.

kulikov.1930@mail.ru