

Рис. 6.8. Трансформация ритма в неоднородной по рефрактерности АС

го хвоста первого импульса в зоне с R_2 , то трансформации ритма не было бы. Различные поражения сердечной мышцы могут приводить к увеличению ее неоднородности по рефрактерности, к увеличению $\Delta R = R_2 - R_1$. Это, в свою очередь, увеличит вероятность появления трансформации ритма.

Трансформация ритма может возникнуть и при однопроводной блокаде (возникает экстрасистола). (см. табл. II на форзаце)

§ 24. Ревербераторы в неоднородных средах

Ревербераторы – источники спиральных волн возбуждения – могут возникнуть в неоднородных активных средах без отверстий. Этот процесс происходит на границе раздела участков активной среды с разными параметрами элементов этой среды, например, с разными рефрактерностями.

Рассмотрим две зоны активной среды с R_1 и R_2 , разделенные криволинейной границей СВ, и будем считать, что $R_2 > R_1$ (рис. 6.9).

По активной среде распространяются две волны возбуждения, причем вторая (2) посыпается сразу вслед за первой так, что $T > R_2$. Возникает трансформация ритма, и в силу этого волна 2 распространяется только слева от границы СВ по зоне с R_1 (рис. 6.9, а). Волна 2, двигаясь с той же скоростью V , что и волна 1, начинает на границе СВ отставать от нее. Это вызвано тем, что путь волны 1 к точке В идет по прямой АВ (она одинаково проходит по зоне с R_1 – слева, и по зоне с R_2 – справа от СВ). А путь волны 2 к точке В идет по кривой СВ, то есть путь второй

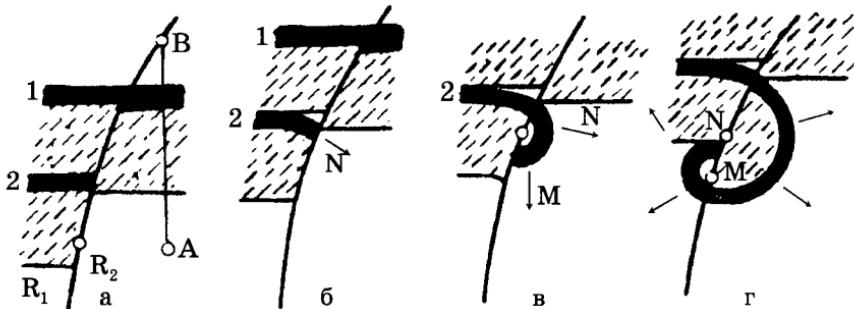


Рис. 6.9. Механизм возникновения ревербератора в неоднородной по R активной среде (стрелки указывают направление распространения фронта волны)

волны к точке В длиннее, чем первой. Причем, чем больше кривизна линии СВ, тем больше отставание второй волны. В некоторый момент времени вторая волна отстанет настолько, что ее т-зона выйдет из-под рефрактерного хвоста волны 1 и коснется покоящихся клеток в зоне с R_2 в точке N (рис. 6.9, б). Далее, в соответствии с принципом Гюйгенса, волна 2 начинает распространяться по зоне R_1 в виде спирали (рис. 6.9, в). По прошествии еще некоторого времени спиральная волна 2, выйдя из-под собственного рефрактерного хвоста (точка М на рис. 6.9, в), устремляется вниз по границе СВ, перейдет границу раздела и начнет разворачивать спираль уже в зоне R_1 (рис. 6.9, г). Линия NM называется фокусом ревербератора.

Свойства ревербераторов.

1. Главная особенность ревербераторов заключается в том, что в активной среде, в которой нет собственных источников возбуждения, возникает источник, посылающий волны возбуждения в окружающую среду (рис. 6.10). В норме от пейсмекера распространяется волна, проходящая через точку А, вызывающая в ней потенциал действия в момент времени t' (рис. 6.10, а). Ревербератор, возникший около точки А, вызовет в ней целую серию электрических ответов, определяемых не ритмом пейсмекера, а только свойствами самого ревербератора (рис. 6.10, б).

2. Время жизни ревербератора в неоднородной активной среде конечно. Оно определяется числом оборотов π волны возбуждения вокруг линии, разделяющей зоны R_1 и R_2 , то есть числом импульсов, проходящих через некоторую точку в активной среде:

$$n = 1 + \frac{\tau}{R_2 - R_1}.$$

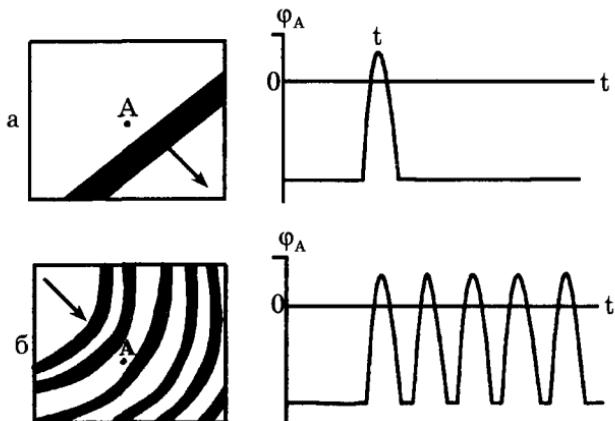


Рис. 6.10. Процесс возбуждения в точке А активной среды в норме (а) и при возникшем ревербераторе (б)

Исчезновение ревербератора объясняется тем, что после каждого оборота размер фокуса NM уменьшается и после n оборотов он сходится в точку.

Таким образом, чем больше неоднородность, тем короче время жизни ревербератора, тем меньше импульсов возбуждения пройдет через активную среду от этого источника (рис. 6.10б).

3. Частота волн, посыпаемых ревербератором, есть максимально возможная частота возбуждения данной среды. Иными словами, спиральная волна в неоднородной среде неправильная: она имеет период $T_2 \sim R_2$ справа от линии СВ и $T_1 \sim R_1$ слева от этой линии. Поэтому спиральные волны от ревербераторов в принципе не синхронизируются.

4. Размер ревербератора определяется фокусом (рис. 6.9г):

$$l_{\min} = (R_2 - \tau) \cdot V$$

и может быть меньше длины волны λ .

5. Ревербераторы могут размножаться на границах неоднородностей активной среды.

Из указанных свойств следует:

1. Если скорость размножения ревербераторов больше скорости их исчезновения, начинается цепной процесс увеличения количества ревербераторов (аналогично цепной реакции при взрыве урановой бомбы). Вся активная среда покрывается источниками спиральных волн с разными частотами. Этот случай соответствует фибрилляции активной среды (миокарда сердца).

2. На основе анализа математической модели установлено, что цепные процессы размножения ревербераторов возникают, когда число возникших ревербераторов больше некоторого критического K_{min} . Эта величина сильно зависит от отношения времени возбуждения τ к периоду рефрактерности R (рис. 6.11):

$$K_{min} = \frac{2 + \tau(R_2 - R_1)}{\tau(R_2 - R_1) - (R_1 - \tau)(R_2 - R_1)} + 1.$$

В случае малой разницы периодов рефрактерности двух областей ($R_1 \approx R_2 = R$) для $\frac{\tau}{R} > \frac{1}{2}$ можно записать:

$$K_{min} \approx \frac{\tau}{2\tau - R_1}.$$

Таким образом, показано, что существует некоторая критическая масса миокарда m_{kp} , в которой могут возникнуть размножающиеся ревербераторы. Если масса сократительного миокарда меньше m_{kp} , то в ней одновременно может появиться лишь малое число источников спиральных волн. Оно будет недостаточно для образования цепной реакции их размножения. Очевидно, что чем больше величина K_{min} , тем меньше вероятность лавинного увеличения числа ревербераторов. Как следует из рисунка 6.11, в целях уменьшения риска сердечных аритмий может оказаться эффективным уменьшение параметра τ/R .

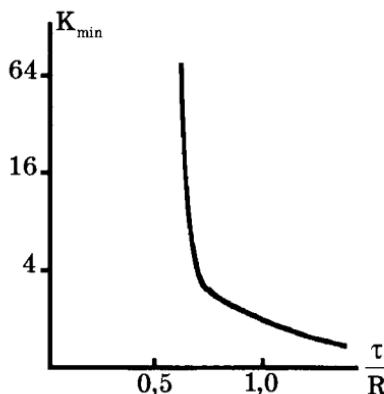


Рис. 6.11. Минимальное число ревербераторов, вызывающих незатухающие автоволновые процессы в активных средах

При разработке антиаритмиков биофизики исследовали связанный с параметром τ , параметр θ – время возникновения ответа на подаваемый импульс, то есть латентный период. Параметр θ можно измерить электрофизиологическими методами. Исследования автоволновых процессов показали, что опасность возникновения ревербераторов возрастает при увеличении θ/R .

В настоящее время установлено, что медицинские приложения теории автоволновых процессов не ограничиваются фибрилляцией миокарда. Открыты, например, патологические автоволновые процессы, возникающие в нервных сетях коры головного мозга при эпилепсии. Показан автоволновой процесс распространения депрессии в сетчатке глаза и др.

Контрольные вопросы, задачи, задания

1. В чем состоит принципиальное отличие автоволн в активных средах от механических волн в упругих средах?
2. Почему автоволна распространяется в активной среде без затухания?
3. Наблюдается ли в активных средах интерференция автоволн?
4. От чего зависят параметры автоволн в активной среде?
5. Потенциал порока для клеток участка миокарда равен – 30 мВ. Трансмембранный потенциал клеток этого участка в некоторый момент времени достиг величины – 40 мВ. Может ли по данному участку миокарда передаваться волна возбуждения?
6. Две автоволны движутся навстречу друг другу (рис. 6.4) с одинаковыми скоростями. Рефрактерность первой зоны 100 мс. При каких условиях волна, входя во вторую зону, не аннигилирует?

Типовые тесты текущего контроля

- 6.1. Волна возбуждения (автоволна), распространяясь по активной среде (например, по структуре миокарда), не затухает:
 1. за счет передачи энергии от одной клетки к другой
 2. за счет высвобождения энергии, запасенной каждой клеткой
 3. в результате передачи механической энергии сокращения миокарда
 4. в результате использования энергии электрического поля
- 6.2. Длина волны возбуждения в активной среде зависит от:

- а. амплитуды потенциала действия кардиомиоцита
 б. от скорости распространения волны по миокарду
 в. от частоты импульсов пейсмекера
 г. от длительности рефрактерного периода возбужденной клетки

1. аб 2. бг 3. вг 4. аг

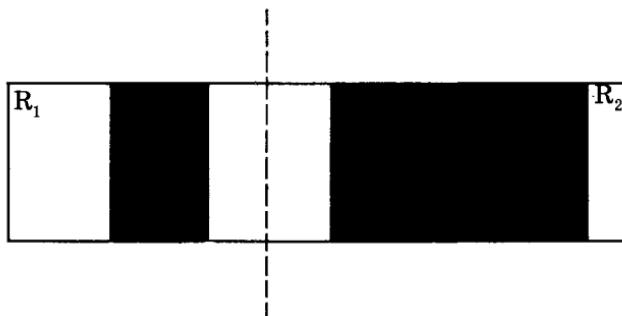
6.3. Циркуляция автоволны (reentry) длительностью λ в кольце с периметром l может возникнуть при условии:

1. $\lambda = 2l$ 2. $\lambda >> l$ 3. $\lambda < l$

6.4. Если в неоднородной активной среде имеются зоны с рефрактерностями R_1 и R_2 ($R_2 > R_1$) и импульсы от пейсмекера следуют с периодом T , то трансформация ритма может возникнуть при условии:

1. $T < R_2$ 2. $T > R_1$ 3. $T = R_2 - R_1$

6.5. Две волны возбуждения движутся по активной среде (миокарду). Их параметры заданы на рисунке. В какую сторону движутся волны? Каково условие прохождения волны II в зону R_1 (пунктир – граница между зоной с рефрактерностью R_1 и R_2 , скорости волн V одинаковы)?



- а. обе волны движутся влево
 б. волны движутся навстречу
 в. волны взаимно удаляются

- г. $VR_1 > V\tau_2$
 д. $VR_1 < V\tau_2$
 е. $VR_1 > VR_2$

1. вд 2. бе 3. аг 4. бд

6.6. Возникновение спирального источника волны возбуждения (ревербератора) в некоторой зоне миокарда вызывает в окрестности этой зоны:

1. увеличение частоты сокращений
2. уменьшение частоты сокращений
3. не изменяет частоту сокращений
4. прекращает сокращения зоны

6.7. Вероятность возникновения множества спиральных источников волн возбуждения в сердце (фибрилляция) возрастает, если:

- а. увеличивается сократимость миокарда
 - б. появляются зоны неоднородности по рефрактерности
 - в. появляются зоны неоднородности по скорости проведения волн
 - г. появляются дефекты в работе клапанов
 - д. возникают частые ранние импульсы возбуждения
1. абв 2. вгд 3. бвд 4. адг

ГЛАВА 7. БИОФИЗИКА МЫШЕЧНОГО СОКРАЩЕНИЯ

Мышечная активность – это одно из общих свойств высокоразвитых живых организмов. Вся жизнедеятельность человека связана с мышечной активностью. Независимо от назначения, особенностей строения и способов регуляции принцип работы различных мышц организма одинаков.

Мышечная клетка отличается от других возбудимых клеток таким специфическим свойством, как сократимость, то есть способность генерировать механическое напряжение и укорачиваться. Кроме того, мышцы являются генератором тепла, причем не только при мышечной работе, холодовой дрожи, но и в режиме нетонического термогенеза.

Мышечная активность в процессе жизнедеятельности обеспечивает работы отдельных органов и целых систем: работу опорно-двигательного аппарата, легких, сосудистую активность, желудочно-кишечного тракта, сократительную способность сердца. Нарушение работы мышц (например, определяя-