

Транспорт веществ через биологические мембраны

Проницаемость мембраны - это способность мембраны пропускать через себя атомы, ионы, молекулы веществ.

Химическим потенциалом (μ) данного вещества называется величина, численно равная энергии Гиббса, приходящаяся на один моль этого вещества.

Для разбавленного раствора вещества с концентрацией C :

$$\mu = \mu_0 + RT \ln C ,$$

где μ_0 - стандартный химический потенциал, численно равный химическому потенциалу данного вещества при его концентрации 1 моль/л в растворе; R – газовая постоянная, T – температура.

Электрохимический потенциал μ' -

величина, численно равная энергии Гиббса G на один моль данного вещества, помещенного в электрическое поле.

Для разбавленных растворов:

$$\mu' = \mu_0 + RT \ln C + zF\varphi, \quad (1)$$

где F - число Фарадея, z - заряд иона электролита (в элементарных единицах заряда), φ - потенциал электрического поля.

Транспорт
веществ
через
мембраны

```
graph TD; A[Транспорт веществ через мембраны] --> B[Пассивный]; A --> C[Активный]
```

Пассивный

Активный

Пассивный перенос веществ через мембрану

Пассивный транспорт - это перенос вещества из мест с большим значением электрохимического потенциала к местам с его меньшим значением. Пассивный транспорт идет с уменьшением энергии Гиббса, и поэтому этот процесс может идти самопроизвольно без затраты энергии.

Плотность потока вещества j_m при пассивном транспорте подчиняется ***уравнению Теорелла***:

$$j_m = - UC(d\mu'/dx), \quad (2)$$

где U - подвижность частиц, C – концентрация вещества. Знак минус показывает, что перенос происходит в сторону убывания μ' .

Плотность потока вещества - это величина, численно равная количеству вещества, перенесенного за единицу времени через единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению переноса:

$$j_m = m/(S \cdot t) \text{ [моль/(м}^2 \cdot \text{с)]} \quad (3),$$

Подставив в (3) выражение для электрохимического потенциала (1), получим для разбавленных растворов при $\mu_0 = \text{const}$
уравнение Нернста—Планка:

$$j_m = - URT(dC/dx) - UCzF(d\varphi/dx) \quad (4)$$

Итак, могут быть две причины переноса вещества *при пассивном транспорте*: градиент **концентрации (dC/dx)** и градиент **электрического потенциала ($d\phi/dx$)**.

Знаки минусов перед градиентами показывают, что градиент концентрации вызывает перенос вещества от мест с большей концентрацией к местам с его меньшей концентрацией; а градиент электрического потенциала вызывает перенос положительных зарядов от мест с большим к местам с меньшим потенциалом.

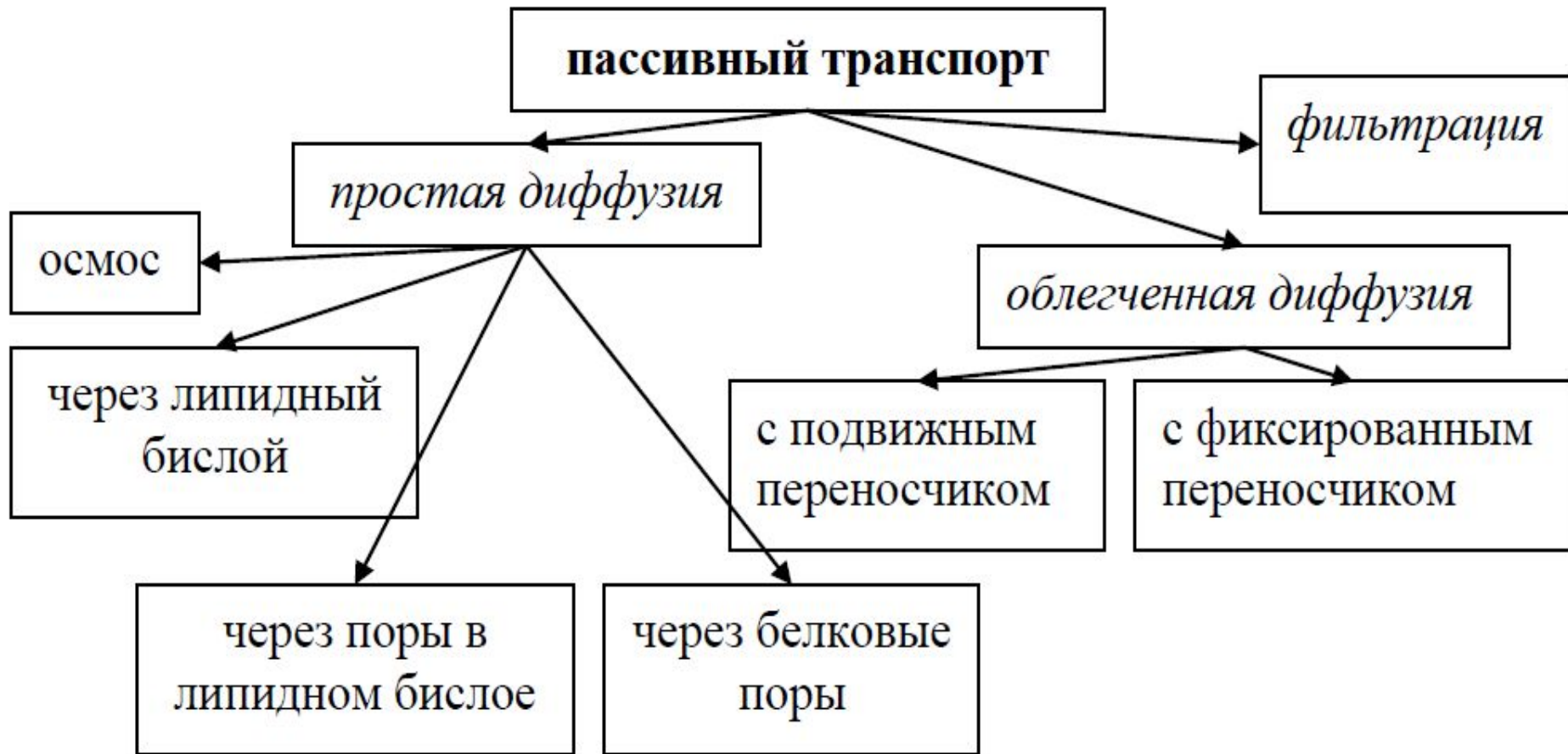
В случае незаряженных веществ ($z = 0$) или отсутствия электрического поля ($d\varphi/dx$) уравнение Теорелла переходит в уравнение:

$$j_m = - URT(dC/dx) \quad (5)$$

Согласно соотношению Эйнштейна, коэффициент диффузии $D=URT$. В результате получаем уравнение, описывающее простую диффузию - **закон Фика**:

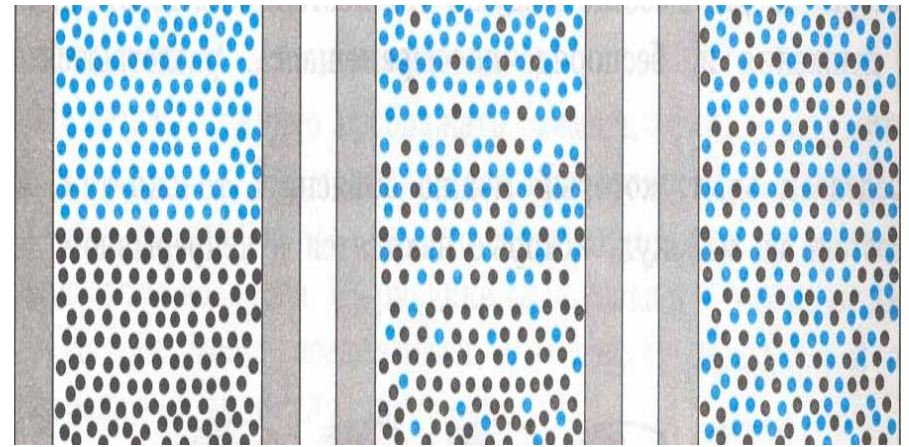
$$j_m = - D(dC/dx) \quad (6)$$

Классификация видов пассивного транспорта



Диффузия

В любом растворе происходит перемещение растворенных веществ из области высокой концентрации в область более низкой. Этот поток веществ в сторону меньшей концентрации (транспорт по градиенту концентрации) существует до тех пор, пока концентрации вещества в двух участках не выровняются. Перемещение вещества движущей силой которого является градиент концентрации, называется **диффузионным**, а процесс — **диффузией**



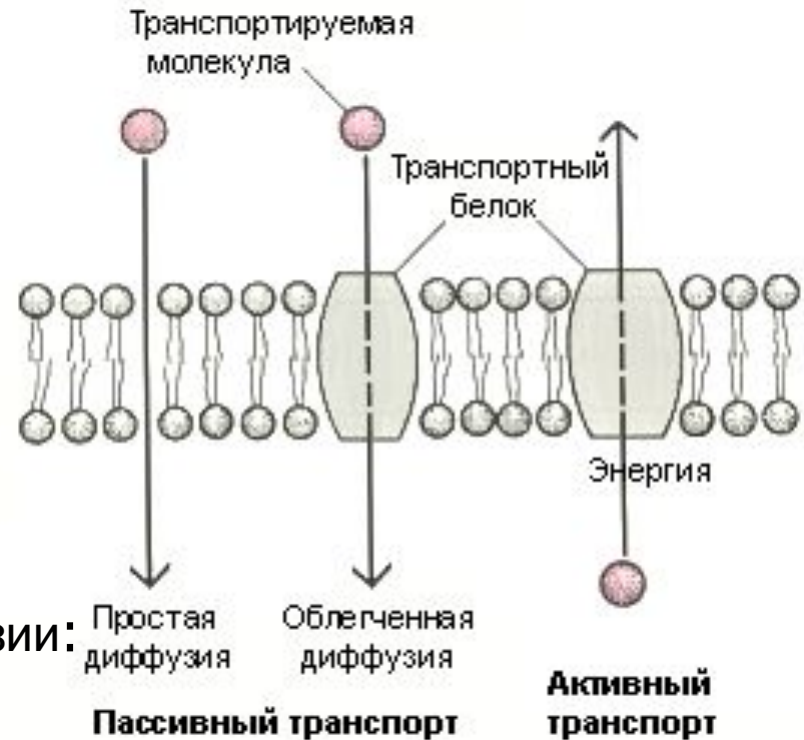
Диффузия - это распространение вещества в результате движения их ионов или молекул, которые стремятся выровнять свою концентрацию в системе.

Простая диффузия

Диффузия

—

самопроизвольное
перемещение вещества из
мест с большей
концентрацией в места с
меньшей концентрацией
вещества вследствие
хаотического теплового
движения молекул.



Уравнение Фика для простой диффузии:

$$j_m = DK/l(C_1 - C_2)$$

$$j_m = P(C_1 - C_2)$$

$$P = DK/l$$

C_1 и C_2 – концентрации диффундирующего вещества в растворах около одной и другой поверхностями мембраны, K – коэффициент распределения (соотношение концентрации вещества вне мембраны и внутри ее), l – толщина мембраны, P = коэффициент проницаемости мембраны [м/с].

Простая диффузия

Коэффициент проницаемости (P) тем больше, чем больше коэффициент диффузии (чем меньше вязкость мембраны), чем тоньше мембрана (чем меньше l) и чем лучше вещество растворяется в мембране (чем больше K).

Хорошо растворимы в фосфолипидной фазе мембраны неполярные вещества, например, *органические жирные кислоты, эфиры.*

Плохо проходят через липидный бислой полярные, водорастворимые вещества: соли, основания, сахара, аминокислоты, спирты.

Простая диффузия

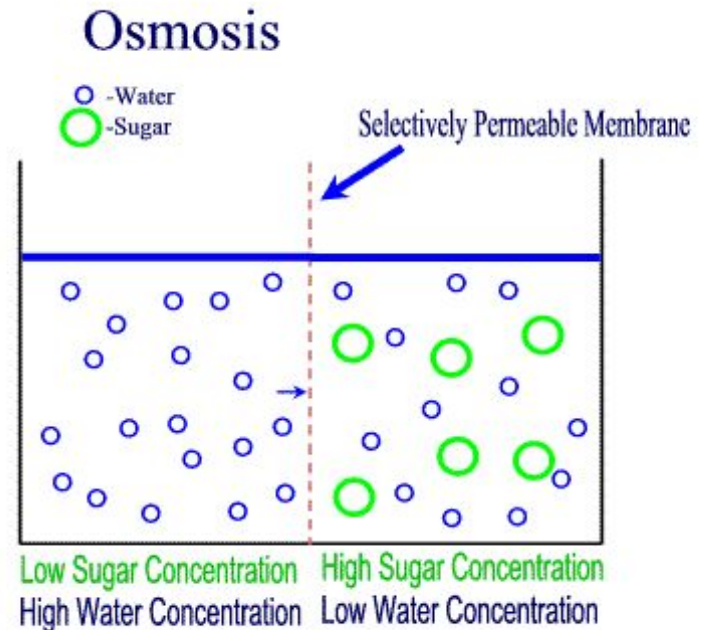
Через липидные и белковые поры сквозь мембрану проникают молекулы нерастворимых в липидах веществ и водорастворимые гидратированные ионы (окруженные молекулами воды).

Для таких веществ и ионов **мембрана** выступает как **молекулярное сито**: чем больше размер молекулы, тем меньше проницаемость мембраны для этого вещества. Избирательность переноса обеспечивается набором в мембране пор определенного радиуса, соответствующих размеру проникающей частицы (зависит от мембранного потенциала).

ОСМОС

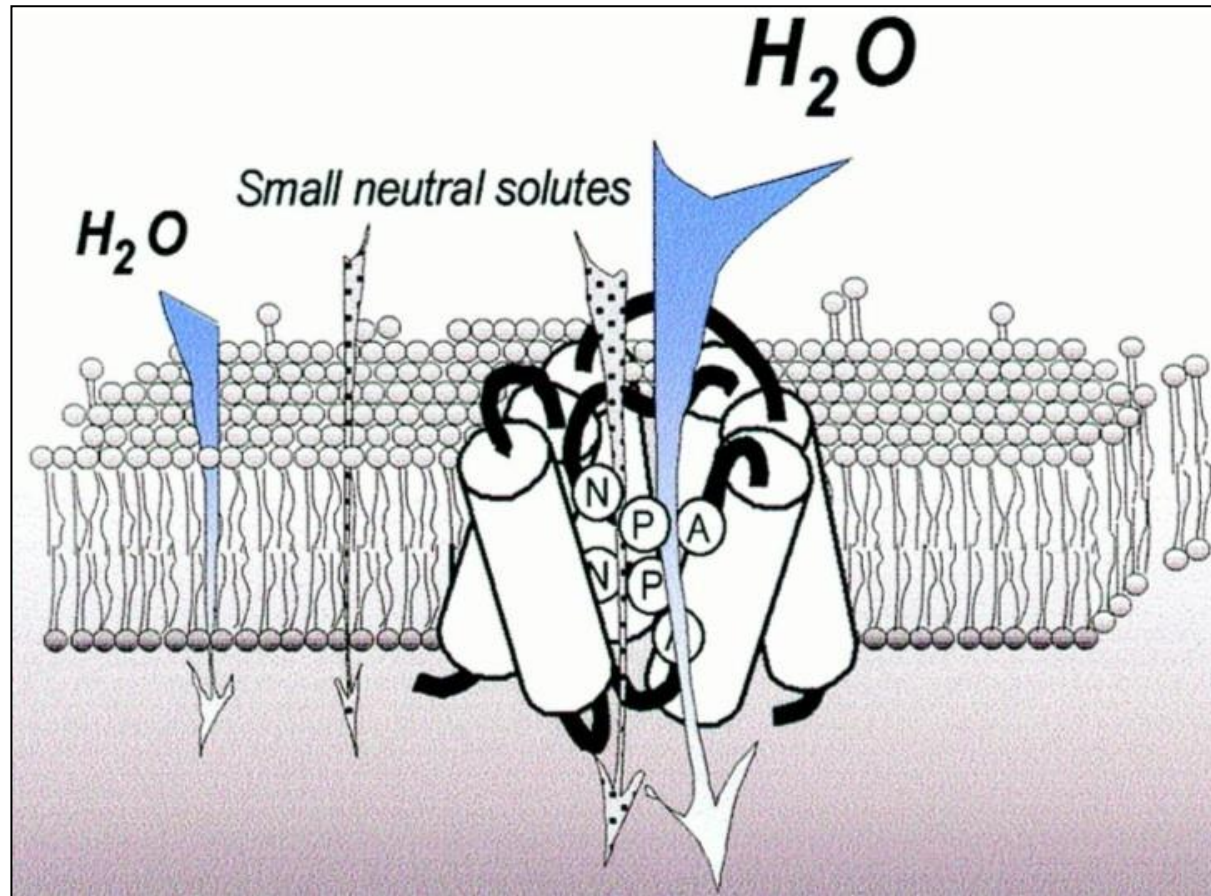
Вода поглощается клеткой преимущественно путем осмоса. **Осмоз** — это **диффузия воды** через полупроницаемую мембрану, вызванная разностью концентраций. Удобно рассматривать осмос как одну из форм диффузии, при которой перемещаются только молекулы воды.

Если мембраной разделить растворы сахара с концентрацией 5 и 10% соответственно, то через нее в обоих направлениях будут проходить только молекулы воды. В результате в более разбавленном растворе концентрация сахара повысится, а в более концентрированном, наоборот, понизится. Когда концентрация сахара в обоих растворах станет одинаковой, наступит равновесие. Растворы, достигшие равновесия, называются **изотоническими**.



Частицы растворителя (синие) способны пересекать мембрану, частицы растворённого вещества (зеленые) — нет.

Существуют и **аквапорины** – белки, обеспечивающие быстрое прохождение воды через мембрану.



Облегченная диффузия

Облегченная диффузия происходит при участии молекул переносчиков.

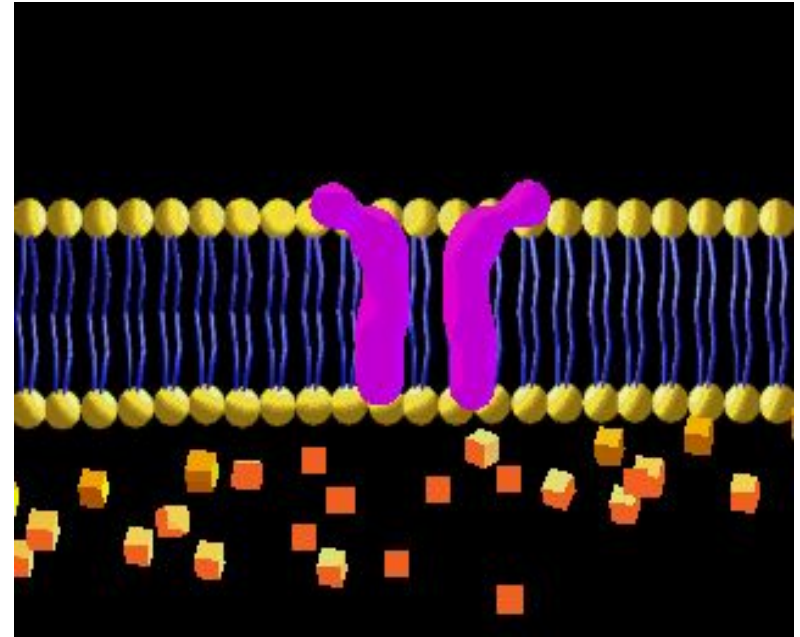
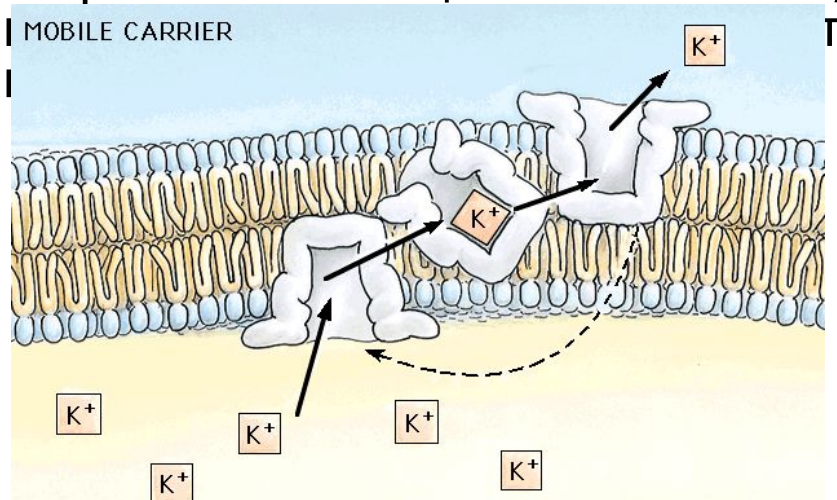
Переносимые вещества: ионы, аминокислоты, сахара, нуклеотиды и др.

Отличия облегченной диффузии от простой:

1. Перенос вещества с участием переносчика происходит значительно быстрее;
2. Облегченная диффузия обладает свойством насыщения: при увеличении концентрации с одной стороны мембраны плотность потока вещества возрастает лишь до некоторого предела, когда все молекулы переносчика уже заняты;
3. При облегченной диффузии наблюдается конкуренция переносимых веществ в тех случаях, когда переносчиком переносятся разные вещества (одни вещества переносятся лучше, чем другие; добавление одних веществ затрудняет транспорт других);
4. Есть вещества, блокирующие облегченную диффузию – они образуют прочный комплекс с молекулами переносчиками, что приводит к подавлению транспорта вещества через мембрану.

Облегчённая диффузия

- К белкам-переносчикам относятся ферменты **транслоказы** и **пермиазы**. Они связывают своим активным центром вещество с одной стороны мембраны и переносят его сквозь гидрофобный слой мембраны на ее другую поверхность.
- Еще один вариант такой диффузии: после присоединения транспортируемого вещества меняется конформация белка-переносчика и в мембране открывается специальный канал,



Модель работы ионного канала

При транспорте с помощью **неподвижных** молекул-переносчиков, фиксированных поперек мембраны, молекула переносимого вещества передается от одной молекулы переносчика к другой, как по эстафете.

Фильтрация

Фильтрация – движение раствора через поры в мембране под действием градиента давления.

Значение – объяснение процессов переноса воды через стенки кровеносных сосудов.

Скорость переноса подчиняется **закону Пуазейля**:

$$dV/dt = (P_1 - P_2)/W,$$

где dV/dt – объемная скорость переноса раствора, w - гидравлическое сопротивление ($w = 8\eta l/\pi r^4$) l - длина поры, r - ее радиус, η -

Активный транспорт

Активный транспорт – это перенос вещества из мест с меньшим значением электрохимического потенциала в места с его большим значением.

Активный транспорт в мембране сопровождается ростом энергии Гиббса, он не может идти самопроизвольно, а только за счет **затраты энергии**, запасенной в макроэргических связях АТФ (т.е. в сопряжении с процессом гидролиза АТФ).

Активный транспорт

Виды активного транспорта

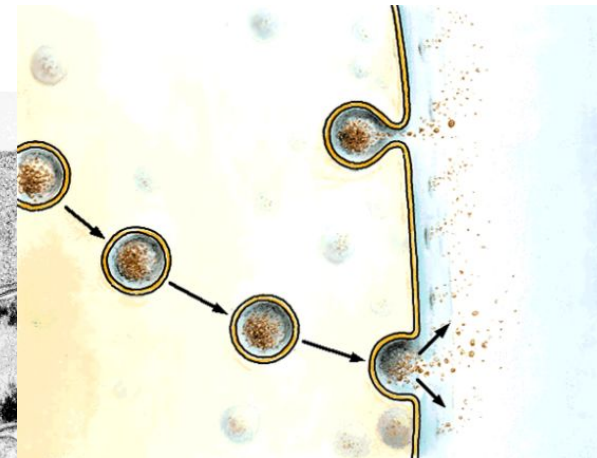
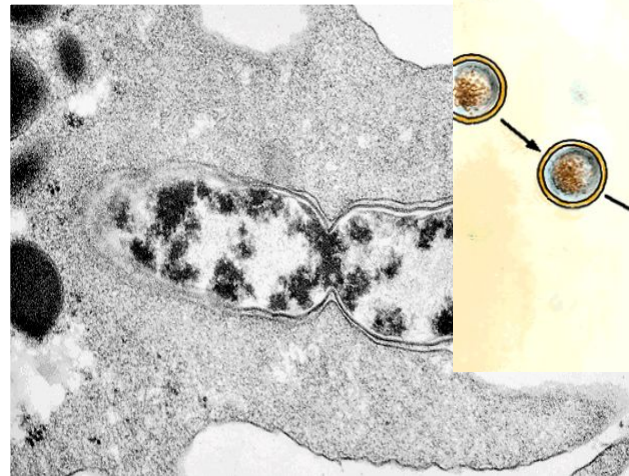
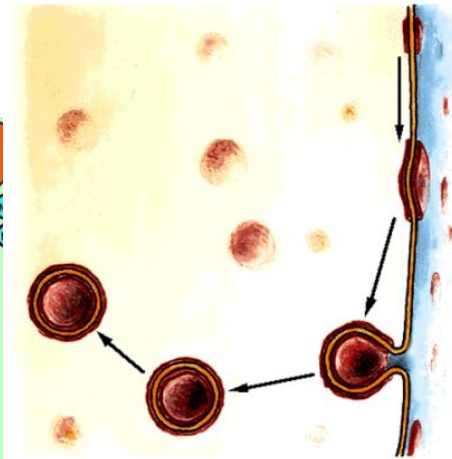
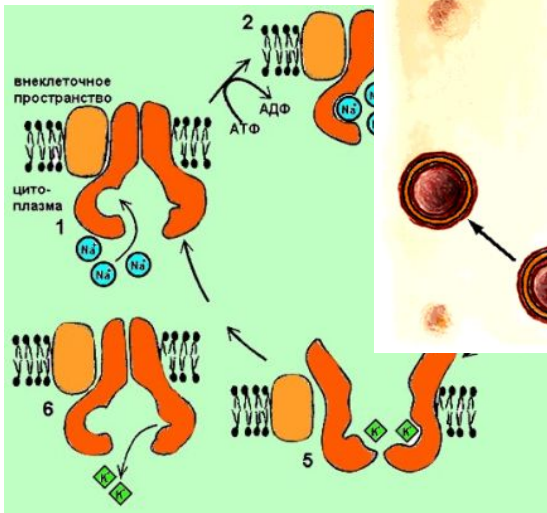
Ионные насосы

Экзоцитоз

Эндоцитоз

Фагоцитоз

Пиноцитоз



Значение активного транспорта:

За счет активного транспорта в организме **создаются градиенты концентраций, градиенты электрических потенциалов, градиенты давления и т.д., поддерживающие жизненные процессы.**

Существование активного транспорта веществ через биологические мембраны впервые было доказано в **опытах Уссинга** (1949 г.) на примере переноса ионов натрия через кожу лягушки.

Согласно современным представлениям, в биологических мембранах имеются ионные насосы, работающие за счет энергии гидролиза АТФ, — специальные системы интегральных мембранных белков (транспортные АТФазы).

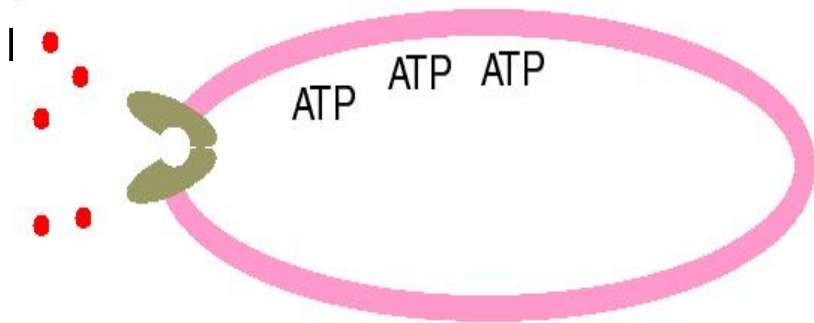
В настоящее время известны **три основных типа электрогенных ионных насосов**, осуществляющих активный перенос ионов через мембрану:

1) при работе **K^+ - Na^+ -АТФазы** за счет энергии, освобождающейся при гидролизе одной молекулы АТФ, в клетку переносится **два иона калия** и одновременно из клетки выкачиваются **три иона натрия**. Таким образом, создается повышенная по сравнению с межклеточной средой концентрация в клетке ионов калия и пониженная натрия, что имеет огромное физиологическое значение;

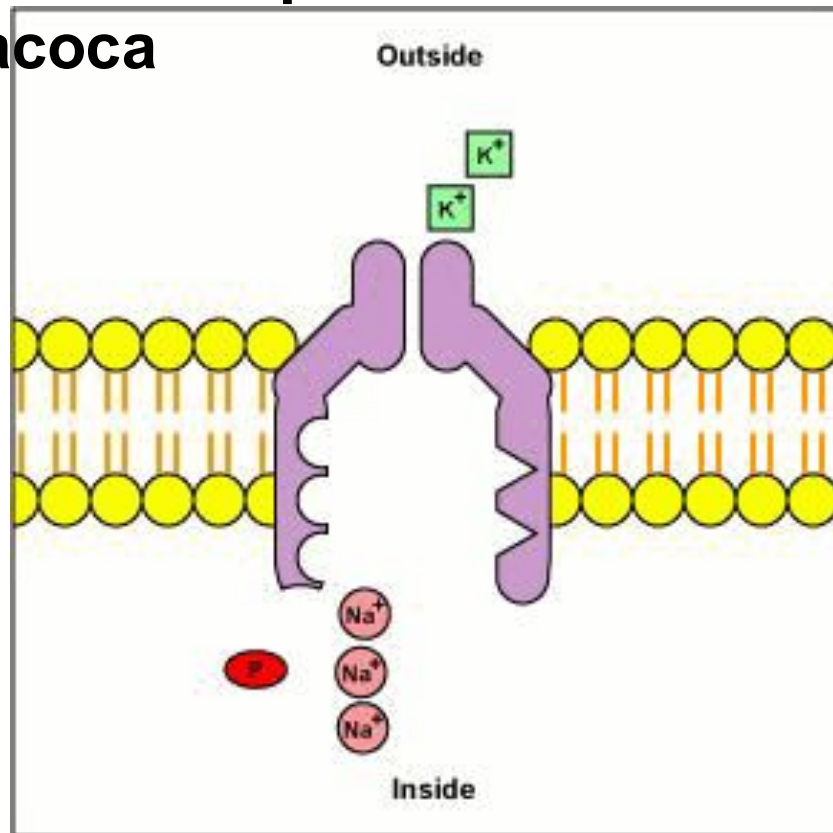
2) при работе **Ca^{2+} -АТФазы** за счет энергии гидролиза АТФ переносятся два иона кальция (из клетки);

3) в **H^+ -АТФазе** (H^+ -помпе) происходит перенос двух протонов.

Принцип работы АТФаз-насосов основан на конформационных перестройках белковой макромолекулы при взаимодействии с транспортируемым



Работа натрий - калиевого насоса

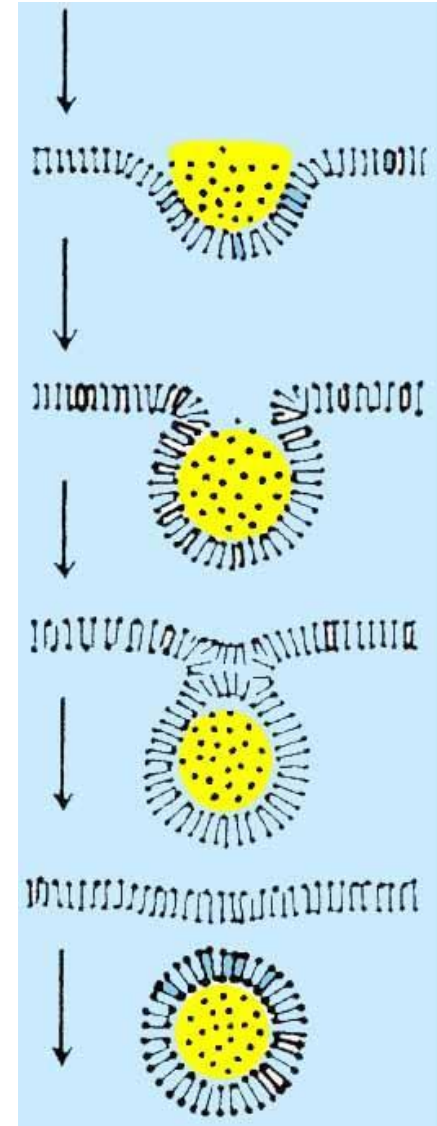


Этапы работы АТФазы:

- 1) Образование комплекса фермента с АТФ на внутренней поверхности мембраны;
- 2) связывание комплексом трех ионов натрия;
- 3) фосфорилирование фермента с образованием АДФ;
- 4) переворот фермента внутри мембраны;
- 5) реакция ионного обмена натрия на калий (на внешней поверхности мембраны);
- 6) обратный переворот ферментного комплекса с переносом ионов калия внутрь клетки;
- 7) возвращение фермента в исходное состояние с освобождением ионов

Активный транспорт

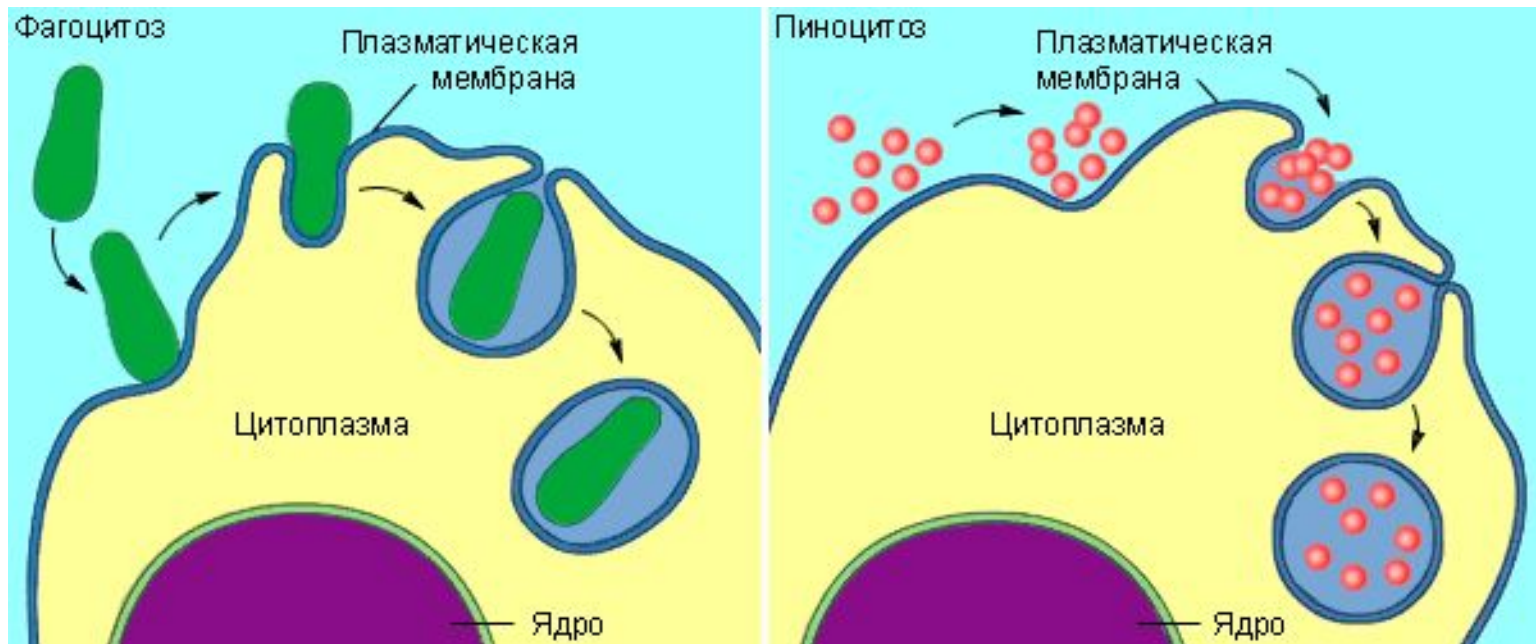
Эндоцитоз - процесс поглощения макромолекул клеткой. При эндоцитозе плазматическая мембрана образует впячивание, края ее сливаются, и происходит отшнуровывание в цитоплазму *везикул* – эндоцитарных вакуолей.



Активный транспорт

Фагоцитоз — захват и поглощение крупных частиц (например, фагоцитоз лимфоцитов, простейших и др)

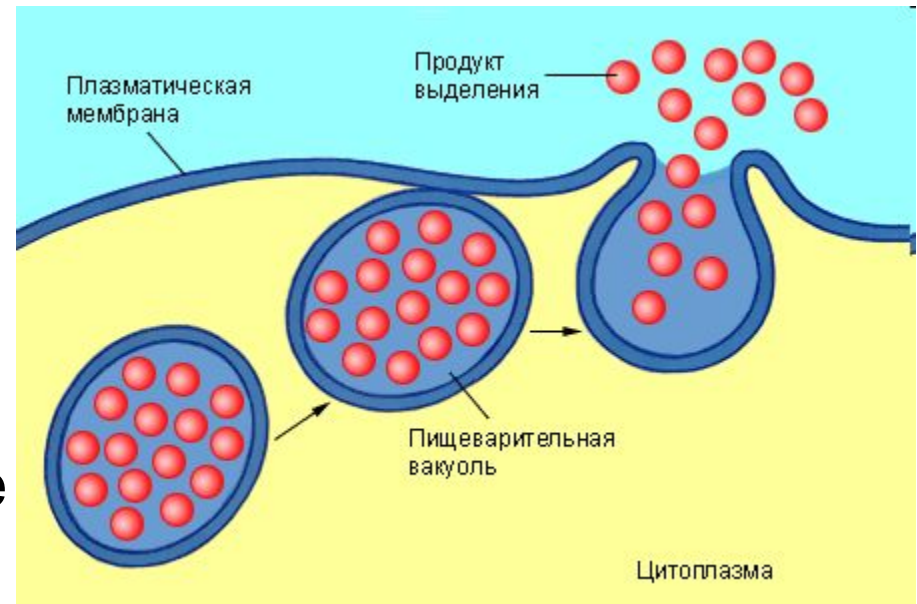
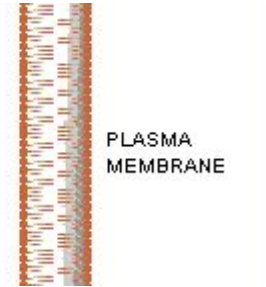
Пиноцитоз — процесс захвата и поглощения капелек жидкости с растворенными в ней веществами.



Активный транспорт

Экзоцитоз

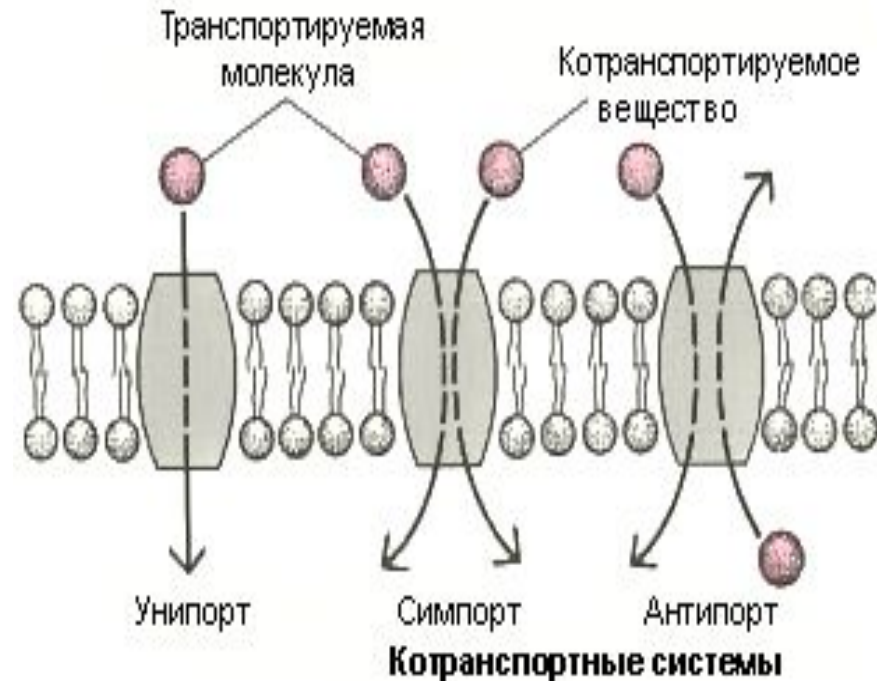
- **Экзоцитоз** - процесс, обратный эндоцитозу.
- Таким способом выводятся гормоны, полисахариды, белки, жировые капли и другие продукты клетки.
- Они заключаются в пузырьки, ограниченные мембраной, и подходят к плазмалемме.
- Обе мембраны сливаются, и содержимое пузырька выводится в среду, окружающую клетку.



Секреция посредством экзоцитоза

Котранспорт

- Некоторые транспортные белки переносят одно растворённое вещество (молекул газов, воды) через мембрану - **унипорт**.
- Другие функционируют как **котранспортные** системы, в которых перенос одного растворённого вещества зависит от одновременного или последовательного переноса второго вещества.
- Второе вещество может транспортироваться в том же направлении - **симпорт** (ионов или молекул двух различных веществ, например перенос ионов натрия и глюкозы через мембрану клеток эпителия тонкой кишки) либо в противоположном - **антипорт**.



Котранспорт возможен как при **облегченной диффузии**, так и в процессе **активного транспорта**.

Спасибо за внимание !