



А. Ходжкин и Э. Хаксли получили Нобелевскую премию по физиологии и медицине в 1963 г. «за открытия, касающиеся ионных механизмов, участвующих в возбуждении и торможении в периферическом и центральном участках мембраны нервной клетки».

Основой жизнедеятельности живых организмов во многом являются процессы, протекающие в мембранах клеток. В данной задаче Вам необходимо рассмотреть некоторые подходы к описанию процесса возбуждения нервных клеток в рамках примитивной модели.

Основная идея теории возбуждения клетки заключается в описании процессов переноса ионов через мембрану (рис. 1). Проницаемость мембраны различна для различных ионов, кроме того, в мембрану встроены большие белковые молекулы, играющие роль насосов, способных переносить ионы определённого типа с одной стороны мембраны на другую (затрачивая на это энергию). Благодаря наличию этих каналов-насосов концентрации ионов различны с разных сторон от мембраны, и как следствие появляется разность электрических потенциалов между противоположными стенками мембраны.

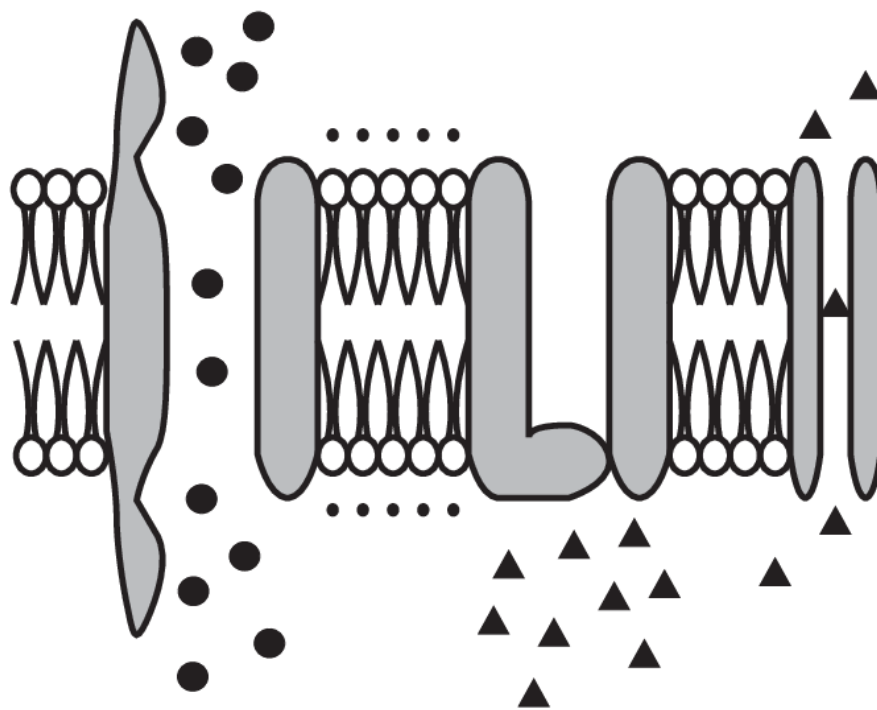


Рис. 1

Ещё более упростим модель. Будем считать, что мембрана является плоскопараллельной пластинкой толщиной a (рис. 2). Снаружи клетки находится слой жидкости (воды) толщиной h_0 , а внутриклеточное пространство моделируется слоем жидкости толщиной h_1 . Диэлектрические проницаемости всех сред будем считать равными единице. Концентрации частиц вне клетки будем обозначать C_0 , а внутри – C_1 (при необходимости будем добавлять индексы, указывающие тип частиц).

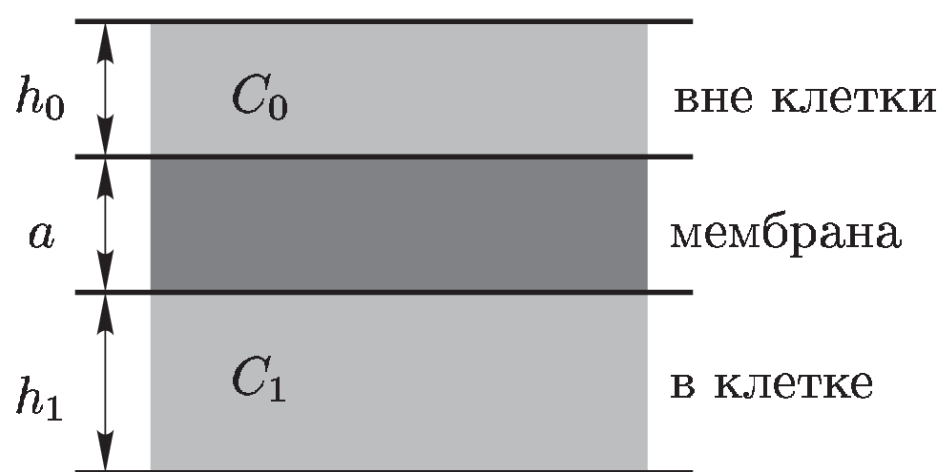


Рис. 2

Диффузия

Рассмотрим движение незаряженных молекул через мембрану без «насосов» (считаем, что электрических зарядов в природе не существует) (рис. 3). Плотность диффузионного потока частиц q (число частиц, пересекающих единицу площади мембраны в единицу времени) пропорционально разности концентраций этих частиц с противоположных сторон мембраны:

$$q = g\Delta C,$$

где g – коэффициент пропорциональности, который назовём проницаемостью мембраны для данных частиц.

Пусть в начальный момент времени концентрации рассматриваемых частиц с разных сторон мембраны различны.

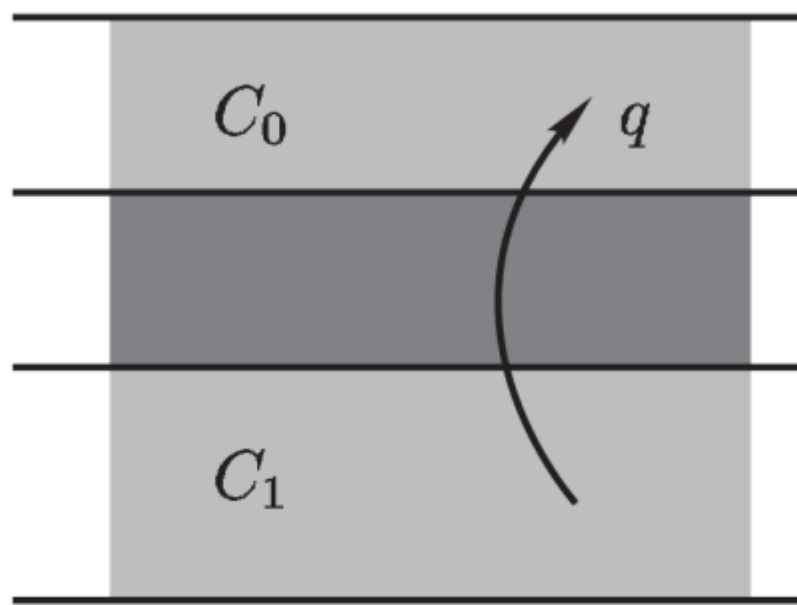


Рис. 3

A1 Оцените время, в течении которого концентрации частиц выровняются.

Вынужденный перенос и диффузия

Рассмотрим теперь мембрану, в которую встроены каналы-насосы, принудительно переносящие рассматриваемые молекулы внутри клетки. Пусть эти каналы равномерно распределены по поверхности мембраны, причём на единицу площади приходится n каналов, каждый из которых переносит в единицу времени m молекул из внеклеточного пространства внутрь клетки (рис. 4).

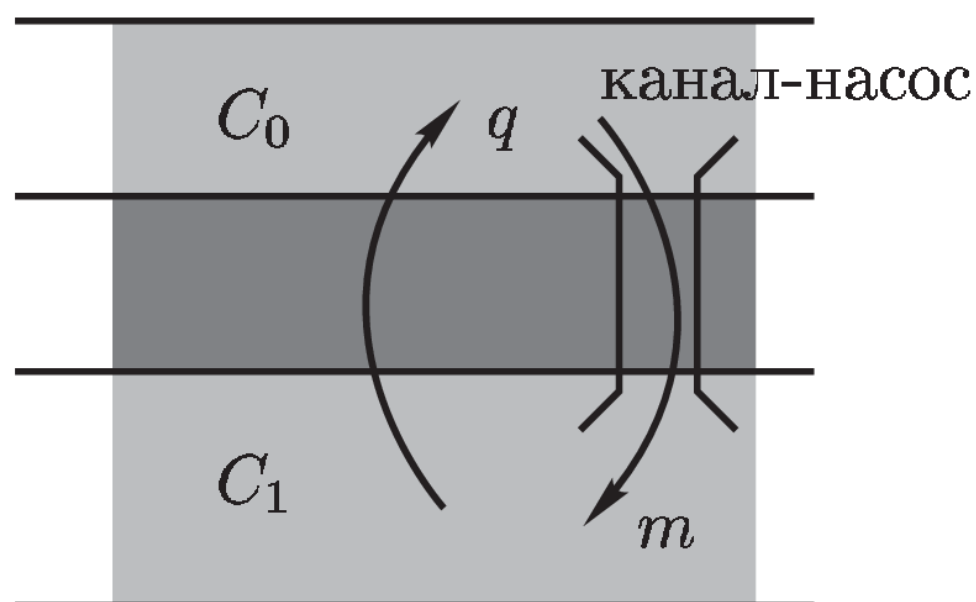


Рис. 4

A2 Определите установившуюся разность концентраций $\Delta \bar{C} = C_0 - C_1$ между разными сторонами мембраны.

Электрическое поле

Далее будем считать, что рассматриваемые частицы являются ионами калия K^+ . Пусть концентрация ионов вне клетки равна C_0 , а внутри неё C_1 .

A3 Найдите разность потенциалов между стенками мембраны $\Delta \varphi$, пренебрегая наличием ионов внутри мембраны.

Перенос ионов

При наличии электрического поля помимо потока ионов через мембрану, обусловленного разностью концентрации, появляется поток ионов, обусловленный наличием электрического поля. В этом случае суммарная плотность потока ионов через мембрану определяется формулой

$$q = g\Delta C + bC_i\Delta\varphi,$$

где $\Delta\varphi$ – разность потенциалов между стенками мембраны, C_i – концентрация ионов с той стороны мембраны, от которой начинается движение ионов через мембрану под действием электрического поля (для положительных ионов со стороны большего потенциала).

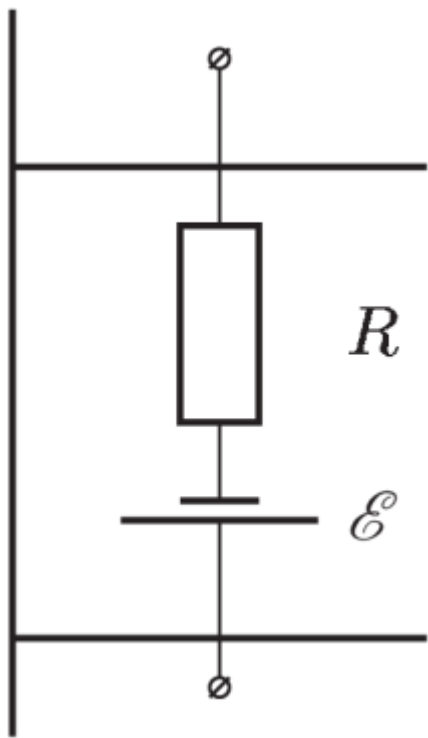


Рис. 5

A4 Найдите установившуюся разность потенциалов между стенками мембраны. Используйте все характеристики мембраны, введённые в предыдущих пунктах. При равенстве концентраций с разных сторон от мембраны эти концентрации равны C_e .

Как показали А. Ходжин и Э. Хаксли, для объяснения возникновения нервных импульсов необходимо принимать во внимание как минимум два типа ионов. Вторым основным типом ионов являются ионы Na^+ . В мембране также присутствуют натриевые канал-насосы, принудительно переносящие ионы натрия из клетки наружу. Будем считать, что для обоих типов ионов известны параметры эквивалентных схем $R_K, \mathcal{E}_K$, и $R_{\text{Na}}, \mathcal{E}_{\text{Na}}$, ($\mathcal{E}_{\text{Na}} > \mathcal{E}_K$). Пусть изначально все натриевые каналы закрыты, а затем в некоторый момент времени открываются на небольшой промежуток времени τ .

A5 Опишите, как будет изменяться разность потенциалов между стенками мембраны с течением времени. Постройте примерный график этой зависимости.

Если вы решили правильно, то полученный график и будет моделировать временной ход нервного импульса!