

Доктор мед. наук **Н. Л. Гурвич** и инж. **И. А. Жуков** (Москва)

ДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА НА ОРГАНИЗМ

Из лаборатории перенапряжений (зав.—*А. А. Аюбян*) Всесоюзного электротехнического института им. В. И. Ленина и Лаборатории экспериментальной физиологии по оживлению организма (зав.—проф. *В. А. Неговский*) АМН СССР

В современной технике применяются самые разнообразные виды электрического тока при весьма различных напряжениях. Колоссальный рост величины используемого напряжения и перспективы дальнейшего его роста в будущем вызывают необходимость систематического изучения физиологического действия токов высокого напряжения на организм. Выяснение этого вопроса одинаково важно как для разработки рациональных мер профилактики, так и для определения необходимых мер медицинской помощи в случае поражения.

В настоящем сообщении приведены некоторые данные экспериментального изучения действия импульсного тока высокого напряжения на организм, проведенного по предложению и при непосредственном участии *А. А. Аюбяна*. Это исследование имело целью выяснить природу нарушения функций организма под влиянием указанного тока, а также изучить зависимость степени поражения от силы и длительности электрического воздействия.

Методика

Испытания действия импульсного тока проводились на собаках весом от 6 до 28 кг, которым за час до начала опытов вводили под кожу 1%-ный раствор пантопона из расчета 0,4 мл/кг. Во время опыта собаки были привязаны к станку в лежачем положении на спине. Электроды—иглы вкалывались под кожу бедра и плеча, или же (в меньшем числе опытов) на более дистальных участках конечности. В единичных испытаниях один из электродов подводился через искровой промежуток в 1—2 см к затылку животного.

Для получения импульсного тока различной продолжительности и силы мы пользовались специально сконструированным импульсным генератором напряжения. Основную его часть составляли 7 конденсаторов емкостью по 1,25 мкфф каждый. Напряжение на каждом отдельном конденсаторе могло быть доведено с помощью выпрямителя до 40 кв. Последовательное соединение конденсаторов при разряде на объект позволяло значительно повысить величину напряжения разряда. Соответственно способу соединения конденсаторов при разряде испытываемая емкость варьировала от 0,18 до 8,75 мкфф. Были испытаны следующие емкости: 0,18; 0,42; 0,83; 3,75; 5,0 и 8,75 мкфф.

В течение опыта подопытная собака подвергалась нескольким (3—7) воздействиям через интервалы в один час и более. Обычно каждое последовательное воздействие производилось при нарастающем напряжении. В некоторых опытах испытания проводились при последовательно убывающих или при равных напряжениях разряда.

Во время опыта регистрировались дыхательные движения грудной клетки, артериальное давление и электрокардиограмма. Осциллограммы напряжения и тока, воздействовавшего на животное, записывались с помощью двух электроннолучевых осциллографов, имевших специальное приспособление для синхронизации начала движения луча и момента разряда.

Наблюдение за подопытными собаками после опыта проводилось в течение месяца и более. На некоторых из них проводились повторные опыты через интервалы в две—три недели.

Результаты

Под влиянием импульсного тока наблюдались различные нарушения дыхания и кровообращения в зависимости от силы и продолжительности воздействия. Относительно слабые разряды (менее 30 кВ и 100 а при малой емкости 0,18—0,83 мкф, или 15 кВ, 30 а при большой емкости конденсатора—8,75 мкф) вызывали лишь кратковременное учащение дыхания и довольно значительное повышение артериального давления (иногда на 100%). В некоторых опытах под влиянием таких импульсов наблюдалась остановка дыхания на 10—20 секунд после предварительного затяжного вдоха. На электрокардиограмме после воздействия можно было обнаружить учащение синусного ритма. В меньшем числе случаев можно было отметить и другие изменения в виде поднятия интервала S—T выше изоэлектрической линии и увеличения зубца Т электрокардиограммы (см. табл. 32 и рис. 77).

Таблица 32

Физиологическое действие импульсного тока на собаку

Емкость конденсатора, мкф	Слабый импульс		Средний импульс		Сильный импульс	
	напряжение, кВ	ток, а	напряжение, кВ	ток, а	напряжение, кВ	ток, а
Нарушения функций 0,18 } 0,83 }	менее 30	100	30—40	100—200	40—50	200—300
5,0 } 8,75 }	менее 15	30	15—20	30—40	20—30	40—100
Нарушения дыхания	Глубокий вдох с последующей остановкой дыхания на 10—20 секунд		Вдох с последующей остановкой дыхания на 20—30 секунд		Прекращение дыхания на 30 секунд и более без предварительного вдоха	
Нарушение сердечно-сосудистой системы	Подъем артериального давления на 50—100% в течение одной минуты. На электрокардиограмме—тахикардия синусного происхождения. Желудочковые комплексы нормального вида. Иногда небольшое приподняtie интервала S—T		Подъем артериального давления на 100—150% в течение 1—2 мин. Ритм сердца до 240 в минуту. На электрокардиограмме двухфазные желудочковые комплексы и другие симптомы нарушения проводимости. Нередко желудочковая автоматия		Менее длительный подъем кровяного давления, чем после импульсов средней силы. На электрокардиограмме желудочковая тахикардия, периодическое трепетание, а иногда—фибриляция желудочков	

Разряды с напряжением 30—40 кВ при малой емкости, или 15—20 кВ при большой емкости вызывали более значительные нарушения. Дыхание прекращалось на 20—30 секунд без предварительного или после незначительного по своей глубине вдоха. Артериальное давление возрастало на 100—150% и возвращалось к исходному уровню через 2—3 минуты. На

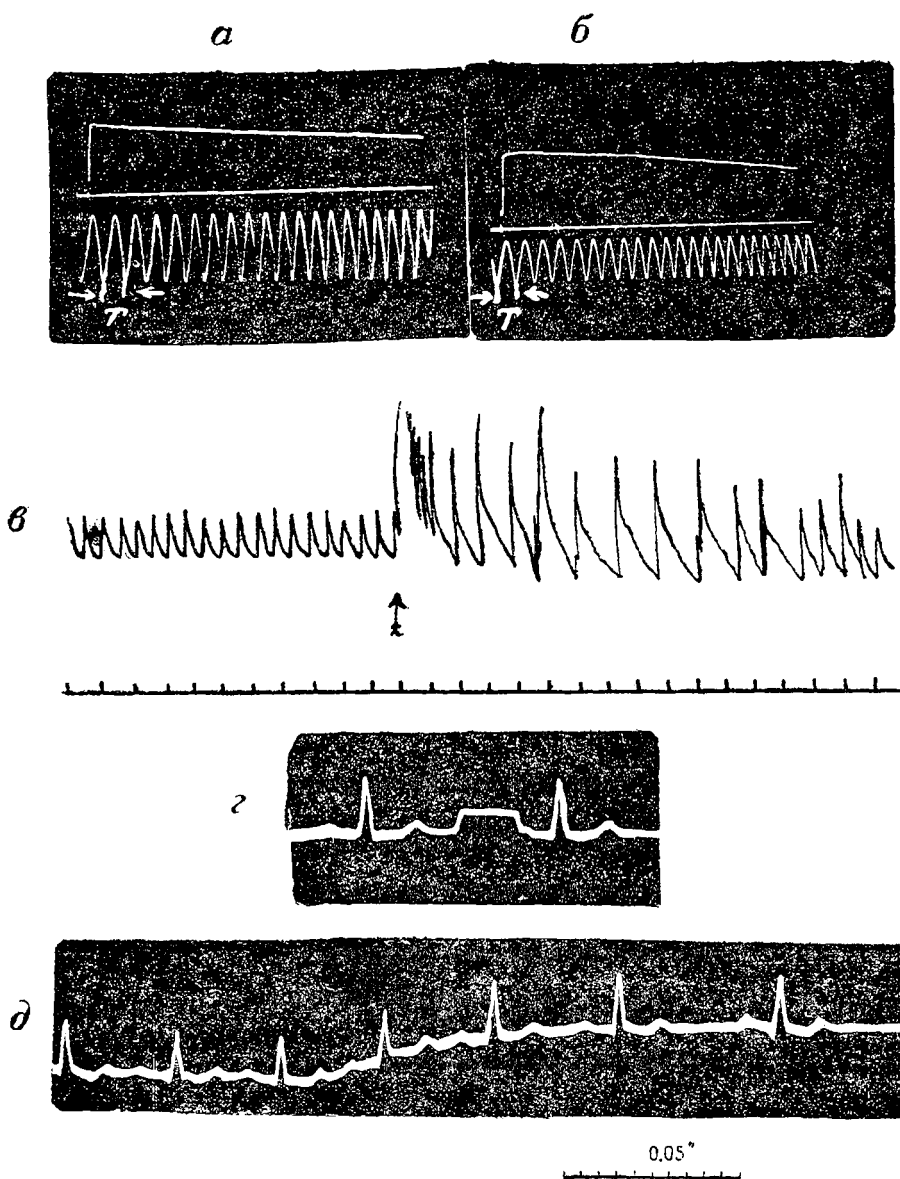


Рис. 77. Изменения дыхания и электрокардиограммы после действия разряда с емкостью 8,75 мкф, напряжением 11 кВ при токе в 34 а (опыт над собакой весом 24 кг): а—осциллограмма тока, б—напряжения; под осциллограммами отметка времени: каждое деление (T) равно 50 микросек; в—кимограмма записи дыхательных движений грудной клетки (момент разряда отмечен стрелкой); внизу отметка времени: каждое деление равно 5 секундам; г и д—электрокардиограмма до и после разряда.

электрокардиограмме наблюдались различные проявления нарушения внутрижелудочковой проводимости (появление двухфазных желудочковых комплексов, искажение вида начальной части комплекса). В некоторых опытах наблюдалась продолжительная (с минуты и более) пароксизмальная тахикардия желудочкового происхождения.

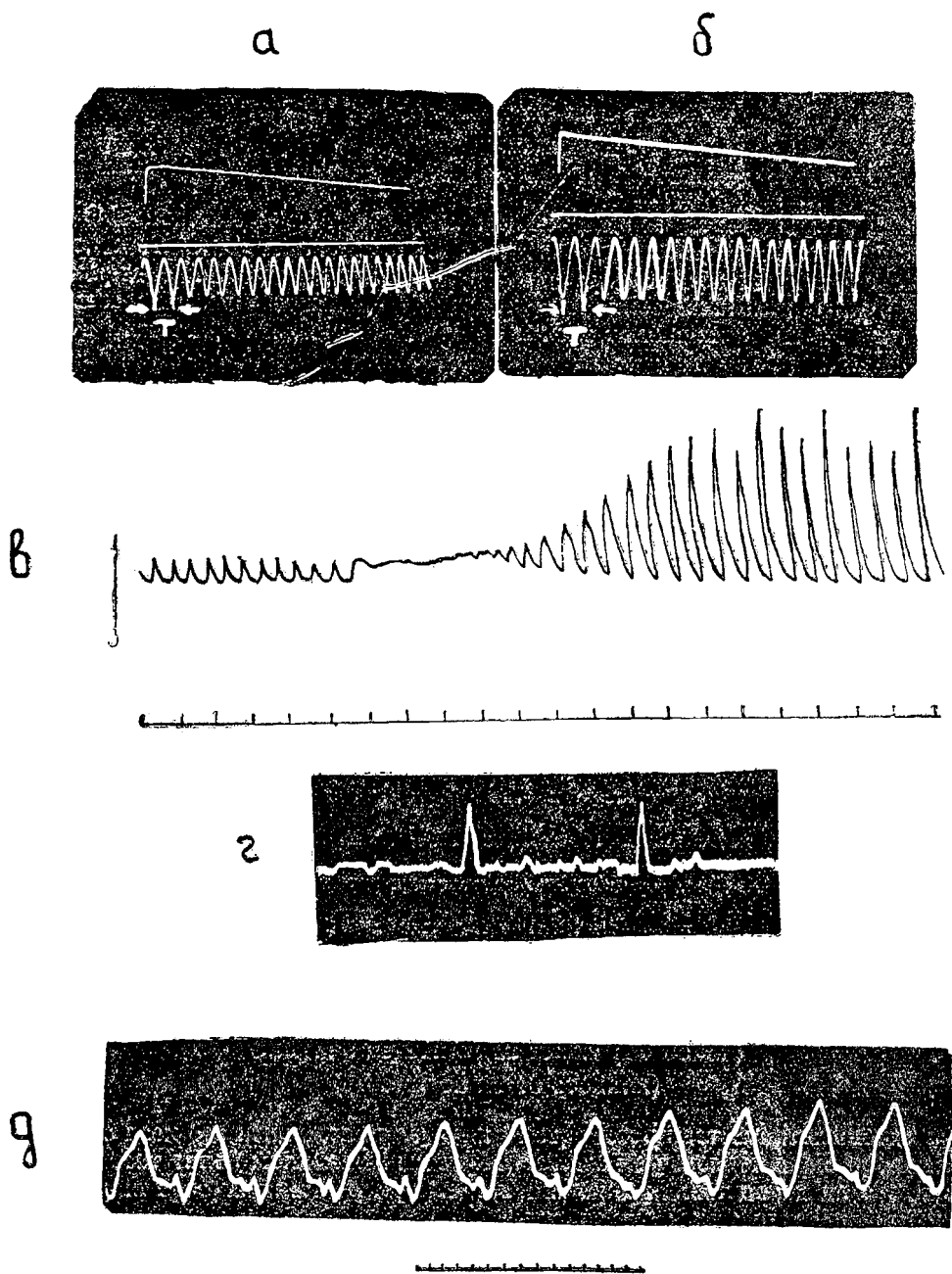


Рис. 78. Изменения дыхания и электрокардиограммы после действия разряда с емкостью 8,75 мкф, напряжением 22 кв при токе в 110 а (испытание над той же собакой, что и на рис. 77). Все обозначения те же, что и на рис. 77.

Более мощные разряды (40—50 кв, 200—300 а при малой емкости, 20—30 кв, 40—100 а при большой емкости) приводили к остановке дыхания в течение 30 минут и более. Подъем артериального давления был ме-

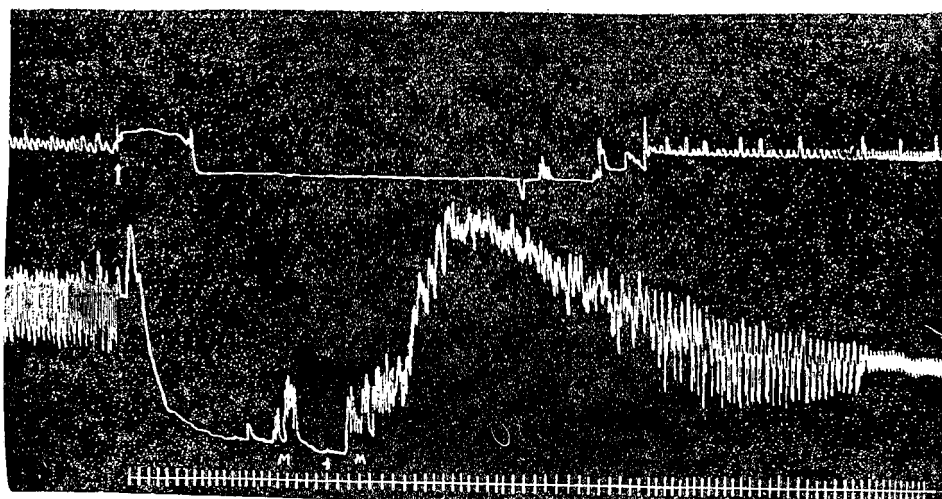


Рис. 79. Изменения дыхания и артериального давления после разряда с емкостью 0,18 мкф, напряжением 73 кв при токе в 545 а (опыт над собакой весом 12 кг). На кимограмме сверху вниз: 1—запись дыхательных движений грудной клетки, 2—запись артериального давления, 3—отметка времени: каждое деление равно 6 секундам. Момент разряда отмечен стрелкой (↑). Падение артериального давления после разряда связано с наступлением фибрилляции желудочков. (М)—проведение непрямого массажа сердца, (+)—электрическая дефибрилляция сердца.

нее значительным, чем после действия импульсов слабой и средней силы. На электрокардиограмме наблюдалась длительная (до 5 минут и более) пароксизмальная тахикардия и искажения желудочковых комплексов, принимавших вид двухфазных или монофазных отклонений (рис. 78). В некоторой части опытов наступала фибрилляция желудочков (рис. 79).

Наиболее продолжительное отсутствие дыхательных движений, после которого наблюдалось спонтанное их возобновление, не превышало 50 секунд. После более продолжительной остановки необходимо было применять искусственное дыхание, без чего нельзя было ожидать восстановления естественного дыхания. Полное прекращение дыхания наблюдалось нами в 6 испытаниях (см. табл. 33).

Таблица 33

Параметры импульсного тока, вызвавшего длительную остановку дыхания

Длительность остановки	Число опытов	Вес собак, кг	Емкость конденсатора, мкф	Напряжение, кв	Ток, а
40—50 секунд	1	20,	0,18	75	520
	2	20, 21	0,42	60, 66	430, 595
	2	10, 11	„	49, 62	240, 280
	2	20, 28	0,83	72, 51	465, 575
	4	16, 20 25, 26	8,75	32, 28 22, 26	20, 92 101, 121
Более минуты (до начала искусственного дыхания)	2	22, 26	0,18	65, 97	430, 320
	4	11, 18	8,75	28, 31	40, 54, 116 131

Во всех этих случаях испытывались наиболее мощные разряды с напряжением порядка 30 кВ при емкости 8,75 мкФ и с напряжением 65 и 97 кВ при емкости 0,18 мкФ. Примерно в половине этих случаев ток, пропущенный через животное, не был чрезмерно сильным: 320 а при емкости 0,18 мкФ, 40 и 54 а при емкости 8,75 мкФ. В опытах на других собаках того же веса действие таких токов часто проходило без тяжелых последствий. Возможно, что более сильное воздействие на дыхательную систему в указанных случаях было связано с избирательным прохождением тока вдоль путей иннервации дыхания.

В двух случаях воздействие мощных импульсов (68 кВ, 545 а при емкости 0,18 мкФ и 28 кВ, 132 а при емкости 8,75 мкФ) вызвало ослабление деятельности сердца и падение артериального давления, что привело к гибели животного без наступления фибрилляции (см. табл. 34 и рис. 80).

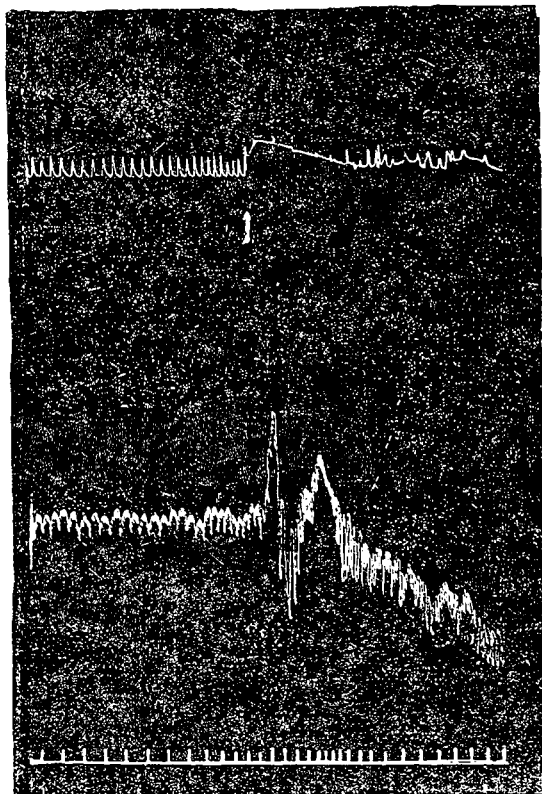


Рис. 80. Изменения дыхания и артериального давления после разряда с емкостью 8,75 мкФ, напряжением 28 кВ при токе 132 а (опыт над собакой весом 117 кг). Обозначения те же, что и на рис. 3. Постепенное снижение артериального давления после разряда.

Однако в значительно большем числе случаев нарушение деятельности сердца было обусловлено наступлением фибрилляции желудочков (см. табл. 35). Обычно фибрилляция наступала непосредственно под действием разряда; реже она развивалась после кратковременного периода

Таблица 34

Параметры импульсного тока, вызвавшего гибель животного при ослаблении деятельности сердца и падении артериального давления без наступления фибрилляции желудочков

Вес животного, кг	Емкость конденсатора, мкф	Напряжение, кв	Ток, а
18	0,18	68	545
17	8,75	28	132

То же, но с наступлением фибрилляции

Таблица 35

Емкость, мкф	Всего испытано импульсов	Не вызвали фибрилляции			Вызвали фибрилляцию		
		число импульсов	напряжение, кв	ток, а	число	напряжение, кв	ток, а
0,18	50	45	40—110	200—600	5	70—75	250—550
0,42	147	132	30—80	100—600	15	50—75	225—625
0,83	48	43	30—60	100—500	5	50—60	100—850
4,0	13	12	10—25	30—115	1	11—	38
8,75	46	44	10—32	20—128	2	28, 29	104—131
ВСЕГО	304	276					

пароксизмальной тахикардии, в течение которого поддерживался высокий уровень артериального давления.

В большей части случаев фибрилляция наступала при испытании наиболее мощных импульсов, вызывавших, судя по данным электрокардиографии, глубокие нарушения внутрижелудочковой проводимости. В некоторых случаях можно было проследить последовательные ступени такого нарушения, начиная от появления одиночных возвратных экстрасистол и пароксизмальной тахикардии (после менее сильных разрядов) до наступления трепетания и фибрилляции желудочков (после более сильных разрядов) (рис. 81). В некоторых случаях наблюдалось, однако, наступление фибрилляции после испытания относительно слабых воздействий (например, при испытании разряда с напряжением в 11 кв, емкостью 3,75 мкф при токе 38 а). В одном опыте фибрилляция возникла при вторичном испытании действия разряда емкостью 0,83 мкф и напряжением 24 кв при токе 107 а. Предшествующее испытание разряда той же емкости при напряжении 41 кв и токе 208 а вызвало остановку дыхания на 40 секунд без наступления фибрилляции. Надо полагать, что возникновение фибрилляции происходит различным образом в зависимости от силы воздействия: *сильные импульсы способны вызвать нарушения проводимости и одностороннее распространение возбуждения с последующей круговой его циркуляцией, воздействуя на сердце в любую фазу его цикла. Относительно слабые импульсы приводят к таким последствиям только в случае их попадания в «чувствительную» фазу сердечного цикла в начале диастолы.* Это предположение следует из факта значительно более частого возникновения фибрилляции от действия более мощных разрядов.

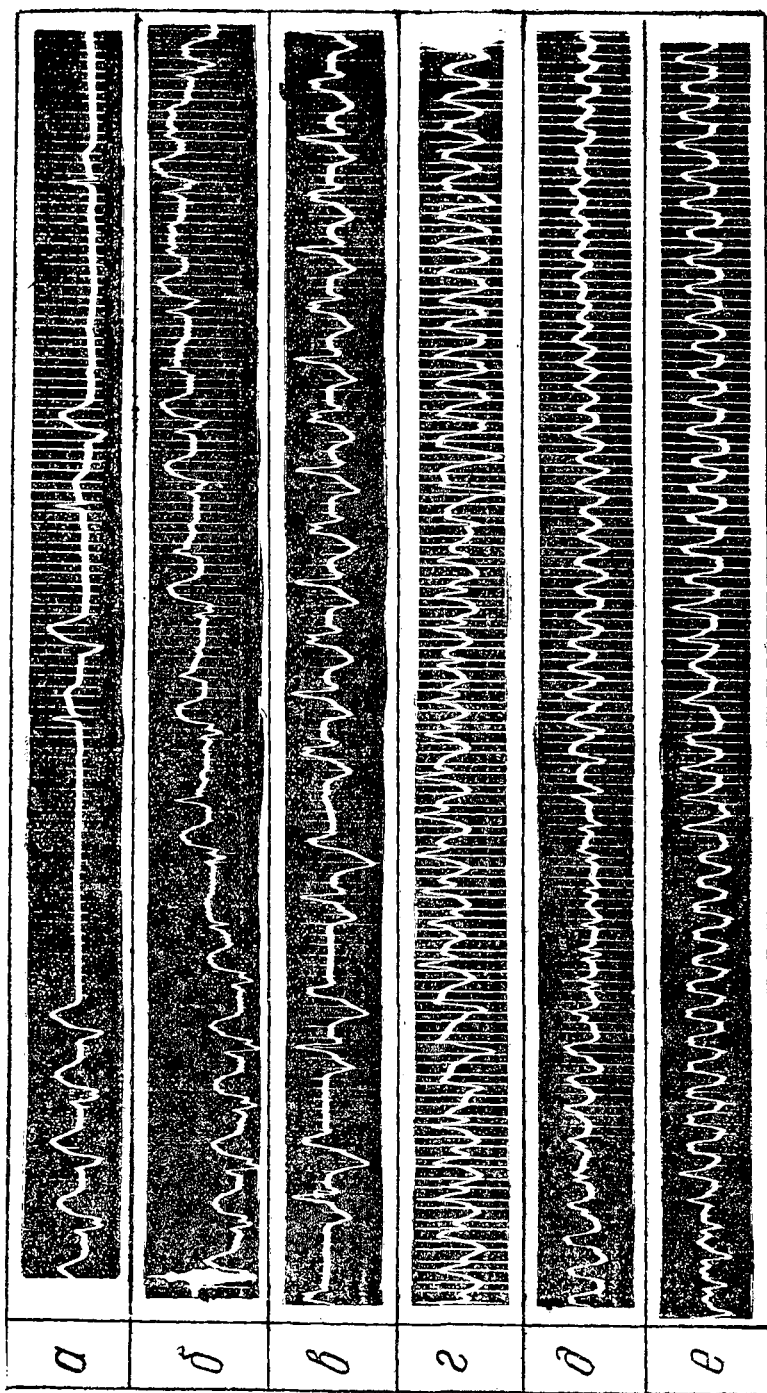


Рис. 81. Изменения электрокардиограммы после разрядов с емкостью 0,83 мкф при последовательном возрастании напряжения: а—после разряда с напряжением 39 кВ при токе 300 а; б—после разряда с напряжением 51 кВ при токе 575 а; в—через минуту после б; г—после разряда с напряжением 60 кВ (ток не засциллографирован); д, е—продолжение записи электрокардиограммы после г: переход тахикардии в трепетание и фибрилляцию желудочков.

Представляет интерес, что возникшая в результате воздействия мощных разрядов (70 кв, 500 а при емкости 0,18 мкф; 30 кв, 100 а при емкости 8,75 мкф) фибрилляция сердца могла быть устранена значительно менее мощным разрядом (24 мкф, 5 кв, 30 а), произведенным поперек трудной клетки. Это показывает, что испытанные нами разряды вызывали сравнительно легко обратимые нарушения проводимости и автоматии.

Наблюдавшееся в некоторой части опытов избирательное действие разряда на функцию дыхания или на сердечно-сосудистую систему объясняется, видимо, различными путями прохождения тока через организм. Преимущественное нарушение деятельности сердца наблюдалось, как правило, при тех испытаниях, при которых имел место пробой разрядного тока вдоль поверхности брюшных покровов, что способствовало пртеканию более сильного тока через сердце.

Сопrotивление туловища собаки разрядному току при нахождении электродов под кожей бедра и плеча колебалось в пределах 150—400 ом. В некоторых случаях получался непомерно большой ток разряда в связи с пробоем вдоль поверхности тела. Примером может служить одно испытание воздействия разряда с напряжением 62 кв на собаку весом 22 кг. Амплитуда тока получилась в 850 а, что соответствовало сопротивлению в цепи 70 ом. Такой сильный ток получился, однако, вследствие пробоя вдоль поверхности брюшных покровов. Возникший при этом большой ток через грудную клетку вызвал фибрилляцию сердца. Представляет интерес, что предшествующие испытания действия разрядов с напряжением 60, 65 и 62 кв, проведенные на той же собаке, сопровождалась значительно меньшим током (в 350, 430 и 560 а соответственно). Эффект этих воздействий сводился к резкому повышению артериального давления и кратковременной остановке дыхания.

Зависимость величины тока и его последствий от местоположения контактов иллюстрируют данные следующих испытаний, проведенных над собакой весом 19,5 кг. В каждом из трех опытов, проведенных над этой собакой, применялась емкость в 8,75 мкф. Заряд емкости производился до одинакового напряжения. Различным было лишь местоположение контактов: при первом испытании электроды—иглы были под кожей предплечья и голени, при втором—под кожей бедра и предплечья, а при третьем—под кожей бедра и плеча. Соответственно перемещению контактов величина испытанного напряжения и полученного тока на объекте менялись следующим образом:

1-й разряд—напряжение	—25,4 кв,	ток—14,6 а
2-й »	»	—25,4 кв, » —29,6 а
3-й »	»	—23,5 кв, » —75,5 а

Результатом первого разряда было учащение дыхания и подъем артериального давления до 220 мм рт. ст. Второй разряд вызвал замедление дыхания после кратковременного периода частого поверхностного дыхания. В результате третьего разряда произошла остановка дыхания на 33 секунды. Подъем артериального давления был примерно одинаковым во всех трех испытаниях.

В другом опыте над собакой весом 16,5 кг при аналогичных испытаниях с перемещением электродов были получены следующие данные:

1-й разряд—напряжение	—32,2 кв,	ток—14 а
2-й »	»	—32,2 кв, » —19,5 а
3-й »	»	—31,0 кв, » —40 а

Первый разряд вызвал остановку дыхания на 30 сек., второй—на 45 сек. После третьего разряда (произведенного с соблюдением одинакового интервала—в один час) дыхание прекратилось полностью и через 1 мин. 30 сек. было начато искусственное дыхание, которое привело к восстановлению естественного. Непомерно большое сопротивление туловища подопытной собаки и соответственно меньшая сила тока в данном опыте сопровождалась, однако, весьма тяжелыми последствиями. Сопоставление результатов испытаний над этими двумя собаками показывает, что *решающим является не общая сила тока* (величина которой может быть обусловлена таким приводящим фактором, как стечением разряда по поверхности тела), *а лишь та часть тока, которая протекает через тот или иной орган*, и которая может, по-видимому, значительно колебаться у разных объектов и при различных условиях испытания.

В ы в о д ы

1. Действие импульсных токов на организм изучалось на собаках весом от 6 до 28 кг. Продолжительность импульсов варьировалась от 0,1 до 10 м/сек. при максимальной амплитуде напряжения 10—110 кв и тока 20—600 а.

2. Исследование показало, что в зависимости от мощности импульса могут наступать следующие нарушения функций организма:

а) кратковременное учащение дыхания, подъем артериального давления и учащение темпа естественной автоматии сердца;

б) остановка дыхания на 10—20 сек. после предварительного затяжного вдоха, повышение артериального давления в два раза, сопровождающееся желудочковой тахикардией гетеротопного происхождения;

в) остановка дыхания на 30 сек. и более без предварительного вдоха, повышение артериального давления, а иногда понижение давления в результате периодического трепетания желудочков;

г) полная остановка дыхания, глубокие нарушения внутрижелудочковой проводимости, ведущие к наступлению реципрокного желудочкового ритма и фибриллярным сокращениям сердца.

3. Тяжелые нарушения дыхания и кровообращения от действия испытанных нами мощных импульсов являлись обратимыми: дыхание восстанавливалось в результате кратковременного проведения искусственного дыхания, а фибрилляция желудочков устранялась с помощью дефибриллятора.

4. Различные нарушения функций организма в зависимости от силы воздействия связаны, видимо, с тем, что *в реакции на относительно слабые воздействия основную роль играет болевой компонент*. Обусловленное им возбуждение сопровождается учащением дыхания и сердечной деятельности, повышением сосудистого тонуса и т. д. *При более же сильных воздействиях на первый план начинает выступать прямое повреждающее действие тока на центральную нервную систему и сердце*, в результате чего могут парализоваться дыхательные движения и развиться глубокие нарушения проводимости в специфической ткани сердца.
