

Автоволновые процессы в активных средах

Колебания – процессы, которые повторяются во времени.

Волна – процесс распространения колебаний или отдельных видов возмущений в пространстве. (механические, электромагнитные)

Виды колебаний

- Свободные – колебания совершающиеся без подвода энергии извне. Являются затухающими колебаниями.
(колебания тканей при перкуссии, удар молотом по колоколу)
электромагнитные и механические волны
- Вынужденные – совершаются под воздействием внешней, периодически изменяющейся силы.
(колебания звуковых связок под действием воздушного потока)
электромагнитные и механические волны

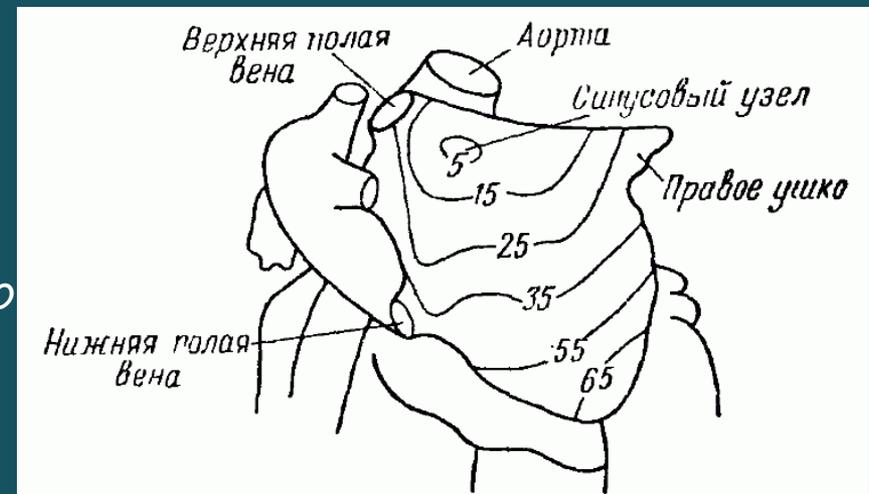
Автоколебания – в этих системах восполнение растрчиваемой энергии происходит за счет внутреннего источника энергии.
(синусовый узел сердца) *волны возбуждения*



Синусовый узел сердца



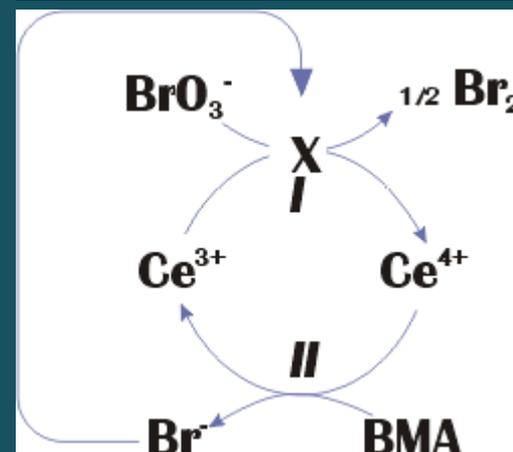
Схема распространения волны по правому предсердию



Реакция Белоусова (лимонная) – Жаботинского (малоновая)

Белоусов (1951) - окисление лимонной кислоты броматом калия, катализируемое ионной парой $Ce^{4+} - Ce^{3+}$.
продолжил **Жаботинский (1964)**, показал, что в качестве катализатора вместо церия можно применять марганец и железо, а в качестве восстановителя вместо лимонной кислоты можно использовать ряд органических соединений, либо имеющих метиленовую группу, либо образующих ее при окислении (к ним относятся малоновая и броммалоновая кислоты)

Схема реакции Белоусова – Жаботинского

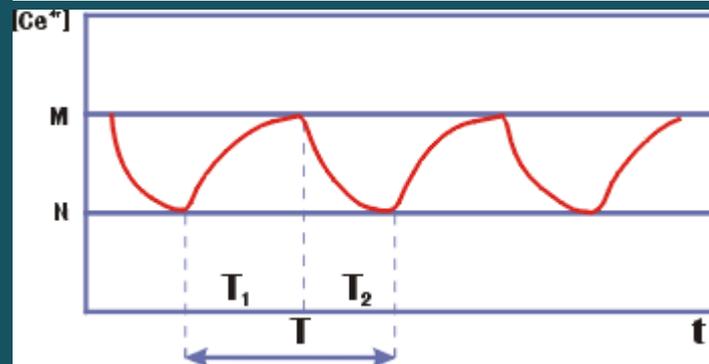


Переходы церия III в IV сопровождаются изменениями окраской от розовой до голубой и обратно с частотой порядка 10^{-2} Гц. Число стадий не менее 11.

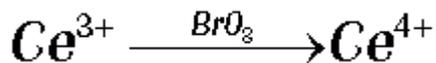
$Ce^{III} \rightarrow Ce^{IV}$ (окислитель бромат, BrO_3^-)

$Ce^{IV} \rightarrow Ce^{III}$ (восстановитель малоновая кислота)

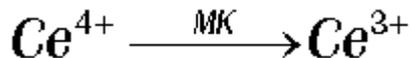
Колебания в модели Жаботинского (Жаботинский, 1974)



1. окисление трехвалентного церия броматом:



2. восстановление четырехвалентного церия малоновой кислотой:



Пригожин Илья Романович 1955

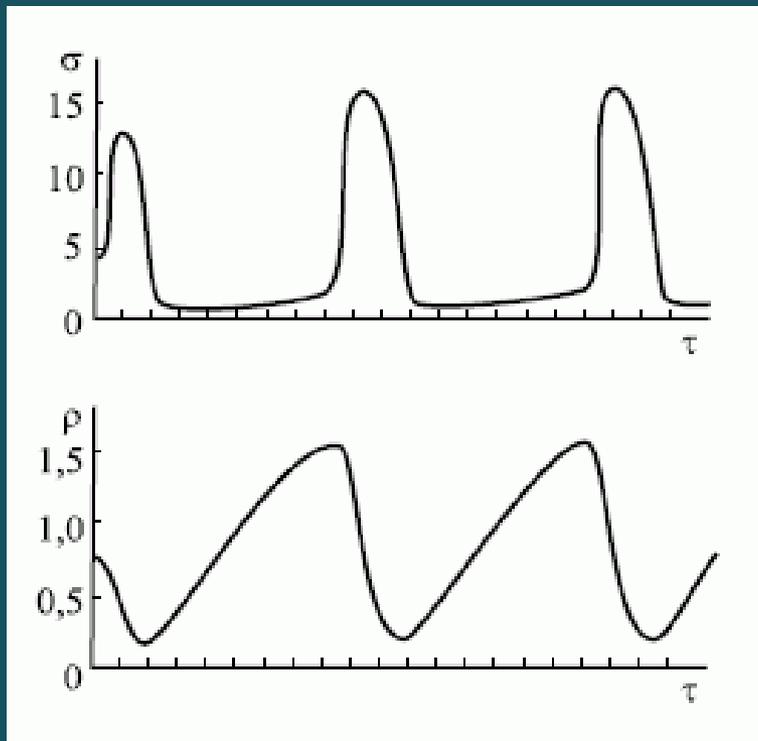
- Показал, что в открытой системе химические колебания возможны около стационарного состояния, достаточно удаленного от термодинамического равновесия; колеблется только величина скорости производства энтропии, а её знак всегда остается положительным.

Колебания в ферментативных системах (ФС)

- Нелинейность кинетики биохимических процессов обуславливает возможность существования незатухающих периодических режимов (автоколебания).
- Колебания в химических реакциях возможны лишь вдали от термодинамического равновесия.
- Для этого необходимо, чтобы изменение концентраций двух различных групп реагентов происходило в двух сильноразличающихся масштабах времени.
- Колебания в замкнутых ФС всегда являются затухающими. (стремятся к равновесному состоянию)
- Незатухающие колебательные изменения концентраций реагентов возможны лишь в открытых ФС. (приток субстрата из внешнего источника, отток продукта во внешнюю среду)

Концентрационные автоколебания в системе

Условия возникновения колебаний концентраций



- Нелинейный механизм реакции. (наличие обратной связи, например аллостерическое регулирование)
- «Открытость» ФС
- Существенное различие характерных времен отдельных стадий процесса

Активная среда, автоволны.
Отличие от механических и
электромагнитных волн.

- **Активная среда (АС)** – среда, состоящая из большого числа отдельных элементов (клеток), каждый из которых является автономным источником энергии.

Элементы АС имеют контакт между собой и могут передавать импульс возбуждения от одной клетки к другой.

Энергия при передаче импульса намного ниже энергии высвобождающейся в клетке при распространении волны возбуждения.

Примеры: *нервные волокна и нервные сети, мышечные структуры сердца, гладко-мышечные волокна сосудов, желудочка.*

- **Автоволны** –самоподдерживающиеся волны возбуждения в активной среде.

Характеристики волны (период, длина волны, скорость распространения, амплитуда, форма) остаются постоянными за счет распределенных в среде источников энергии.

Характеристики волны (в установившемся режиме) зависят только от локальных свойств активной среды и не зависят от начальных условий.

- При распространении автоволны (в отличие от механических и электромагнитных), *не происходит переноса энергии*.
- **Энергия** не переносится, а *освобождается*, когда до участка активной среды доходит возбуждение.

Динамические явления в АС – автоволновые процессы (АВП)

- БИ, БФ – распространение возмущения в виде бегущего импульса или бегущего фронта.
- ВЦ – генерация волн автономными источниками импульса активности, ведущими центрами.
- КСВ – квазистохастические волны.
- СА – синхронные автоколебания во всем пространстве.
- Ревербераторы.
- СВ – спиральные волны.
- Стоячие волны.
- ДС – стационарные во времени неоднородные распределения в пространстве кинетических переменных (концентраций веществ), диссипативные структуры.

Распространение автоволн
в однородной среде.

τ – модель Винера и
Роземблюта.

$$\frac{l}{r_i} \cdot \frac{\partial^2 \varphi_M}{\partial x^2} = C \frac{\partial \varphi_M}{\partial t} + g_{Na} (\varphi_M - \varphi_{Na}^p) + g_K (\varphi_M - \varphi_{K}^p) + I_{ут}$$

Уравнение описывает распространение волны возбуждения по сократительным структурам миокарда

**Для описания автоволновых процессов
используют модели активных сред,
одна из них
тау модель Винера и Роземблота**

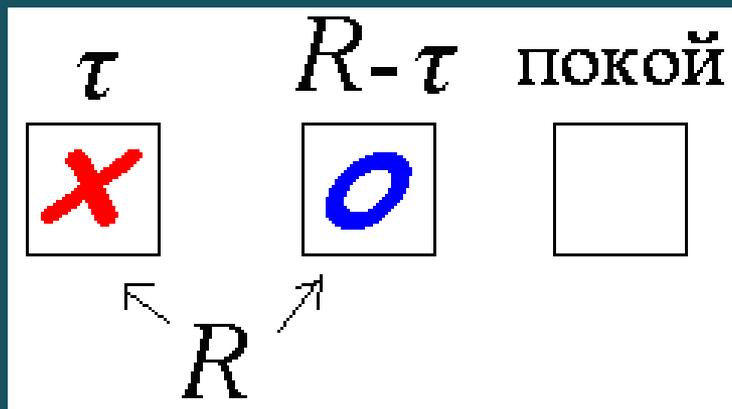
постулаты

В τ -модели, каждый элемент активной среды, может находиться в одном из трех состояний (фазовых состояний):

1. τ — возбуждение

2. $R - \tau$ — «рефрактерный хвост»

3. покой



Элемент в состоянии τ

(возбуждения):

- не может быть возбуждён соседним элементом
- может возбудить соседний элемент, находящийся в состоянии покоя

Элемент в состоянии $R - \tau$ (рефрактерного хвоста):

- не может быть возбуждён соседним элементом
- не может возбудить соседний элемент, находящийся в состоянии покоя

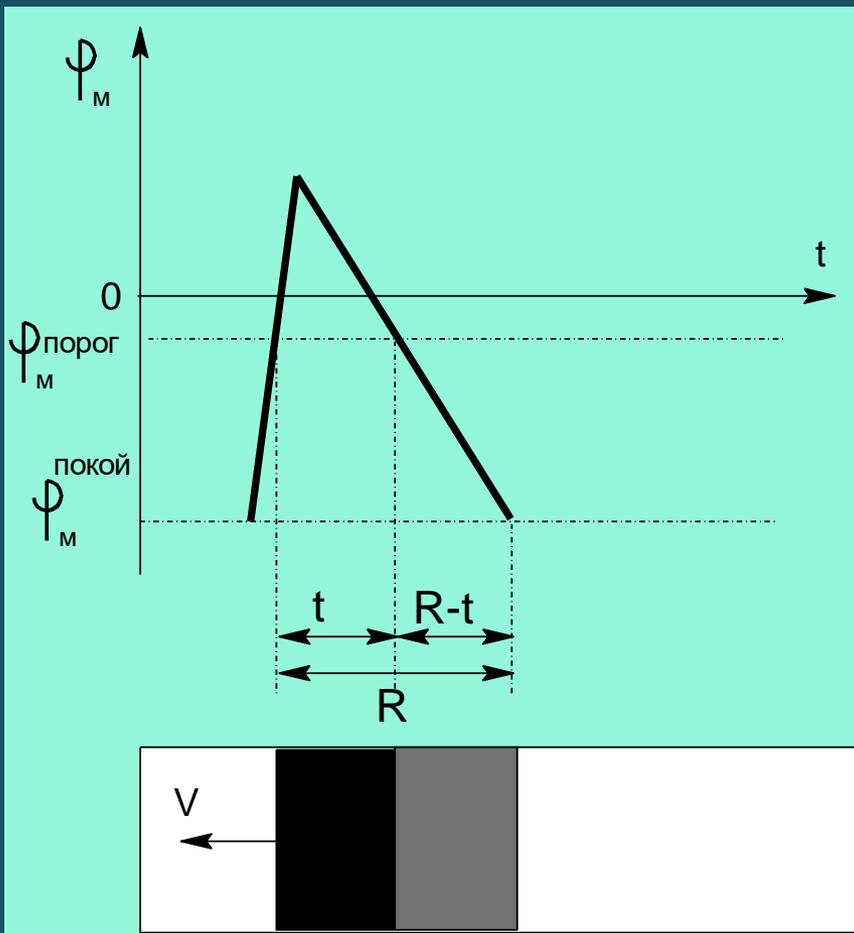
Элемент в состоянии покоя:

- может быть возбуждён соседним элементом (при условии, что трансмембранный потенциал соседнего элемента выше значения порога рассматриваемого).
- не может возбудить соседний элемент

Постулаты модели Винера и Роземблюта

- Каждая клетка, являющаяся элементом АС, может находиться в одном из трех состояний:
- **возбуждение** – τ , если ее трансмембранный потенциал больше порогового. В этом состоянии клетка не возбудима, но может возбудить соседнюю клетку, находящуюся в состоянии покоя.
- **«рефрактерный хвост»** - ($R - \tau$), если значение ее трансмембранного потенциала больше потенциала покоя, но меньше порогового. Клетка не возбудима в таком состоянии, и не может возбудить соседнюю клетку, находящуюся в покое.
- **покой** – значение потенциала равно потенциалу покоя. Может быть возбуждена соседней клеткой при условии, что ее трансмембранный потенциал выше значения порога рассматриваемой.

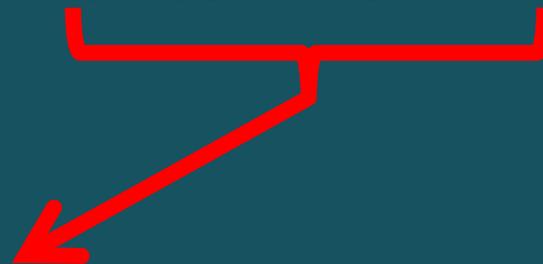
Графическое представление τ -модели



Допущения модели

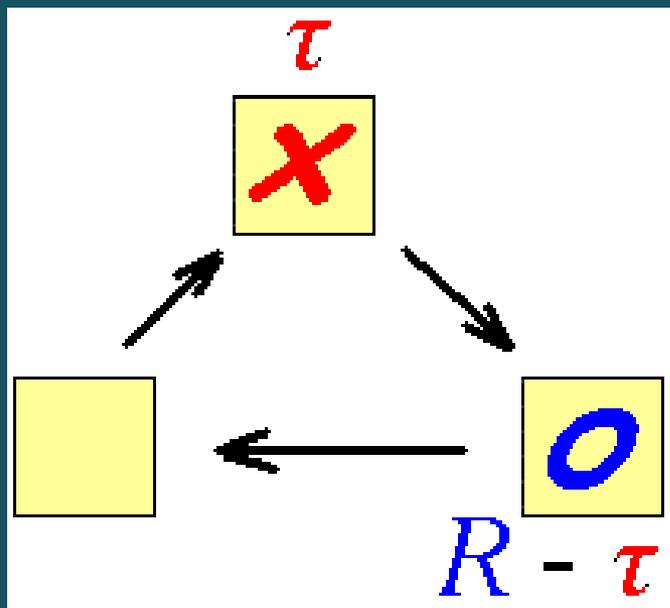
Конфигурация потенциала действия упрощена и близка к прямоугольному треугольнику.

Не учитывается состояния относительной рефрактерности, весь период R считается абсолютно рефрактерным.



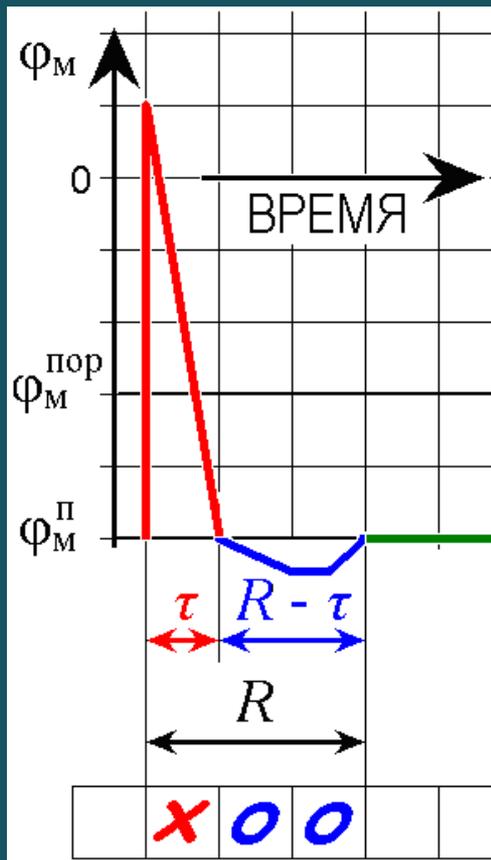
Волна возбуждения - это зона из n клеток, находящихся в рефрактерной фазе, которая движется по области покоящихся клеток с $V = \text{const}$

возможны лишь три типа перехода элемента из одного фазового состояния в другое:



- возбуждение \rightarrow рефрактерный хвост
- рефрактерный хвост \rightarrow покой
- покой \rightarrow возбуждение

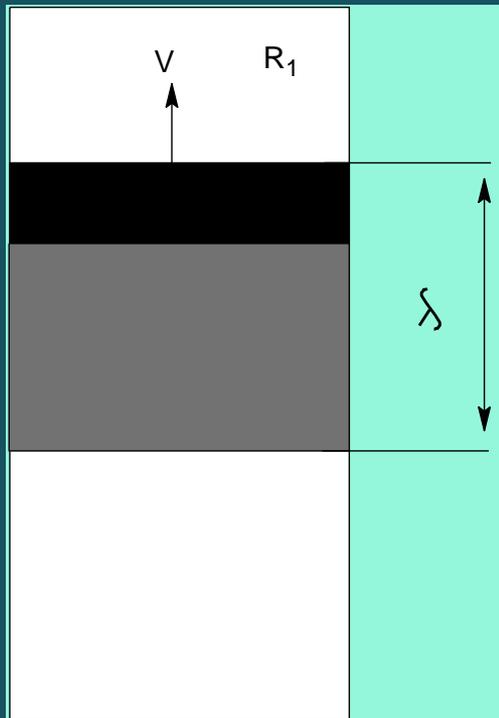
Графическое представление τ -модели (с изменениями)



- R – рефрактерность.
- τ – элемент, находящийся в состоянии возбуждения.
- $R - \tau$ – рефрактерный хвост.
- Пустые клетки — элементы, находящиеся в покое.

Основные свойства автоволн в АС

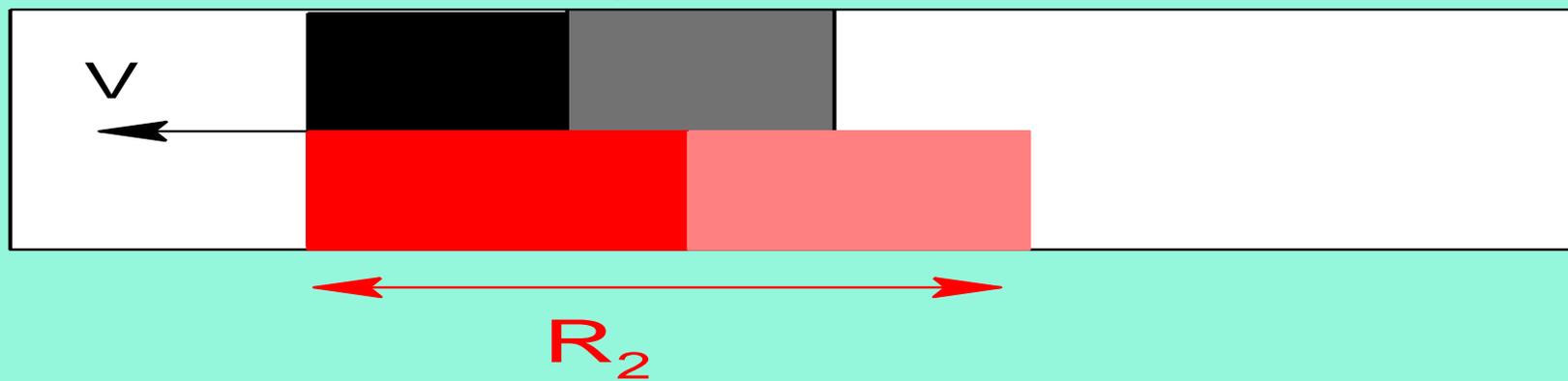
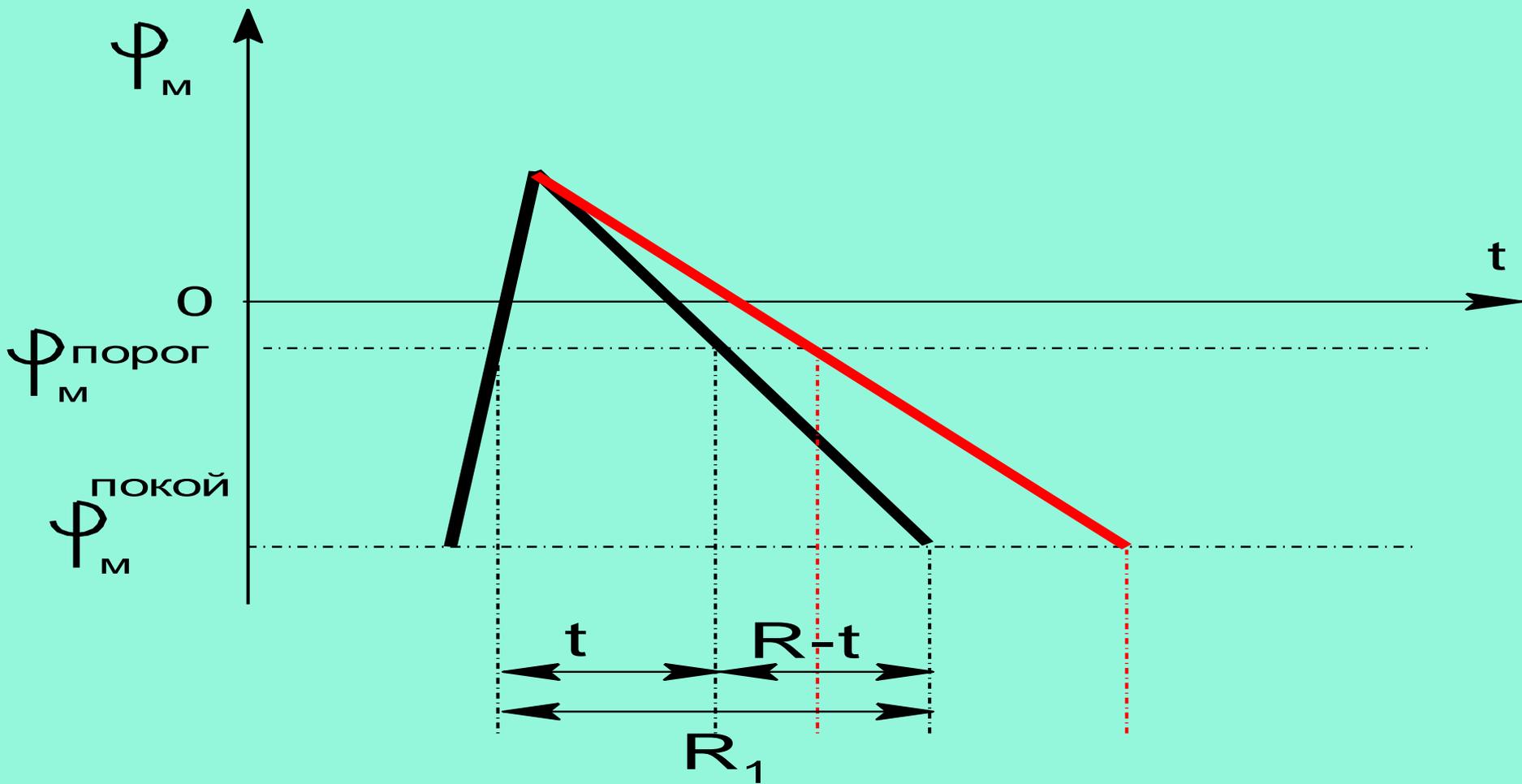
- Автоволна распространяется без затухания.
- Автоволны не интерферируют.
- Автоволны не отражаются от препятствий.
- Направления распространения автоволны определяется зонами рефрактерности и покоя



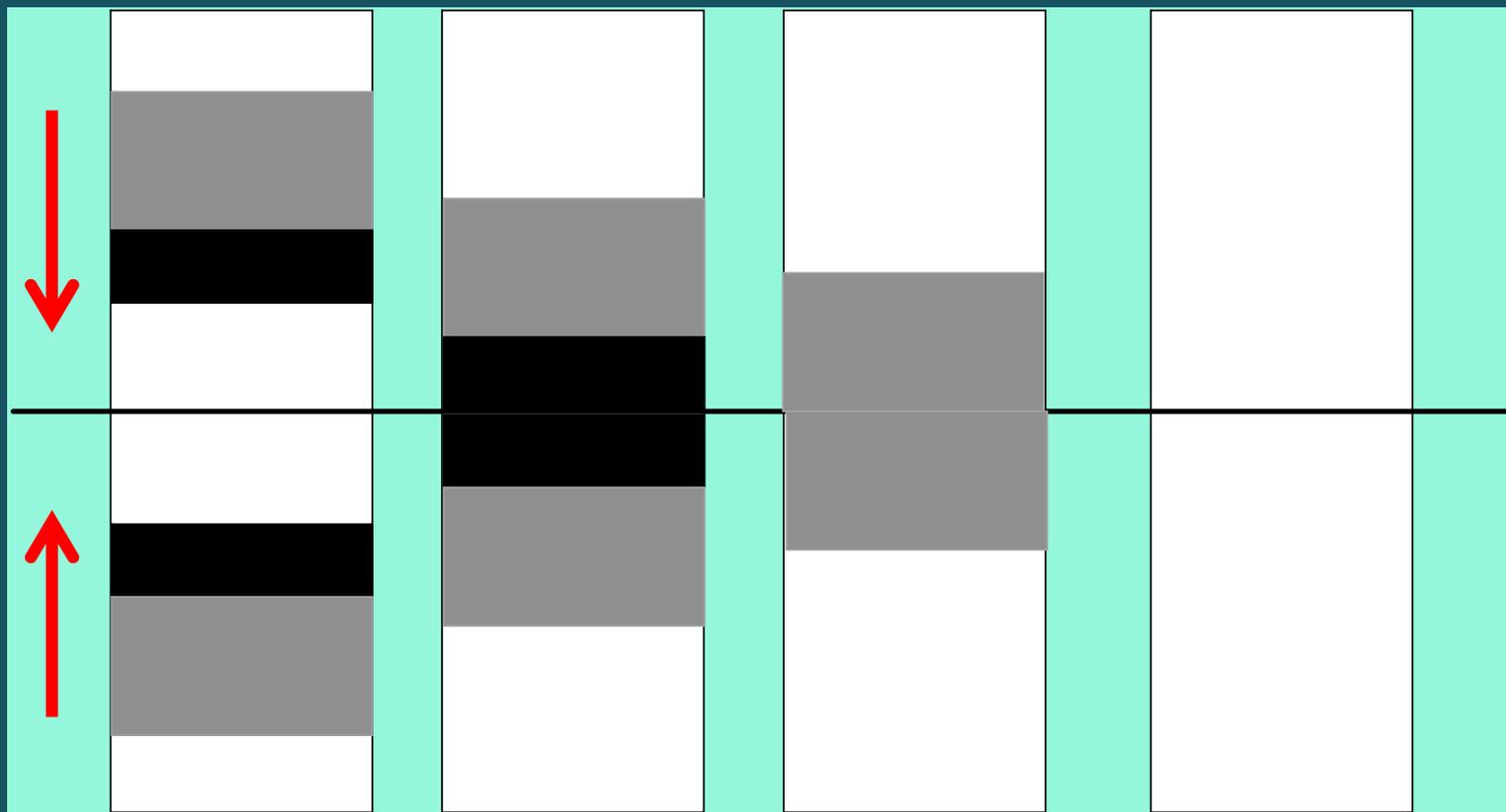
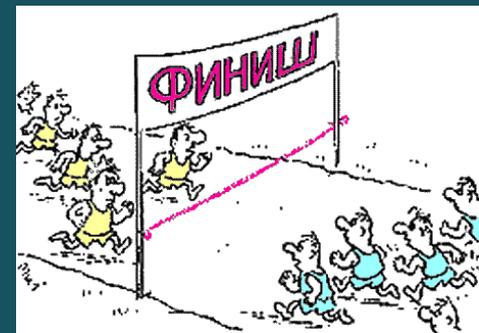
Длина волны возбуждения λ определяется
 $\lambda = R \cdot V$

Если рефрактерность клеток некоторого участка повышена по сравнению с R_1 , то и длина волны возбуждения в этом участке больше.

В однородных средах, в которых R и V одинаковы в любом участке, длина волны возбуждения постоянна.



Аннигиляция плоских автоволокн в АС



Неоднородная среда

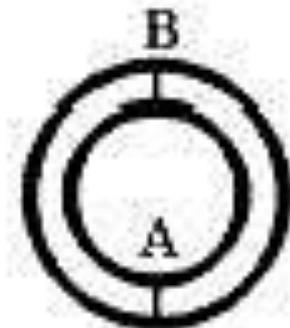
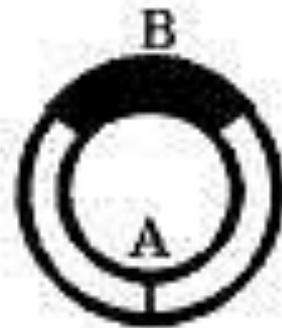
- Активная среда, в различных участках которой рефрактерность (R) и скорость (V) могут быть не одинаковыми.
- Неоднородна, например, мышечная ткань. Могут проходить на разных участках кровеносные сосуды, нервные волокна.
- Неоднородны при патологиях зоны некроза и участки нормальной мышцы.

**Умовляя возникновения
циркуляци автоволн.**

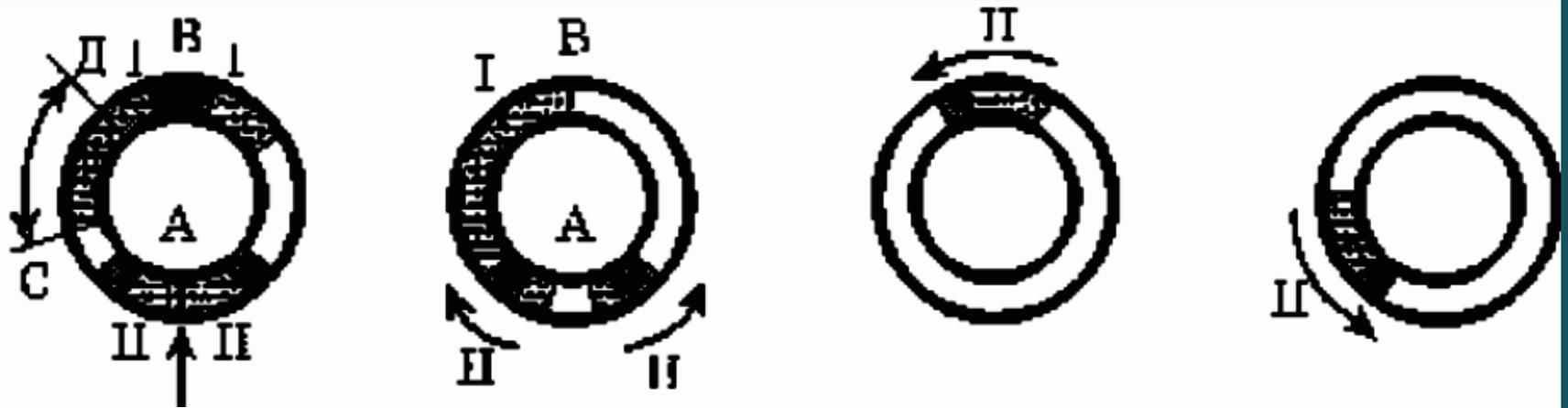
Аннигиляция волн в кольце однородной АС



Возбуждение



Циркуляция возбуждения в кольце неоднородной по рефрактерности АС



*Второе
возбуждение*

Условия возникновения циркуляции

- Время между посылкой двух импульсов возбуждения T должно быть меньше периода рефрактерности:

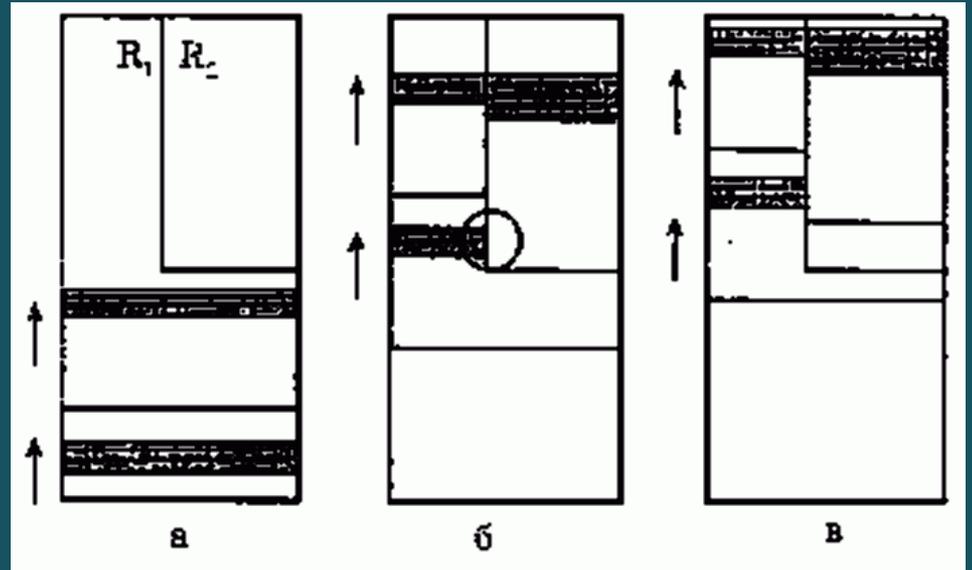
$$T < R_2$$

- Длина окружности кольца $l=2\pi r$ должна быть больше длины волны возбуждения:

$$l > \lambda$$

Трансформация ритма в неоднородной среде.

- $R_2 > R_2$
рефрактерность второй области больше.
- $T < R_2$
интервал между посылкой двух импульсов возбуждения T меньше периода рефрактерности R_2 .
- Возникает разрыв фронта волны.



Таким образом, получив два стимулирующих импульса, в зоне с R_2 пройдет только первый импульс.
Патология – экстрасистола.

Ревербератор в среде с отверстием

- Фронт автоволны распространяется по активной среде не прямолинейно, а закручивается в виде спирали вокруг отверстия.
- Период вращения автоволн ревербератора:
 $T = l / v$
- Величины l (периметр отверстия) и v зависят от параметров АС.
- Ядро ревербератора м.б. анатомическим отверстием, невозбудимой зоной, зоной с существенно пониженной возбудимостью.
- Патологии – некроз, ишемия, предсердные аритмии

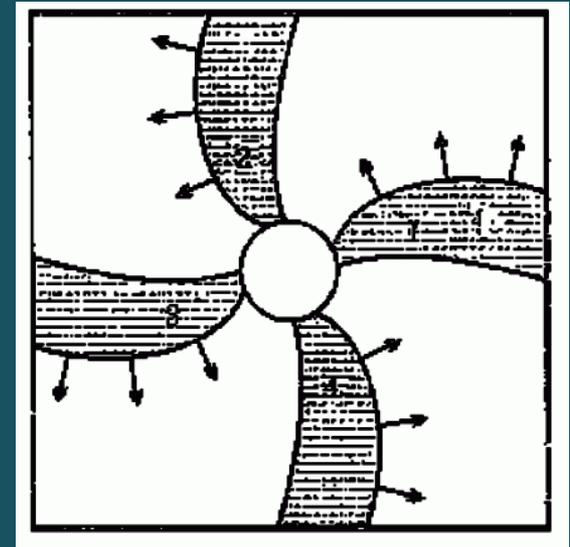


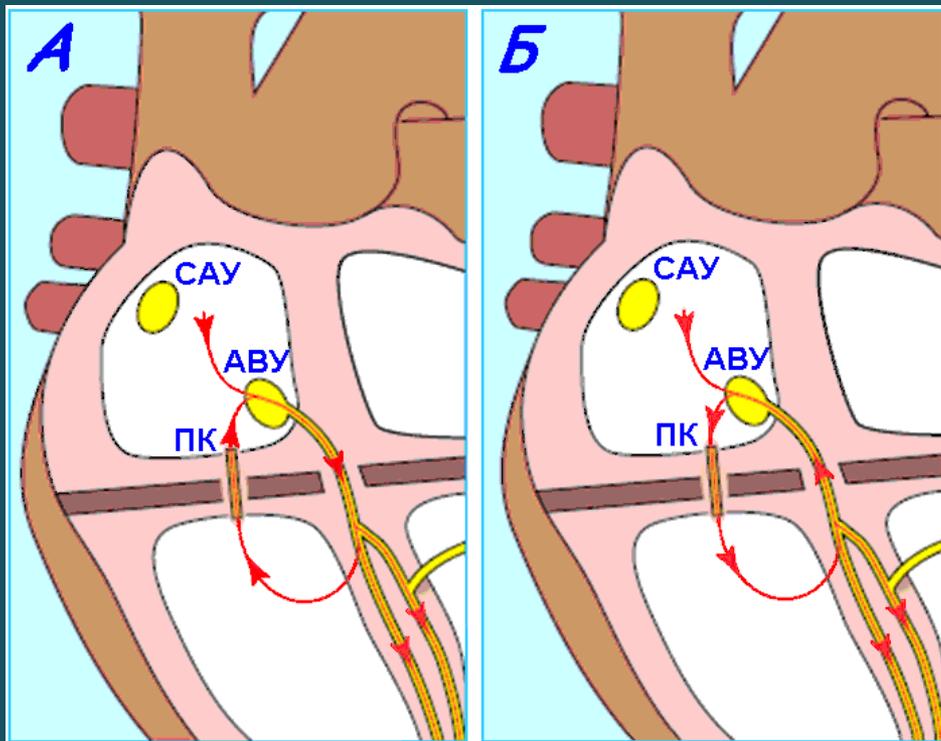
Рис. 16.8. Спиральные волны

Как предотвратить циркуляцию возбуждения по замкнутой структуре?

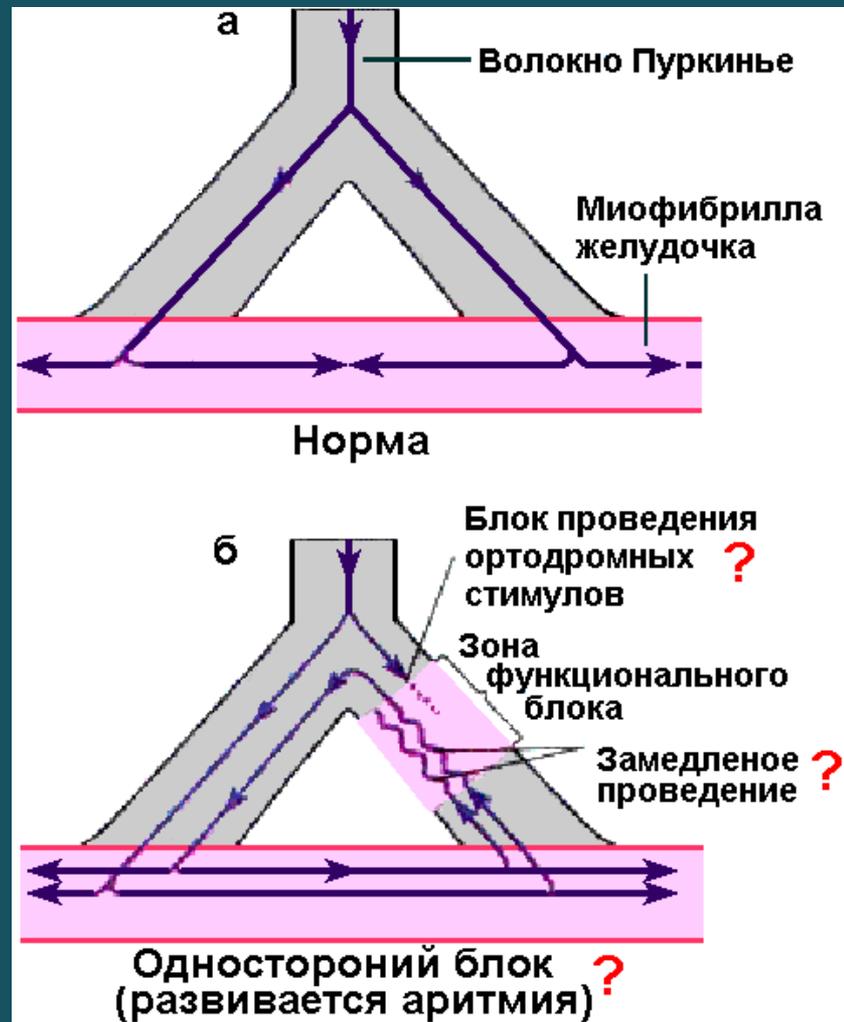
Есть два основных способа:

- уравнивать рефрактерность всех элементов замкнутой возбудимой структуры
 - снизить высокую рефрактерность «ненормальных» элементов возбудимых структур до уровня рефрактерности «нормальных».
 - повысить рефрактерность «нормальных» элементов до уровня рефрактерности «ненормальных».
- усилить рефрактерность «ненормальных» элементов до уровня, когда их период рефрактерности станет равен или больше времени прохождения возбуждения по «обходному» пути.

Механизм возникновения ортодромной (А) и антидромной (Б) атриовентрикулярной тахикардии при повторном входе возбуждения через дополнительные проводящие пути (пучок Кента).



САУ – сино-атриальный узел,
 АВУ – атриовентрикулярный узел,
 ПК – пучок Кента.

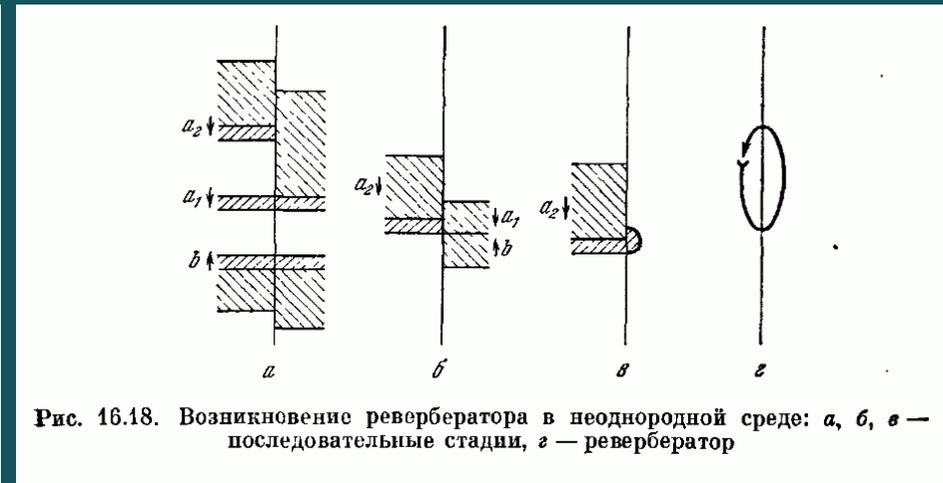
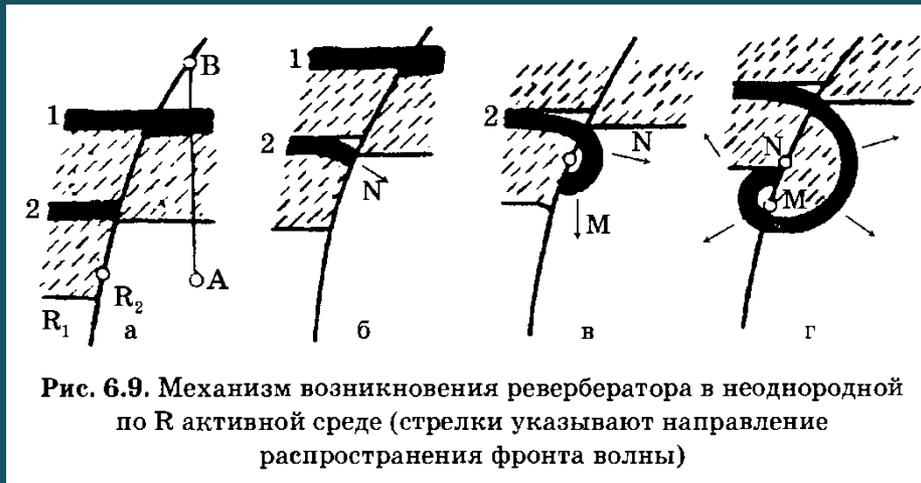


Возникновение ревербератора обычно связано с разрывом фронта волны



Схема образования ревербератора из разрыва фронта волны
Жирная линия - возбуждение

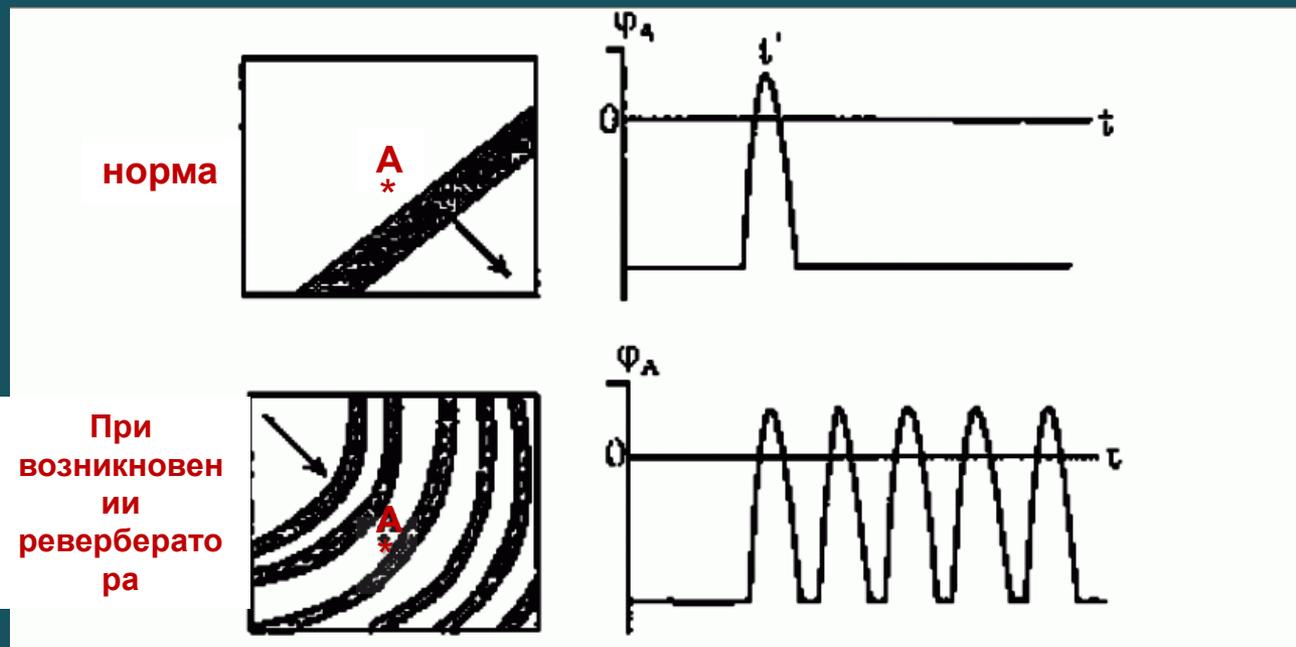
Ревербераторы в неоднородных средах



- Ревербераторы могут возникнуть в неоднородных АС без отверстий на границе раздела участков с разными рефрактерностями.
- T второй волны меньше R_2 .

Свойства ревербератора

- В активной среде, в которой нет собственных источников возбуждений, возникает источник, посылающий волны.



Возбуждение в точке А АС

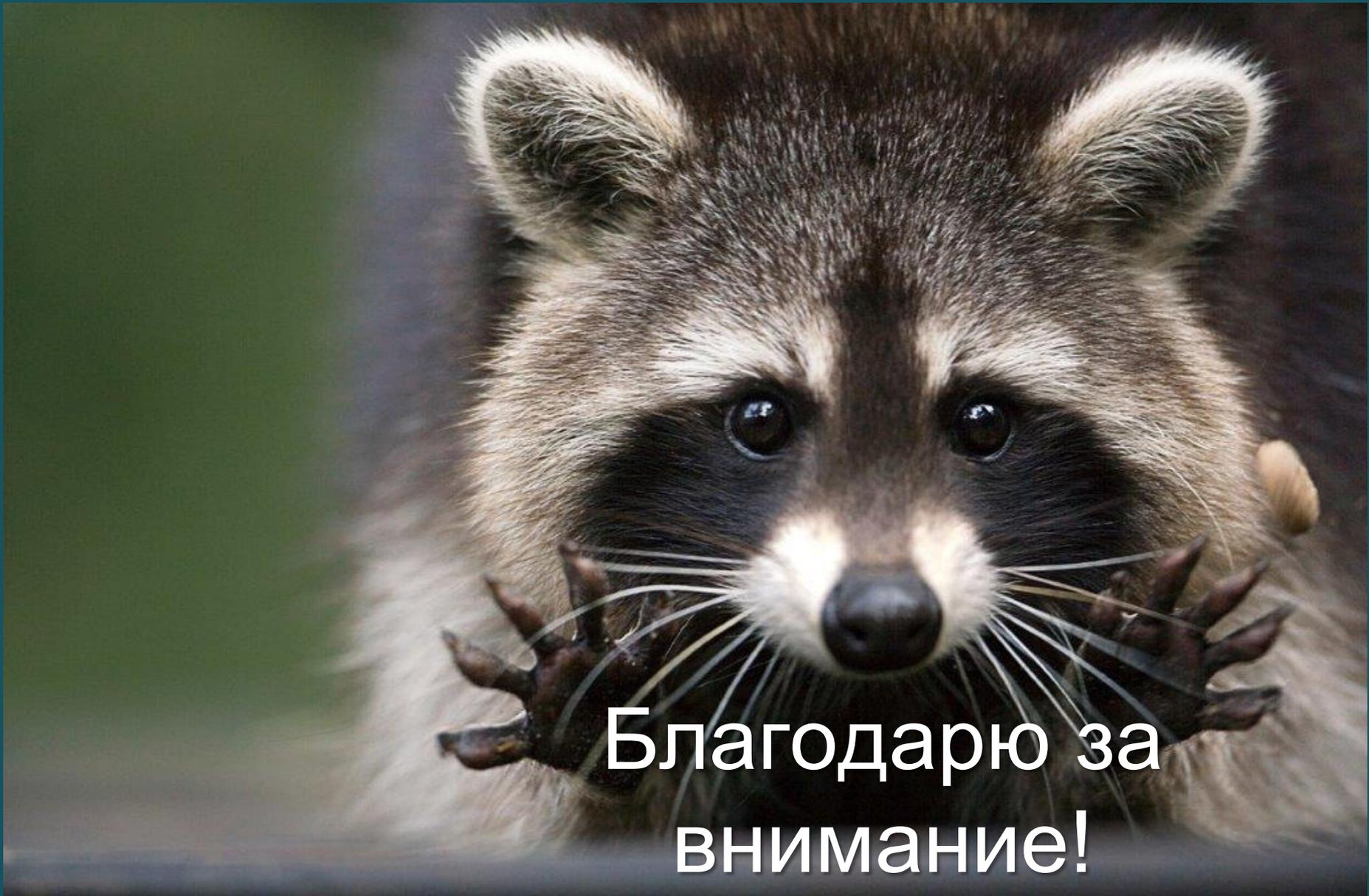
Свойства ревербератора

- Время жизни ревербератора в неоднородной АС конечно. Определяется числом оборотов n волны возбуждения. Чем больше неоднородность, тем короче время жизни ревербератора.

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

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

Частота волн, посылаемых ревербератором, есть максимальная возможная частота возбуждения данной среды. Размер ревербератора определяется фокусом: $l = (R_2 - t) \cdot V$
Ревербераторы могут размножаться на границах неоднородностей АС.



Благодарю за
внимание!