

УДК 581.1

Ю.М. ВЕРНИГОРОВ, И.А. КИПНИС

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ВЕТВЯЩИХСЯ КАПИЛЛЯРНЫХ СИСТЕМАХ

Рассмотрен механизм формирования внешнего вида растений в предположении, что основным процессом, обеспечивающим рост и развитие растений, является передача влаги по их капиллярным каналам.

Ключевые слова: капилляр, ксилема, модель, транспирация, растение.

Введение. Физиологические процессы, обеспечивающие рост и развитие растений, достаточно хорошо изучены [1]. Вода, которой в живом растении большое количество, является средой для сложнейших биохимических процессов.

Движение воды в системе «почва – растение – атмосфера» происходит следующим образом. Находящаяся в почве свободная вода под действием осмотического давления через корневые волоски поступает в паренхиму корня. Далее основная часть (90%) этой воды по капиллярам (сосудам стебля и веток) восходящим током поднимается к листьям. Основная часть восходящей воды идет по сосудам ксилемы. Из проводящих тканей стебля вода поступает в проводящие пучки листа, также представляющие собой капиллярную сеть, далее через клеточные стенки испаряется в межклетники и затем через устьица в атмосферу.

Процесс испарения воды с поверхности листа называется транспирацией, а вызванное ею восходящее движение воды по капиллярной сети растения – транспирационным током. Причиной возникновения транспирационного тока считается наличие градиента водного потенциала между корнями и листьями растения, создаваемого нижним и верхним концевыми двигателями [1]. Нижний концевой двигатель – корневое давление, под действием которого вода поступает из корня в капилляры ксилемы. Подтверждением наличия корневого давления служит возникновение пасоки (выделение сока при перерезке стебля растения на небольшом расстоянии от почвы), а также гуттация, наблюдаемая на неповрежденном растении. Верхний концевой двигатель – транспирация, приводящая к обезвоживанию клеток листа и побуждающая продвижение воды от более насыщенных ею клеток и сосудов к поверхности листа. Считается, что при отсутствии листьев, в сухой сезон и при высокой влажности атмосферного воздуха, когда транспирация минимальна, работает только нижний концевой двигатель.

Опытные факты говорят о следующем: на срезанном весной и помещенном в воду, не имеющем цветков и листьев, побеге (транспирация минимальна) через некоторое время распускаются почки и появляются листья и цветы. Срезанные и помещенные в воду цветы и другие растения достаточно долго сохраняют форму и внешний вид, а некоторые растения существуют вплоть до развития новой корневой системы. Корневое давление во всех перечисленных случаях отсутствует. Это значит, что в растение продолжает поступать вода по существующей капиллярной сети.

Процесс движения воды в капиллярных сетях растений во взаимосвязи с их внешним видом мало исследован. И, если капиллярные явления в почвах изучены достаточно полно [2], то о свойствах и строении капиллярных сетей растения кратко упомянуто в работе Г.И. Пахомова и соавторов [3], где, в частности, указывается на наличие водных менисков в мезофилле, с поверхности которых и происходит испарение воды в межклетники. Испаряющие мениски могут находиться на некотором расстоянии от поверхности клеток. В опытах с применением введенного в растение коллоидного золота было показано, что попадая в растение, оно сначала поступало в транспирационный ток, а затем обнаруживалось на границе клеточных стенок мезофилла, в которой находится система проводящих пучков, обеспечивающих поступление воды в листовую пластинку [1].

Наличие менисков в мезофилле говорит о том, что проводящие пучки являются частью капиллярной сети растения и вместе с ней обеспечивают транспирационный поток от корневой системы растения до межклетников, через которые эта сеть соединяется с атмосферой.

При рассмотрении движения жидкости в капилляре используется традиционно модель вертикального, погруженного в жидкость, стеклянного капилляра. Использование такой модели движения воды в растении ограничено тем, что с ее помощью невозможно описать движение воды в сложных ветвящихся капиллярах.

Построение модели и расчет движения воды в ветвящихся капиллярных системах было целью наших исследований, а также доказательством того, что распределение воды в капиллярах формирует внешний вид растений.

Теоретическая модель. Известно, что продвижение жидкости h в вертикальном цилиндрическом капилляре радиусом r , погруженном в сосуд с жидкостью плотностью ρ , обеспечивается взаимодействием двух сил: силой, обусловленной весом столба жидкости, направленной вертикально вниз, и силой, связанной с поверхностным натяжением жидкости в мениске. Из равенства этих сил $\pi r^2 h \rho g = 2 \pi r \sigma \cos \alpha$ можно определить величину перемещения жидкости:

$$h = \frac{2 \sigma \cos \alpha}{r \rho g}. \quad (1)$$

Выражение (1) – известное уравнение Д. Жюрена [2], где α – угол смачивания, зависящий от молекулярного взаимодействия на границе раздела трех сред: стенки капилляра, жидкости и воздуха; σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости; g – ускорение свободного падения.

Если силы притяжения молекул жидкости к стенкам капилляра больше сил притяжения молекул воды друг к другу, то поверхность стенок капилляра смачивается жидкостью, и она поднимается по капилляру. Высота продвижения жидкости в капилляре зависит от угла смачивания. Если $\alpha < 90^\circ$, то $h > 0$ (рис.1); если $\alpha = 90^\circ$, то $h = 0$; если $\alpha > 90^\circ$, то $h < 0$, и жидкость в капилляре опускается ниже ее уровня в сосуде (см. рис.1).

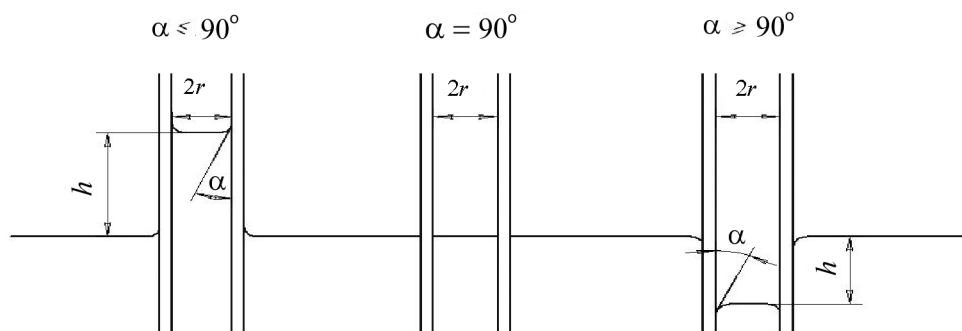


Рис.1. Распределение жидкости в вертикальном капилляре

Полагая, что в сосуд с водой опущен стеклянный капилляр, а угол смачивания $\alpha = 0$ ($\cos \alpha = 1$), $\rho = 0,998 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ при 20°C , $g = 9,80 \text{ м/с}^2$, $\sigma = 0,0728 \text{ Н/м}$, из уравнения (1) получаем формулу для определения высоты подъема воды в капилляре, м [2]:

$$h = \frac{0,15}{r} 10^{-4}. \quad (1,a)$$

Эта зависимость в логарифмических координатах представлена на рис.2, откуда следует, что в капиллярах, радиус которых более 0,5 см (для таких размеров радиусов правильнее было бы говорить о трубках, а не о капиллярах), подъем воды незначителен и находится в пределах 0,2-0,3 см. Но при уменьшении радиуса капилляра подъем воды в нем теоретически может достигать величин более 1000 м.

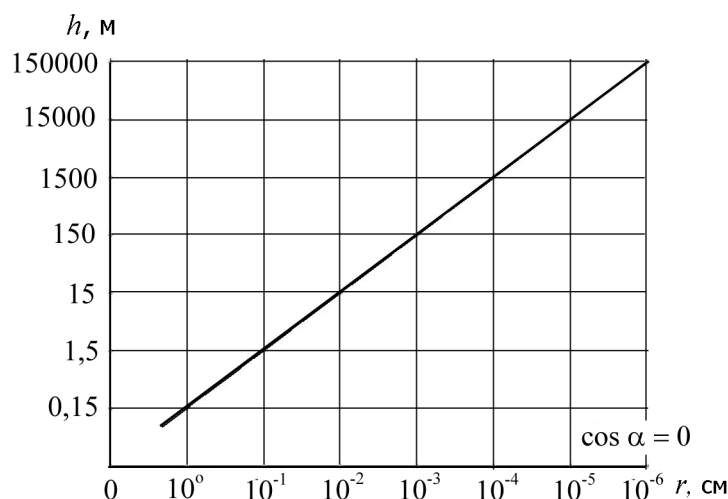


Рис.2. Зависимость высоты подъема воды в капилляре от его радиуса

При радиусах менее 10^{-6} см формула Жюрена становится неприменимой [3]. Это обусловлено тем, что все пространство в таких капиллярах занято пленочной и адсорбированной водой, а непрерывность водяных нитей в них создается силами когезии. При этом прочность этих нитей на разрыв может составлять 300 атм.

Характер зависимости высоты подъема воды от угла смачивания для разных радиусов капилляра приведен на рис.3, иллюстрирующем уменьшение высоты подъема воды при росте угла смачивания. Наиболее резко это происходит в области углов смачивания от 70 до 90°.

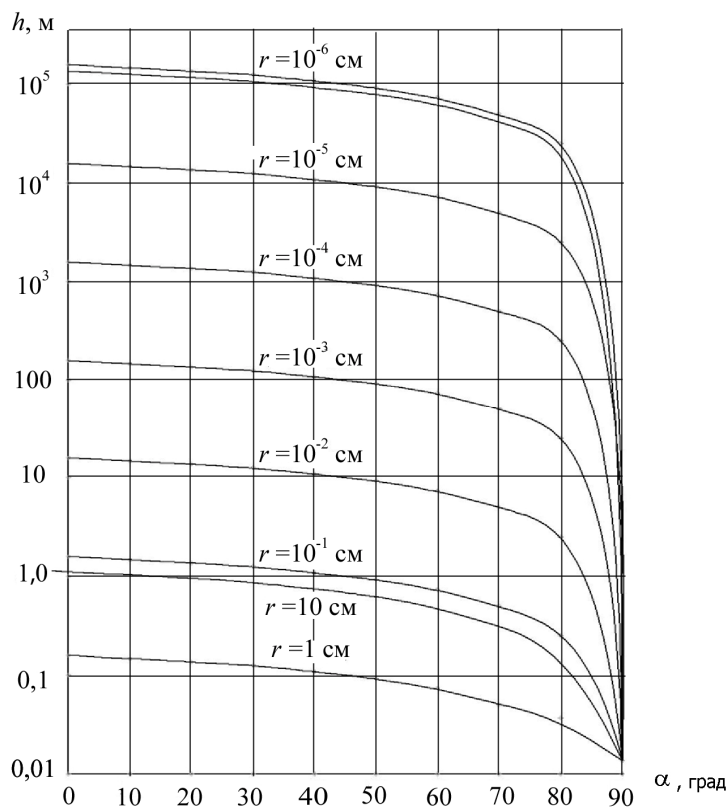


Рис.3. Зависимость высоты подъема воды от угла смачивания для разных радиусов капилляров

Рассмотрим случай, когда капилляр наклонен к поверхности воды под углом β (рис.4). Продвижение воды в наклонном капилляре L можно описать уравнением:

$$\pi r^2 L \rho g \sin \beta = 2 \pi r \sigma \cos \alpha. \quad (2)$$

Откуда

$$L = \frac{2 \sigma \cos \alpha}{r \rho g \sin \beta}; \quad (3)$$

$$h = L \sin \beta = \frac{2 \sigma \cos \alpha}{r \rho g}, \quad (4)$$

т.е. в наклонном капилляре высота подъема воды всегда равна высоте подъема воды в вертикальном капилляре, тогда как при $\beta \rightarrow 0$, $\sin \beta \rightarrow 0$, а $L \rightarrow \infty$.

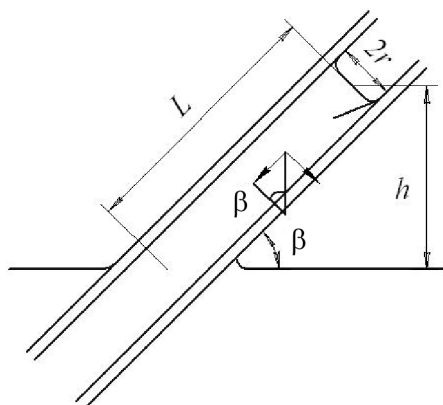


Рис.4. Прямой наклонный капилляр в воде

В общем случае высота подъема воды в наклонном капилляре над поверхностью воды в сосуде согласно выражению (4) не зависит от угла наклона капилляра к поверхности воды, а продвижение воды в капилляре, как следует из уравнения (3), зависит от его угла наклона и находится в пределах от h до ∞ .

Пусть капилляр изогнут так, как показано на рис.5, т.е. часть его высотой h_1 находится в вертикальном положении, а далее он наклонен под углом β к поверхности воды в сосуде.

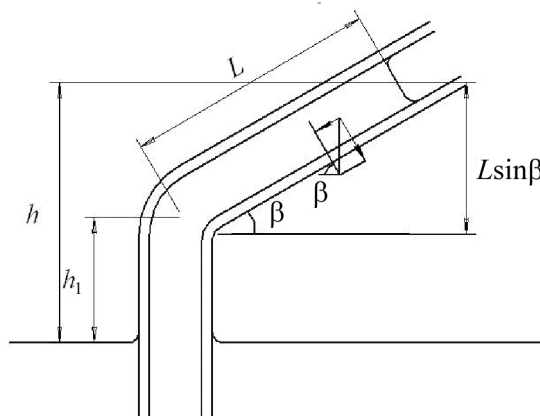


Рис.5. Изогнутый капилляр в воде

Обозначим величину продвижения воды в наклонной части капилляра как $L_{\text{ин}}^{(1)}$, а высоту подъема воды в наклонной части капилляра – $h_{\text{ин}}^{(1)}$. В этом случае продвижение воды в капилляре описывает уравнение

$$\pi r^2 h_1 \rho g + \pi r^2 L_{\text{ин}}^{(1)} \rho g \sin \beta = 2 \pi r \sigma \cos \alpha. \quad (5)$$

Сокращая обе части уравнения на $\pi r^2 \rho g$ и, выражая $L_{\text{ин}}^{(1)}$, получаем

$$L_{\text{ин}}^{(1)} = \frac{h - h_1}{\sin \beta}. \quad (6)$$

Высота подъема воды в наклонной части капилляра равна

$$h_{\text{ин}}^{(1)} = L_{\text{ин}}^{(1)} \sin \beta, \quad (7)$$

т.е.

$$h_1 + h_{\text{ин}}^{(1)} = h. \quad (8)$$

Из уравнения (6) следует, что при $h_1 = h$ $L_{\text{ин}}^{(1)} = 0$, т.е. вода по изогнутой части капилляра продвигаться не будет. А при $h_1 = 0$ уравнение (6) и (4) совпадают, и мы имеем дело с прямым капилляром, погруженным в воду под углом β .

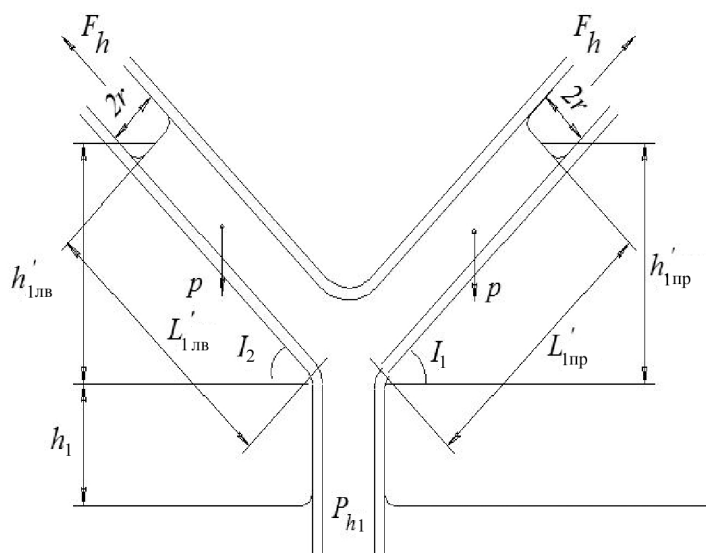


Рис.6. Разветвленная система симметричных капилляров

Имеется капиллярная система (рис.6). Примем радиусы в обеих наклонных ветвях капиллярной системы и в ее вертикальной части равными r , а угол $\beta_1 = \beta_2 = \beta$. В этом случае на вертикальную часть высотой h_1 одновременно в равной степени будут действовать силы поверхностного натяжения обеих капиллярных ветвей. Тогда сила, необходимая для подъема воды на высоту h_1 , распределится поровну в обеих ветвях, и каждая наклонная ветвь будет поднимать половину объема воды в вертикальной части. Как и для правой ветви, введем обозначения для величин продвижения воды в капилляре и ее подъема для левой ветви соответственно $L_{\text{лв}}^{(1)}$ и $h_{\text{лв}}^{(1)}$.

Уравнение равновесия воды в рассматриваемой системе можно записать для левой и правой ветвей, соответственно, в виде:

$$\frac{1}{2} \pi r^2 h_1 \rho g + \pi r^2 L_{\text{ин}}^{(1)} \rho g \sin \beta = 2 \pi r \sigma \cos \alpha; \quad (9)$$

$$\frac{1}{2} \pi r^2 h_1 \rho g + \pi r^2 L_{\text{лв}}^{(1)} \rho g \sin \beta = 2 \pi r \sigma \cos \alpha. \quad (10)$$

После простых преобразований получаем:

$$L_{1np}^{(1)} = \frac{h - \frac{1}{2}h_1}{\sin \beta}, \quad L_{1лв}^{(1)} = \frac{h - \frac{1}{2}h_1}{\sin \beta}, \quad (11)$$

$$h_{1лв}^{(1)} = h_{1np}^{(1)} = h - \frac{1}{2}h_1. \quad (12)$$

Из выражения (12) следует:

$$\text{при } \beta \rightarrow 0, \sin \beta \rightarrow 0, \quad L_{1np}^{(1)} L_{1лв}^{(1)} \rightarrow \infty,$$

$$\text{при } \beta = 90^\circ, \sin \beta = 1, \quad L_{1np}^{(1)} = L_{1лв}^{(1)} = h - \frac{1}{2}h_1,$$

а общая высота подъема воды в капиллярах над поверхностью воды в сосуде равна

$$h = h_1 + h - \frac{1}{2}h_1 = h + \frac{1}{2}h_1, \quad (13)$$

т.е. при наличии разветвляющейся системы капилляров общая высота подъема воды увеличивается по сравнению с вертикальным одиночным капилляром.

Усложним предыдущую капиллярную систему, добавив к ней центральный вертикальный капилляр (рис.7).

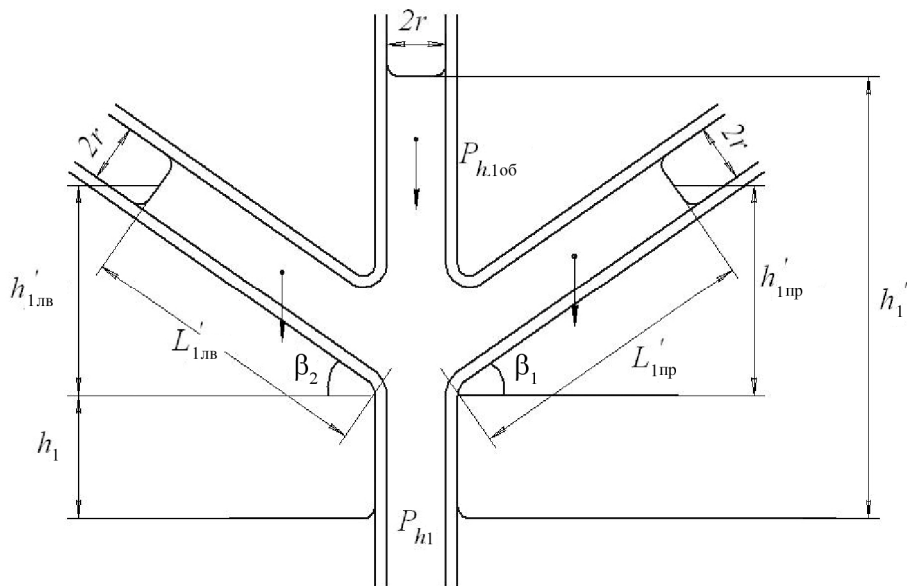


Рис.7. Разветвленная система с верхним вертикальным капилляром

Положим радиусы всех капилляров равными r , примем равными углы наклона капиллярных трубок $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ и обозначим общую высоту подъема воды в вертикальном капилляре как $h_{1об}^{(1)}$. В этом случае объем воды в нижней части высотой h_1 будет находиться под действием трех одинаковых сил, и уравнения продвижения воды в ветвях капилляров для правой, левой и вертикальной частей могут быть записаны следующим образом:

$$\frac{1}{3}\pi r^2 h_1 \rho g + \pi r^2 L_{1np}^{(1)} \rho g \sin \beta = 2\pi r \sigma \cos \alpha; \quad (14)$$

$$\frac{1}{3}\pi r^2 h_1 \rho g + \pi r^2 L_{1лв}^{(1)} \rho g \sin \beta = 2\pi r \sigma \cos \alpha; \quad (15)$$

$$\pi r^2 \left(h_{1об}^{(1)} - h_1 \right) \rho g + \frac{1}{3}\pi r^2 h_1 \rho g = 2\pi r \sigma \cos \alpha. \quad (16)$$

В результате

$$L_{\text{нп}}^{(1)} = \left(h - \frac{1}{3} h_1 \right) / \sin \beta; \quad (17)$$

$$L_{\text{лв}}^{(1)} = \left(h - \frac{1}{3} h_1 \right) / \sin \beta; \quad (18)$$

$$h_{\text{лоб}}^{(1)} = h - \frac{1}{3} h_1 + h_1 = h + \frac{2}{3} h_1. \quad (19)$$

Из выражений (17)-(19) видно, что общая высота подъема воды в вертикальном $h_{\text{лоб}}^{(1)}$ и наклонных капиллярах больше, чем в предыдущем случае (11)-(12). Видно также, что подъем воды в вертикальном капилляре не зависит от угла наклона боковых капилляров. Действительно из уравнений (17) и (18) следует, что

$$h_{\text{лв}}^{(1)} = h_{\text{нп}}^{(1)} = h - \frac{1}{3} h_1,$$

и при $\beta = 90^\circ$, $\sin \beta = 1$, а высота подъема воды в боковых капиллярах выражается уравнением

$$h_1 + h_{\text{лв}}^{(1)} = h_1 + h - \frac{1}{3} h_1 = h + \frac{2}{3} h_1,$$

что совпадает с уравнением (12).

Более сложная система капилляров представлена на рис.8. От предыдущей она отличается добавлением капилляров второго уровня, расположенных на высоте h_2 над капиллярами первого уровня.

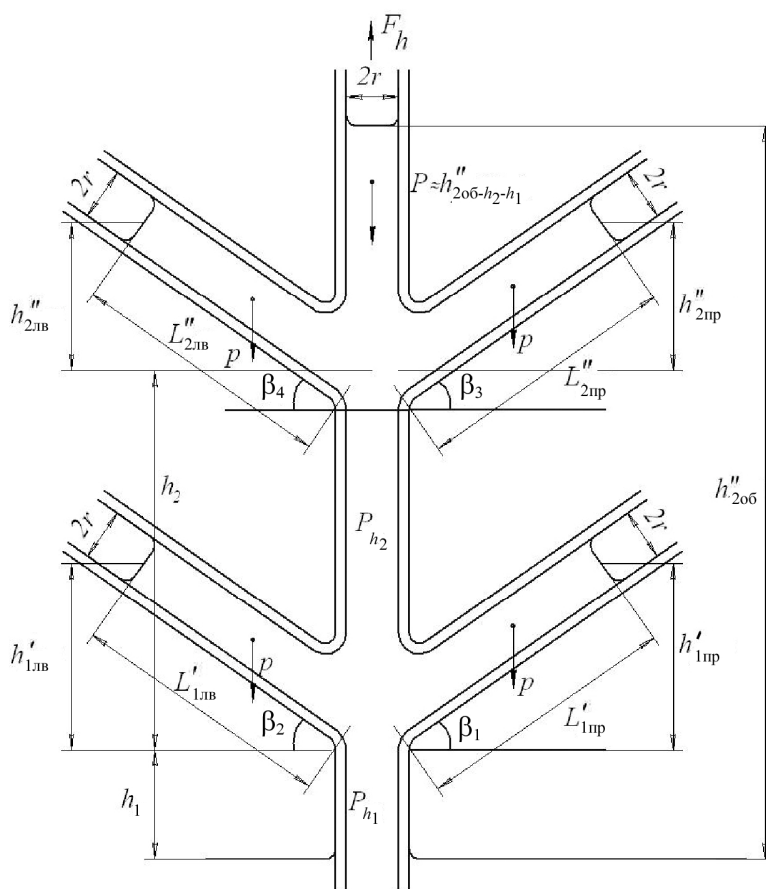


Рис.8. Двухуровневая система ветвящихся симметричных капилляров

Для элементов второго яруса введем обозначения:

β_3 и β_4 – углы наклона правой и левой ветвей к горизонтали;

$h_{2пр}^{(2)}$ и $h_{2лв}^{(2)}$ – высоты подъема воды в капиллярах второго уровня;

$L_{2пр}^{(2)}$ и $L_{2лв}^{(2)}$ – расстояние продвижения воды в правом и левом капиллярах;

$h_{2об}^{(2)}$ – общая высота подъема воды в вертикальном капилляре в двухуровневой системе.

Для простоты положим: $h_1=h_2$; $\beta_1=\beta_2=\beta_3=\beta_4=\beta$. Тогда, используя те же рассуждения, что и выше, можно записать уравнения продвижения воды в каждой из капиллярных ветвей:

– для ветвей первого уровня

$$\frac{1}{5} \pi r^2 h_1 \rho g + \pi r^2 L_{1пр}^{(1)} \rho g \sin \beta = 2 \pi r \sigma \cos \alpha ; \quad (20)$$

$$\frac{1}{5} \pi r^2 h_1 \rho g + \pi r^2 L_{1лв}^{(1)} \rho g \sin \beta = 2 \pi r \sigma \cos \alpha ; \quad (21)$$

– ветвей второго уровня

$$\frac{1}{5} \pi r^2 h_1 \rho g + \frac{1}{3} \pi r^2 h_1 \rho g + \pi r^2 L_{2пр}^{(2)} \rho g \sin \beta = 2 \pi r \sigma \cos \alpha ; \quad (22)$$

$$\frac{1}{5} \pi r^2 h_1 \rho g + \frac{1}{3} \pi r^2 h_1 \rho g + \pi r^2 L_{2лв}^{(2)} \rho g \sin \beta = 2 \pi r \sigma \cos \alpha ; \quad (23)$$

– вертикального капилляра

$$\pi r^2 \rho g \left(\left(h_{2об}^{(2)} - 2h_1 \right) + \frac{1}{3} h_1 + \frac{1}{5} h_1 \right) = 2 \pi r \sigma \cos \alpha . \quad (24)$$

Применяя далее преобразования, как и выше, получаем

$$L_{1пр}^{(1)} \sin \beta = L_{1лв}^{(1)} \sin \beta = \frac{2 \sigma \cos \alpha}{r \rho g} - \frac{1}{5} h_1 - h_1 = h - 0,2 h_1 = h_{1лв}^{(1)} = h_{1пр}^{(1)} ; \quad (25)$$

$$L_{2пр}^{(2)} \sin \beta = L_{2лв}^{(2)} \sin \beta = \frac{2 \sigma \cos \alpha}{r \rho g} - \frac{1}{5} h_1 - \frac{1}{3} h_1 = h - 0,6 h_1 = h_{2лв}^{(2)} = h_{2пр}^{(2)} ; \quad (26)$$

$$h_{2об}^{(2)} = \frac{2 \sigma \cos \alpha}{r \rho g} + \left(2 - \frac{1}{5} - \frac{1}{3} \right) h_1 = h + \frac{22}{15} h_1 = h + 1,466 h_1 . \quad (27)$$

Сравнивая выражения (17)-(19) и (25)-(27), можно заметить, что продвижение воды в наклонной части капилляров первого уровня больше, чем в капиллярах второго уровня, а прирост высоты относительно величины h_1 уменьшается.

Выполняя аналогичные построения и расчеты с условием равенства углов наклона капиллярных ветвей и равенства расстояний между ветвями и вводя соответствующие обозначения для каждого из уровней, получаем общее выражение для капиллярных систем с N уровнями:

$$L_{n пр/лв}^{(N)} \sin \beta = h - h_1 \sum_{n=1}^N \frac{1}{2n+1} = h_{n пр/лв}^{(N)} ; \quad (28)$$

$$h_{n об}^{(N)} = h + (N) h_1 - h_1 \sum_{n=1}^N \frac{1}{2n+1} , \quad (29)$$

где N – количество уровней в капиллярной системе; n – номер рассматриваемого уровня.

Отсчет уровней в данной записи суммы следует вести вниз, начиная с верхнего N -го уровня.

Так, например, для второго уровня четырехуровневой системы из уравнения (28) справедливо соотношение:

$$L_{2\text{пр/лв}}^{(2)} \sin \beta = h - h_1 \sum_{(4)}^2 \frac{1}{2n+1} = h - h_1 \left(\frac{1}{2 \cdot 4 + 1} + \frac{1}{2 \cdot 3 + 1} + \frac{1}{2 \cdot 2 + 1} \right) =$$

$$h - h_1 \left(\frac{1}{9} + \frac{1}{7} + \frac{1}{5} \right) = h - 0,45h_1.$$

Воспользовавшись выражениями (28) и (29), определим величину продвижения воды в наклонных верхних ветвях капиллярных систем третьего, четвертого, пятого уровней и их отношение к наибольшему продвижению в первой нижней ветви. Для численной оценки представим величину h_1 следующим образом:

$$h_1 = kh, \quad 0 \leq k \leq 1. \quad (30)$$

Тогда, например, для двухуровневой системы можно записать:

$$L_{2\text{пр}}^{(2)} / L_{1\text{пр}}^{(1)} = (1 - 0,6k) / (1 - 0,2k), \quad (31)$$

и, задавая значения k , определить соотношение продвижения воды в ветвях второго уровня к первому. Аналогичными расчетами для ветвей третьего-пятого уровней определяем распределение воды в капиллярной системе. Результаты таких расчетов представлены в таблице, данные которой позволяют определить величины отношения продвижения воды в наклонных капиллярах от k и высоту подъема воды в вертикальных капиллярах систем разных уровней, также являющуюся функцией k . Для вычисления высоты подъема воды можно использовать уравнение (29).

$L_n^{(N)} / L_1^{(N)}$	k				
$h_{\text{ноб}}^{(N)} / h$	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8
Двухуровневая система					
$L_{2\text{пр}}^{(2)} / L_{1\text{пр}}^{(1)}$	0,92	0,83	0,78	0,73	0,62
$h_{2\text{об}}^{(2)} / h$	1,30	1,59	1,74	1,88	2,18
Четырехуровневая система					
$L_{2\text{пр}}^{(4)} / L_{1\text{пр}}^{(4)}$	0,97	0,96	0,92	0,91	0,87
$L_{3\text{пр}}^{(4)} / L_{1\text{пр}}^{(4)}$	0,93	0,86	0,82	0,78	0,70
$L_{4\text{пр}}^{(4)} / L_{1\text{пр}}^{(4)}$	0,86	0,71	0,63	0,56	0,40
$h_{4\text{об}}^{(4)} / h$	1,64	2,28	2,61	2,92	3,56
Пятиуровневая система					
$L_{2\text{пр}}^{(5)} / L_{1\text{пр}}^{(5)}$	0,98	0,95	0,94	0,93	0,90
$L_{3\text{пр}}^{(5)} / L_{1\text{пр}}^{(5)}$	0,95	0,90	0,87	0,84	0,78
$L_{4\text{пр}}^{(5)} / L_{1\text{пр}}^{(5)}$	0,90	0,81	0,76	0,71	0,61
$L_{5\text{пр}}^{(5)} / L_{1\text{пр}}^{(5)}$	0,84	0,67	0,58	0,50	0,32
$h_{5\text{об}}^{(5)} / h$	1,82	2,65	3,06	3,47	4,30

Примечание. Данные приведены в относительных единицах.

На рис.9 показано продвижение воды в трехуровневой капиллярной системе. На рис.10, 11 представлены результаты расчетов для пятиуровневой капиллярной системы при угле наклона капилляров 30° и 60° .

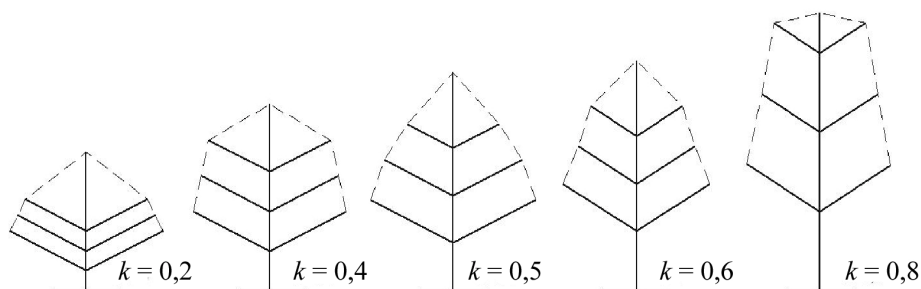


Рис.9. Продвижение воды в 3-уровневом капилляре (угол наклона капилляров 30°)

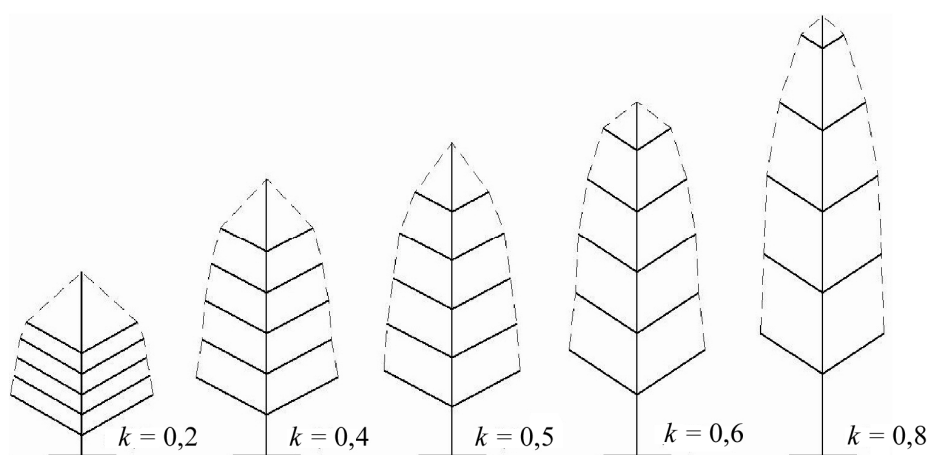


Рис.10. Продвижение воды в 5-уровневом капилляре (угол наклона капилляров 30°)

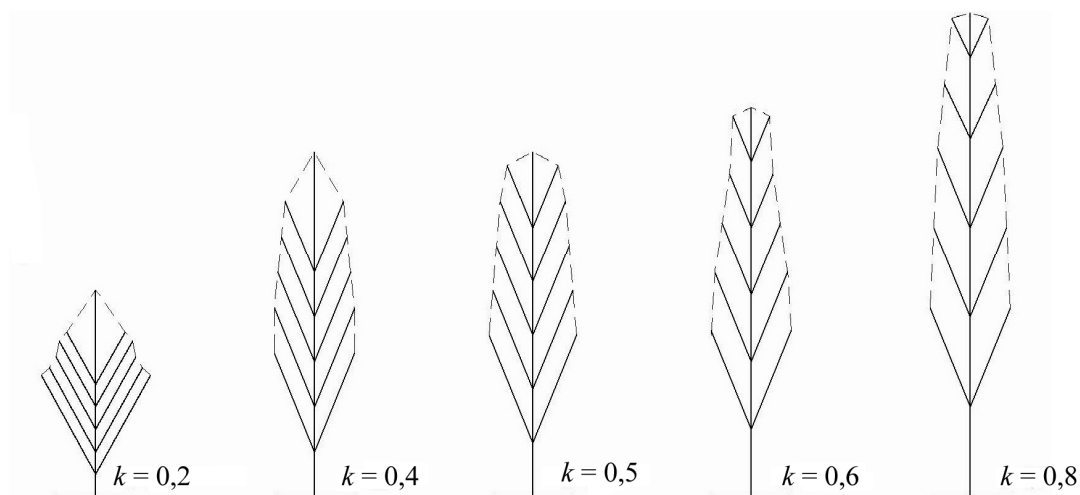


Рис.11. Продвижение воды в 5-уровневом капилляре (угол наклона капилляров 60°)

Выводы. Результаты наших исследований обнаруживают интересное свойство подобных систем, заключающееся в том, что при увеличении количества уровней капиллярных систем продвижение воды в капиллярах нижних уровней больше, чем в капиллярах более высоких уровней. Одновременно с этим увеличивается подъем воды в вертикальном капилляре. Полученные при этом фигуры графиков удивительно напоминают форму дерева или листа.

Не означает ли это, что своей специфической формой растения обязаны наличию капиллярных систем? Также можно предположить, что поверхностное натяжение водного мениска в капиллярах проводящего пучка мезофилла порождает движущую силу, создающую восходящий транспирационный поток.

Изучение транспирации за малые промежутки времени показало, что каждые 20 мин интенсивность транспирации то увеличивается, то уменьшается, и при этом, соответственно, уменьшается или увеличивается ширина щели устья. В.В. Кузнецов и соавторы предполагают [1], что в растении существует очень чувствительная регуляторная гидродинамическая система, вступающая в действие даже при незначительной потере воды листьями (0,06% от исходного ее количества) и предупреждающая более сильное обезвоживание в дальнейшем. Одновременно отмечается, что диффузия молекул воды от испаряющей поверхности листа в воздух происходит в 1500 раз быстрее, чем их поступление в корень из почвы.

В рамках рассмотренной нами модели капиллярной системы объяснение этому может заключаться в следующем. При достижении водой концов капилляров в проводящих пучках вода выходит из них и смачивает близлежащие к капиллярам стенки клеток межклетника, и процесс подъема воды прекращается, поскольку вне капилляра мениска нет, и сила поверхностного натяжения исчезает. Одновременно с этим происходит процесс испарения воды с поверхностей клеток в полость межклетника. Содержание паров воды в межклетнике растёт, устьица приоткрываются, и пар выходит в атмосферу. Дальнейший процесс испарения приводит к образованию менисков в капиллярах проводящих пучков и испарению воды с поверхности менисков. При этом, ввиду большой скорости диффузии молекул воды с поверхности листа в воздух, уровень воды в капиллярах начинает понижаться, площадь испарения воды уменьшается, так как испаряющей поверхностью являются теперь только капилляры проводящих пучков, снижается содержание паров воды в межклетниках и ширина устьичной щели уменьшается. В то же самое время образуются мениски, и происходит подъем воды к концам капилляров. Скорость поднятия воды в менисках мала, так как из почвы в корень она поступает медленно. При достижении концов капилляров в проводящих пучках вода снова смачивает поверхность клеток межклетника, мениски исчезают, и процесс циклически повторяется. Поскольку пар выходит из межклеточника в атмосферу, давление в его полости уменьшается. Уменьшается и ширина устьичной щели, начинается процесс испарения воды в полость межклетника. Наступает автоколебательный процесс. Надо полагать, что этот процесс зависит от времени суток. Ночью, когда температура снижается, автоколебания должны прекратиться или их период увеличиться. Возможно они могут прекратиться и возобновиться днем. Их также не должно быть при 100% влажности воздуха. Но, судя по отсутствию в литературе каких-либо данных на этот счет, подобными исследованиями никто не занимался.

Библиографический список

1. Кузнецов В.В. Физиология растений / В.В. Кузнецов, Г.А. Дмитриева. – М.: Высш. шк., 2006.
2. Шеин Е.В. Курс физики почв / Е.В. Шеин. – М.: МГУ, 2005.
3. Пахомова Г.И. Водный режим растений / Г.И. Пахомова, В.К. Безуглов. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1980.

Материал поступил в редакцию 01.11.10.

References

1. Kuznecov V.V. Fiziologiya rastenii / V.V. Kuznecov, G.A. Dmitrieva. – M.: Vyssh. shk., 2006. – In Russian.
2. Shein E.V. Kurs fiziki pochv / E.V. Shein. – M.: MGU, 2005. – In Russian.

3. Pahomova G.I. Vodnyi rejim rastenii / G.I. Pahomova, V.K. Bezuglov. – Kazan': Izd-vo Kazan. un-ta, 1980. – In Russian.

Y.M. VERNIGOROV, I.A. KIPNIS

MATHEMATICAL MODELING OF LIQUID DISTRIBUTION IN BRANCH CAPILLARY SYSTEMS

Mechanism of forming habit of the plants on basis of assumption that the basic process which enables growth and development of plants is water transmission through their capillary channels is considered.

Keywords: capillary, xylem, transpiration, plant.

ВЕРНИГОРОВ Юрий Михайлович (р. 1941), профессор кафедры «Физика» Донского государственного технического университета, доктор технических наук (1995), профессор (1997). Окончил Ростовский государственный университет (1964).

Область научных интересов: порошковая металлургия, взаимодействие дисперсных магнитных систем в электромагнитном поле, процессы в сложных капиллярных системах.

Автор более 200 публикаций.

jvernigorov@dstu.edu.ru

КИПНИС Иосиф Аншелевич (р. 1945), заместитель директора по науке, финансовый директор научно-производственной фирмы «КАСИОР», кандидат технических наук (1978). Окончил Таганрогский радиотехнический институт (1967).

Область научных интересов: физическая акустика, автоматические системы ирригации, процессы в сложных капиллярных системах.

Автор более 50 публикаций.

kasior@rambler.ru

Yury M. VERNIGOROV (1941), Professor of the Physics Department, Don State Technical University. PhD in Science (1995), Professor (1998). He graduated from Rostov State University (1964).

Research interests: powder metallurgy, disperse magnetic systems interaction in magnetic fields, processes in complex capillary systems.

Author of over 200 publications.

Iosif A. KIPNIS (1945), Associate Director for Science, Financial Director of the Research and Production Company «KASIOR». Candidate of Science in Engineering (1978). He graduated from Taganrog Radio-Engineering Institute (1967).

Research interests: physical acoustics, irrigation automatic systems, processes in complex capillary systems.

Author of over 50 publications.