

щается обратно в кровь и только 1,5 л выводится в виде мочи.

Рассмотрим подробнее, как происходит концентрация раствора в петле Генле. Саму петлю Генле можно смоделировать, представив ее в виде трубки, разделенной полупроницаемой мембраной (M) на два колена (левое L и правое $П$) одинаковых размеров (рис.3). Колена петли соединяются между собой узкой капиллярной трубкой (K), через которую жидкость из левого колена под действием давления перетекает в правое.

Пусть сначала капилляр, соединяющий колена петли, закрыт, и оба колена заполнены одинаковой по составу жидкостью (см. рис.3,а). Естественно, что

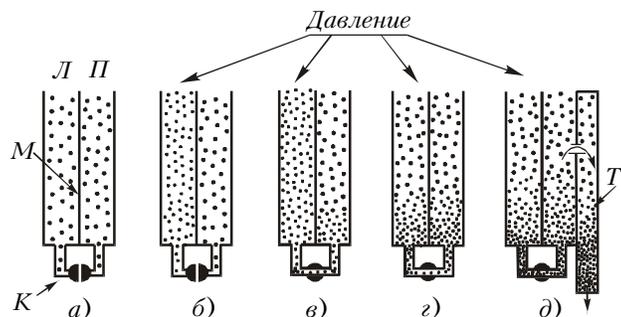


Рис. 3. Иллюстрация противоточного механизма концентрации мочи в петле Генле

движения жидкости по петле в этом случае не будет, однако, если к колену L приложить гидростатическое давление, то вода (для которой мембрана проницаема) начнет переходить из левого колена в правое. В результате концентрация веществ в левом колене будет расти, а в правом уменьшаться.

Однако как только концентрация веществ в левом колене петли начнет увеличиваться, возникнет обратный поток воды (справа налево), вызванный тем, что ее концентрация в правом колене выше, чем в левом. Такое проникновение растворителя (в данном случае воды) через полупроницаемую мембрану, разделяющую два раствора с разными концентрациями, называют осмосом. При этом молекулы растворителя проходят через мембрану, непроницаемую для растворенных веществ, в более концентрированный раствор, и этот процесс идет до выравнивания концентраций. Для того чтобы предотвратить выравнивание концентраций, происходящее вследствие осмоса, можно приложить к левому колену дополнительное давление, которое будет препятствовать движению воды. Это давление $\Delta\pi$ называют осмотическим давлением, и, как нетрудно показать, его можно вычислить по формуле

$$\Delta\pi = RT(C_L - C_P), \quad (3)$$

где R – универсальная газовая постоянная, T – температура (в кельвинах), а C_L и C_P – концентрации растворенных веществ в левом и правом коленах петли соответственно. Следует отметить, что если растворенное вещество диссоциирует в растворе на несколько ионов, то его осмотическая концентрация равняется

сумме концентраций ионов в растворе. Так, например, для того чтобы вычислить осмотическое давление одномолярного раствора NaCl , в формулу (3) необходимо подставить значение концентрации с учетом того, что NaCl в воде диссоциирует на ионы Na и Cl . Чтобы не возникало путаницы, для измерения осмотической концентрации выбрали специальную единицу – осмоль/л. Таким образом, осмотическая концентрация одномолярного раствора NaCl равна 2 осмоль/л.

Очевидно, что, когда поток воды слева направо, вызванный градиентом гидростатического давления, станет равным осмотическому потоку справа налево, наступит равновесие (см. рис.3,б). Это произойдет, когда градиент осмотического давления станет равным гидростатическому давлению, приложенному к левому колену петли. Соответствующую разность концентраций можно найти, используя уравнение (3).

Откроем теперь капилляр (K), соединяющий колена петли. Так как капилляр очень узок, можно считать, что градиент гидростатического давления между коленами остался тем же. В то же время в правом колене сразу после открытия капилляра (сначала в нижней части $П$, а потом и в верхней) появится концентрированная жидкость (см. рис.3,в). А это значит, что равновесие между L и $П$ нарушилось (градиент осмотического давления уменьшился), и слева направо опять начнет поступать вода. В результате концентрация веществ в жидкости левого колена вблизи капилляра вырастет. Таким образом, противоточная система обменивающихся через полупроницаемую мембрану жидкостей приводит к повышению концентрации раствора вблизи точки поворота (см. рис.3,г).

Заметим, что концентрация раствора, покидающего петлю, такая же, как и концентрация поступающего. Следовательно, концентрирующая способность противоточной петли в данном случае не используется. Для того чтобы удалять концентрированный раствор из петли Генле, Природа предусмотрела третье колено (T), отделенное от $П$ полупроницаемой мембраной и соединенное с ним небольшим отверстием (см. рис.3,д). Так как отверстие очень мало, то только малая часть жидкости (около 1 %) оттекает из $П$ в колено T , и поэтому движение жидкости по петле и концентрационный градиент не нарушаются. В то же время жидкость, движущаяся медленно (диаметр колена тот же, а расход жидкости около 1%) сверху вниз по колену T , приходит в осмотическое равновесие через полупроницаемую мембрану и покидает эту трехколенную петлю Генле с очень высокой концентрацией веществ, равной концентрации в месте соединения $П$ и L .

Попробуем количественно оценить концентрирующую способность петли Генле. Разобьем каждое колено петли по вертикали на N сегментов: 1-й наверху, а N -й в самом низу (рис.4). Пусть концентрация в левом колене петли в k -м сегменте в момент времени t равна $L_k(t)$, а в аналогичном сегменте справа – $R_k(t)$. Для того чтобы облегчить расчеты, примем, что движение раствора по петле имеет прерывистый характер. При этом раствор «мгновенно» передвигается на длину сегмента s , после чего покоится в течение интервала