

Докт. мед. наук Н. Л. Гурвич, проф. А. А. Акопян и инж. И. А. Жуков

## К ВОПРОСУ О ПОСТОЯНСТВЕ ВЕЛИЧИНЫ ПОРАЖАЮЩЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Из лаборатории экспериментальной физиологии по оживлению организма  
(зав. — проф. В. А. Неговский) АМН СССР и лаборатория перенапряжений  
(зав. — проф. А. А. Акопян) ВЭИ им. В. И. Ленина

Экспериментальные данные показывают, что различные последствия действия электрического тока на организм находятся в определенной зависимости от условий поражения (М. П. Бресткин, А. В. Лебединский, Л. А. Орбели и В. В. Стрельцов, 1932; И. Р. Петров, 1937; Коузенховен, Хукер и Лапгуорси, 1932). Величина напряжения и сопротивления в цепи, вид тока и длительность его действия, место контакта и пути тока через организм определяют степень его воздействия на те или иные органы, чем в свою очередь обуславливается характер общей реакции организма на электротравму. Наглядной иллюстрацией этого положения могут служить качественно различные реакции организма на действие переменного тока при изменении одного лишь параметра — силы тока. Хорошо известно, что переменный ток силой в несколько миллиампер действует только на чувствительные нервы кожи. При 15—20 *ма* действие тока проявляется на мышцах конечностей и вызывает судорожные сокращения. При 25—50 *ма* раздражающий эффект тока распространяется и на мышцы грудной клетки и диафрагмы, что приводит к качественно новой реакции — затруднению дыхания. При токе более 100 *ма* реакция организма определяется новым фактором: распространением действия тока на сердце. Этот эффект действия тока является наиболее опасным, поскольку нарушение работы сердца приводит к быстрой гибели всего организма. Таким образом, с увеличением силы тока его действие распространяется на более глубоко расположенные жизненно важные органы, участие которых приобретает решающее значение в общей реакции организма и определяет исход электротравмы.

Закономерности действия электрического тока на отдельные возбудимые ткани и на организм в целом были установлены в результате многочисленных исследований разных авторов (Прево и Бателли, 1899; Ф. А. Андреев, 1912; Хукер, Коузенховен, Лапгуорси, 1933 и др.). Однако и сейчас еще делаются попытки поставить под сомнение зависимость электрических поражений от параметров тока. Одним из основных мотивов для такого сомнения служит отсутствие прямой пропорциональности между тяжестью электротравмы и величиной поражающего напряжения.

Различные последствия электротравмы, в частности, гибель людей, оказавшихся под напряженным переменного тока в 110 *в*, а иногда даже 50 и 40 *в*, и несмертельные поражения от более значительного напряжения действительно имеют место в электропатологии. Однако это не доказывает, что между параметрами тока и тяжестью поражения нет

закономерной взаимосвязи. Если нет прямой зависимости между последствиями электротравмы и величиной напряжения, то это объясняется тем, что **решающее значение при электротравме имеет сила тока, протекающего через организм, а не величина напряжения.**

Случаи электротравмы без смертельного исхода при высоком напряжении и большой силе тока не могут служить опровержением экспериментально установленных закономерностей. Они объясняются тем, что ток силой в десятки ампер менее способен вызывать фибрилляцию сердца, которая является основной причиной смерти при поражении переменным током с напряжением в 110, 220 и 380 в.

Источником ошибочных представлений о закономерностях электропоражения могут служить неверные толкования экспериментальных наблюдений действия тока на мелких лабораторных животных — кроликах, крысах и мышах. Реакция этих животных на действие переменного тока принципиально отличается от реакции организма более крупных видов млекопитающих, у которых **не бывает необратимой фибрилляции сердца.** Соответственно с этим решающее значение в механизме поражения мелких животных приобретают другие факторы, а именно поражение нервной системы, а не сердца. Без учета этой особенности реакции организма мелких животных на действие электрического тока результаты проведенных исследований не могут быть использованы для выяснения патофизиологии электротравмы человека.

Многие ошибочные представления в электропатологии могут быть устранены на основе более детального анализа данных экспериментального изучения и статистики электротравм. Вместе с тем, интересно экспериментально выяснить вопрос о постоянстве пороговой величины поражающего тока для одного и того же индивидуума. Существующие данные о величине смертельно опасного тока основаны, главным образом на результатах исследования, проведенного Феррисом и др. (1936) на разных животных, имеющих вес, близкий к весу человека (овцы и козы, свиньи, телята и собаки). Однако обнаруженные в этом исследовании значительные колебания минимальных величин поражающего тока у отдельных индивидуумов (от 100 до 300 *ма* у овец) порождают вопрос, чем были обусловлены такие колебания — различными индивидуальными особенностями животных или же изменениями реактивности организма одного и того же животного в зависимости от внутренних, трудно учитываемых факторов.

Вопрос о постоянстве или непостоянстве пороговой величины поражающего тока для каждого отдельного индивидуума может быть выяснен путем многократных измерений порога на одном и том же животном. Результаты таких измерений, проведение которых стало возможным благодаря более совершенным современным методам оживления организма и дефибрилляции сердца, приведены в настоящей работе.

### Методика опытов

Опыты были проведены на 10 собаках весом от 7 до 19 кг. Перед опытом животному вводился под кожу 2%-ный раствор пантопона из расчета 8 *мг/кг*. Во время опыта собаки лежали на спине привязанными к станку. Электроды-иглы вкалывались под кожу правой передней и левой задней конечностей; ток, таким образом, проходил по «правой крестной петле». Испытания действия тока (в течение 3 *сек*) повторялись через интервалы в 5 *мин* при повышении напряжения при каждом последующем замыкании цепи до наступления фибрилляции сердца. Поражение сердца обнаруживалось падением артериального давления и появлением на электрокардиограмме фибрилляторных осцилляций.

Фибрилляция сердца устранялась с помощью импульсного дефибриллятора, электроды которого закреплялись туго натянутой резиновой лентой на правой и левой сторонах грудной клетки. Кожа под электродами была тщательно выбрита для надежного контакта. В этих условиях сердце дефибриллировалось при напряжении разряда 2500—3500 в в зависимости от веса и размера животного. Последующее испытание порога поражающего тока начиналось не ранее, чем через 25—30 мин после дефибрилляции.

Над подопытными собаками велось наблюдение в течение 7—12 дней, а затем проводились повторные испытания.

У двух собак определялась пороговая величина и при воздействии униполярным пульсирующим током (однополупериодный и двухполупериодный выпрямленный переменный ток).

### Результаты опытов

Повторные измерения пороговой величины переменного тока, вызывающего фибрилляцию сердца у одних и тех же собак, показали **относительное постоянство порога у большинства собак**. Ниже приведены результаты многократных измерений порога у одной и той же собаки в разные дни.

Таблица 1

Выписка из протоколов опытов над собакой № 3 весом 7 кг. Воздействие переменным током 50 гц в течение 3 сек (по «правой косо́й петле»)

№ испытания	Дата и час проведения испытания	Сила тока, (ма эфф.)	Реакция сердца (фибрилляция)
<b>6 ноября</b>			
1	12 ч 18 мин	40	—
3	12 » 29 »	55	—
4	12 » 30 »	55	+
8	14 » 40 »	50	—
9	14 » 50 »	55	+
10	14 » 55 »	58	+
12	15 » 28 »	50	—
13	15 » 33 »	55	+
<b>18 ноября</b>			
1	10 ч 50 мин	30	—
2	10 » 55 »	40	—
3	11 » 02 »	50	—
4	11 » 07 »	55	—
5	11 » 12 »	55	—
6	11 » 17 »	57	+
11	12 » 14 »	50	—
12	12 » 20 »	55	+
15	12 » 59 »	50	—
16	13 » 04 »	55	+
<b>26 ноября</b>			
1	11 ч 33 мин	37	—
2	11 » 40 »	45	—
3	11 » 45 »	52	+
4	12 » 12 »	40	—
5	12 » 17 »	42	—
6	12 » 22 »	48	+
10	13 » 10 »	47	—
11	13 » 15 »	51	—
12	13 » 20 »	53	+

Примечание: Некоторые промежуточные испытания при токе ниже пороговой величины в таблице не указаны.

Обобщая результаты измерений пороговой величины переменного тока, вызывающего фибрилляцию сердца у подопытной собаки, можно отметить следующее. В первых двух сериях опытов — 6 и 18 ноября (общее количество испытаний — 29) фибрилляция наступила 4 раза при токе 55 *ма* и 2 раза — при токе 57—58 *ма*. Максимальный ток, не приведший к фибрилляции, и минимальный ток, вызывавший ее, совпали по величине (55 *ма*). В третьей серии испытаний, проведенных на этой же собаке 26 ноября, фибрилляция наступила три раза при токе 52, 48 и 53 *ма*. Максимальный ток, не вызвавший фибрилляции (51 *ма*), в этом случае превысил на 3 *ма* ток, вызвавший фибрилляцию в другом испытании (48 *ма*). Снижение порога на 3—7 *ма* в последней серии опытов существенно не нарушает установленное в предыдущих двух сериях закономерное постоянство порога у подопытной собаки.

В таблице 2 приведены общие результаты измерений пороговой величины переменного тока, вызывавшего фибрилляцию сердца, проведенных на 10 собаках.

Таблица 2

Сводные результаты опытов по измерению порога поражающего тока на 10 собаках (воздействие переменным током 50 *Гц* в течение 3 *сек* по «правой косой петле»)

№ и вес собаки, кг	Дата проведения опыта	Количество определенных порогов	Величина тока, <i>ма</i> эф.	
			максимум, не вызвавший фибрилляции	минимум, вызвавший фибрилляцию
1 7,3	30 октября	1	35	50
	10 ноября	1	35	40
	27 »	4	39	37
2 18	4 »	3	87	60
	11 »	2	62	63
	24 декабря	2	63	75
3 7	6 ноября	3	55	55
	18 »	3	55	55
	26 »	3	51	48
4 14	21 ноября	2	55	55
	29 »	1	70	80
	11 декабря	1	78	82
5 19	22 ноября	2	64	67
	30 »	1	65	70
	25 декабря	1	62	69
6 11	25 ноября	1	55	58
	4 декабря	2	70	67
	28 »	2	82	80
7 8,5	10 февраля	1	25	52
	3 марта	1	50	65
	24 »	1	—	57
8 9,5	19 марта	1	65	77
	11 апреля	1	60	75
9 12,5	21 января	1	68	75
	3 февраля	2	68	75
10 12	27 января	2	55	60
	13 февраля	2	65	70

Как видно из данных табл. 2, пороговая величина переменного тока, вызывавшего фибрилляцию сердца, измерялась у каждой собаки от 2 до 9 раз в разные дни. У 6 собак, отмеченных под № 1, 3, 5, 7, 8 и 9, пороговая величина сохранялась на сравнительно постоянном уровне. У 4 из этих собак (№ 5, 7, 8 и 9) минимальный ток, вызвавший фибрилляцию, всегда превышал максимальный ток, не вызвавший фиб-

**риллации.** Колебания величины порога у собак № 1 и 3 были весьма незначительными. У собаки № 1 в одном из четырех измерений порога 27 ноября не было фибрилляции при 39 ма (порог был 40 ма), а при другом измерении фибрилляция наступила при 37 ма. У собаки № 3 при измерениях 6 и 18 ноября был устойчивый порог в 55 ма, а 26 ноября он колебался в пределах 48—52 ма (см. табл. 1).

У 4 собак, отмеченных под № 2, 4, 6 и 10, были более значительные колебания порога. У собак № 4, 6 и 10 при повторных измерениях через одну-две недели порог увеличился на 45, 35 и 16%. У собаки № 2 отмечались колебания порога даже в течение одного и того же дня.

На основании результатов измерений порога у всех 10 собак (табл. 2) можно сделать такое заключение.

У 6 собак пороговая величина переменного тока, вызывавшего фибрилляцию сердца, была постоянной или отмечались лишь незначительные колебания (в пределах 5-10%) при повторных измерениях в разные дни; у трех собак в эти дни были более значительные колебания порога; у одной они были обнаружены в течение одного и того же дня.

Наименьший ток, вызвавший фибрилляцию, был 37 ма (собака № 1 весом 7,3 кг). Наибольший ток, не вызвавший фибрилляции, был 87 ма (собака № 2 весом 18 кг). В связи с небольшим числом подопытных животных трудно установить четкую зависимость порога от веса животного. Можно лишь отметить, что наименьшая величина поражающего тока (37—55 ма) была у трех собак весом 7, 7,3 и 8,5 кг. У остальных 7 собак весом от 9 до 19 кг величина поражающего тока варьировала в пределах 60—80 ма. Среднее значение поражающего тока в подопытной группе собак (средний вес 12 кг) составляло 63,5 ма.

В таблице 3 приведены сравнительные результаты испытаний на двух собаках (№ 9 и 10) переменного тока 50 гц и униполярного пульсирующего тока при однополюсном и двухполюсном выпрямлении переменного тока (50—100 импульсов в сек).

Таблица 3

№ собаки	Дата опыта	Переменный ток 50 гц (ма макс.)	Пульсирующий ток		Результаты действия тока (фибрилляция)
			50 импульсов в сек (ма макс.)	100 импульсов в сек (ма макс.)	
9	21 января	95	—	230—300	—
		105	—	285—350	+
10	27 января	75	130	300	—
		84	145	310	+
	13 февраля	90	180	360	—
		98	205	380	+

Приведенные в табл. 3 данные измерений пороговой величины переменного и униполярного токов, вызывавших фибрилляцию сердца, были получены на двух собаках, отмеченных в табл. 1 под № 9 и 10. Для удобства сравнения в табл. 3 имеются величины амплитуды тока, которые в 1,41 раза превышают соответствующие величины переменного тока, приведенные в табл. 2 в эффективных значениях. Как видно из данных табл. 3, пороговая величина поражающего тока значительно выше для униполярного пульсирующего, чем для переменного тока. У собаки № 9 величина порога для униполярного пульсирующего тока (100 импульсов в сек) в три раза превышала величину порога для переменного тока. У собаки № 10 порог для униполярного пульсирующего тока (50 импульсов в сек) в два раза был выше порога для переменного то-

ка, а для униполярного пульсирующего (100 импульсов в *сек*) увеличивался в 4 раза по сравнению с порогом для переменного тока.

Особый интерес для выяснения постоянства порога поражающего тока представляют результаты измерений у собаки № 10. У нее наблюдалось возрастание порога для всех видов тока при повторных измерениях через 17 дней. В первых опытах, 27 января, величина порога для переменного тока, униполярного пульсирующего (50 импульсов в *сек*) и униполярного пульсирующего (100 импульсов в *сек*) была соответственно 84, 145, 310 *ма*. При повторных измерениях 13 февраля порог для всех видов тока увеличивался соответственно до 98, 205, 380 *ма*. Такое **параллельное возрастание порога для всех видов тока** доказывает закономерный характер реакции сердца на его действие. Общее для всех видов тока возрастание порога может быть объяснено изменением условий, влияющих на величину тока, протекавшего через сердце, при проведении второго опыта через 17 дней после первого. Вместе с тем, поскольку в течение одного и того же дня эти условия не изменялись, соотношения величин порога для разных видов тока оставались одинаковыми при измерении порога в разные дни.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многочисленные опыты, проведенные на одних и тех же собаках, показали, что минимальная пороговая величина переменного тока, вызывающего фибрилляцию сердца, остается относительно постоянной у большей части собак. Постоянство порога наблюдалось при измерениях в течение одного дня и в разные дни. У меньшей части собак отмечались колебания порога в разные дни, и лишь у одной из десяти порог не был постоянным в течение одного дня. Полученные данные позволяют заключить, что величина тока, вызывающего фибрилляцию сердца, определяется той частью тока, которая непосредственно протекает через сердце. При одинаковых условиях опыта поражение сердца происходит закономерно при определенной силе тока, проходящего через весь организм. Некоторые колебания величины порога у подоштых собак могут быть объяснены изменением пути прохождения тока через организм и той части тока, которая протекает через сердце. Это возможно при изменении положения сердца в грудной клетке во время усиленного дыхания или же в результате неустойчивости артериального давления (поэтому весьма важно проводить опыты при спокойном состоянии животного). Наиболее значительные колебания порога наблюдались у собаки № 2, которая во время опыта проявляла сильное беспокойство, сопровождавшееся резкой одышкой.

Представляет интерес значительное возрастание пороговой силы тока, вызывающего фибрилляцию сердца в случае воздействия выпрямленным переменным током. Обнаруженный таким образом факт меньшей чувствительности сердца к действию униполярного пульсирующего тока по сравнению с действием переменного тока можно объяснить тем, что физиологический эффект переменного тока определяется суммарным действием обеих полуволн прямого и обратного направлений. Поэтому адекватный эффект действия на организм выпрямленного тока требует удвоения величины его по сравнению с невыпрямленным переменным током. Меньшая эффективность униполярного пульсирующего тока с частотой 100 *имп/сек* может быть объяснена как уменьшением интервала между последовательными импульсами и соответственным снижением их эффективности, так и превышением предельной частоты возбуждения сердца при таком высоком ритме раздражения. Этот вопрос требует дальнейшего изучения,

## ЛИТЕРАТУРА

Акопян А. А., Гурвич Н. Л., Жуков И. А., Неговский В. А. «Электричество», №10, 1954.

Андреев Ф. А. Практический врач, 1912, 8—9.

Бресткин М. П., Лебединский А. В., Орбели Л. А. и Стрельцов В. В. Физиол. журн. СССР, 1932, 15, № 6.

Коуэнховен, Хукер и Лангуорси (Kouwenhoven, Hooker and Langworthy). Am. J. Physiol. 1933, 103, 444.

Прево и Бателли (Prevost et Batelli). J de physiol. et de pathol. gèn. 1899, 1, 399.

Петров И. Р. Вестник хирургии, 1937, 50.

Хукер, Коуэнховен и Лангуорси (Hooker, Kouwenhoven and Langworthy) Am. J. Physiol. 1933, 103, 444.

Феррис, Кинг, Спенс и Уильямс (Ferris, King, Spence and Williams). Electrical Engineering. 1936, 555, 498.

---