



Рис. 4. Элементы модели колена петли Генле

времени s/v , где v – средняя линейная скорость движения жидкости по петле. Будем считать, что перетекание воды между соседними сегментами колен через полупроницаемую мембрану (полностью проницаемую лишь для воды) имеет место только после завершения очередного «шажка» и происходит в течение времени s/v .

Процесс переноса растворителя (в данном случае воды) через мембрану под действием градиента гидростатического давления называется ультрафильтрацией. Объемную скорость ультрафильтрации $\Delta V/\Delta t$ можно найти из уравнения

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = k_{\text{ф}} A (p + \Delta\pi),$$

где $k_{\text{ф}}$ – коэффициент фильтрации, A – площадь мембраны, p – величина градиента гидростатического давления, а $\Delta\pi$ – осмотическое давление между этими растворами, связанное с концентрациями веществ в них по формуле (3). Пусть все сегменты петли равны и каждый имеет форму параллелепипеда с площадью боковой грани A . Тогда, подставляя $\Delta t = s/v$ и принимая $V = sA$, получаем

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{k_{\text{ф}} (p + RT(R_k - L_k))}{v}. \quad (4)$$

Выражение (4) дает нам возможность вычислить относительное изменение количества воды после одиночного акта ультрафильтрации длительностью s/v . Очевидно, зная это, мы сможем уже вычислить изменение концентраций в обоих граничащих сегментах после ультрафильтрации:

$$\begin{aligned} L_k(\text{после}) &= L_k(\text{до}) \left(1 + \frac{\Delta V}{V} \right), \\ R_k(\text{после}) &= R_k(\text{до}) \left(1 - \frac{\Delta V}{V} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Ну что ж, ультрафильтрацию мы, кажется, описали полностью, но ведь жидкость еще движется. Запишем кинематические соотношения. Пусть единицей времени (t) у нас будет s/v . В нашей модели раствор, только что поступивший в левый k -й сегмент, имеет ту же осмотическую концентрацию, что и в $(k-1)$ -м сегменте в предыдущий момент времени; для сегментов правого колена имеют место аналогичные зависимости. Поэтому кинематические соотношения будут иметь такой вид:

$$\begin{aligned} L_k(t+1) &= L_{k-1}(t), \\ R_k(t+1) &= R_{k+1}(t). \end{aligned} \quad (6)$$

В первый сегмент левой части петли все время поступает первичная моча с постоянной осмотической концентрацией a , поэтому при расчетах по формулам (5) и (6) следует полагать $L_1 = L_1(\text{до}) = a$. Кроме того, для расчетов по формуле (6), очевидно, следует положить $L_0 = a$. В самый нижний сегмент правого колена петли жидкость поступает сразу из нижнего сегмента левого колена, минуя капилляр, объемом которого можно пренебречь. Поэтому в формуле (6) R_{N+1} следует полагать равным L_N .

Система уравнений (4)–(6) описывает изменение осмотических концентраций при переходе от момента t к моменту $t+1$. Для решения этих уравнений необходимо задаться начальными условиями, т.е. значениями переменных при $t=0$. Положим, что в момент $t=0$ петля заполнена первичной мочой с осмотической концентрацией a , но движения раствора нет (гидростатическое давление к левому колену не приложено). Тогда, очевидно, следует положить

$$L_k(0) = R_k(0) = a. \quad (7)$$

Система уравнений (4)–(6) с начальными условиями (7) решается довольно просто, используя персональный компьютер и любой из алгоритмических языков программирования. И если положить $N = 50$, $a = 0,3$ осмоль/л, $p/(RT) = 0,1$ осмоль/л, $k_{\text{ф}} = 2 \cdot 10^{-10}$ Па $^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, $v = 0,00004$ м/с, $RT = 2,24$ МПа/(осмоль/л), то окажется, что с течением времени t (в выбранных единицах) L_N постепенно достигает следующих стационарных значений (в осмоль/л):

t	10	20	50	100	200	500	1000	2000	5000
L_N	0,38	0,43	0,53	0,65	0,83	1,16	1,38	1,44	1,45

Конечно, точно определить коэффициенты, входящие в эту систему уравнений, невозможно. Поэтому результаты расчетов следует воспринимать только как иллюстрацию физического процесса, протекающего в противоточной петле, обращая внимание лишь на основные закономерности.

На рисунке 5 показано, каких значений достигает концентрация раствора (C) в различных сегментах (k) петли Генле при таком моделировании. Из данных, полученных при моделировании, следует, что противоточный концентрирующий механизм может увеличивать концентрацию раствора в месте поворота петли в 5 раз. Следует отметить, что только одна ультрафильтрация (без противотока) способна увеличить концентрацию раствора лишь на 0,05 осмоль/л (т.е. на 17%). Наша модель дает возможность оценить также зависимость концентрирующей способности петли от ее длины (см. кривые на рисунке 5 для $N = 5, 10, 20$ и 50). Как и следовало ожидать, чем длиннее петля, тем больше ее концентрирующая способность.

Очевидно, что для млекопитающих, живущих рядом с пресноводными водоемами, а иногда и в них самих, вода не проблема. Экономить воду им нет