

Velichko Anna Nikolaevna – Leningrad regional state institution "Lenoblecocontrol" (State Inspection of Environmental Supervision of the Leningrad Region); e-mail: anveli@bk.ru; 197343, St. Petersburg, Lanskoeye highway, 43-77; phone: + 79215910789; cand. of eng. sc.; chief expert in biotesting.

Vishnevetsky Vyacheslav Yur'evich – Southern Federal University; e-mail: vuvishnevetsky@sfedu.ru; 2, Shevchenko street, build. E, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634371795; the department electrohydroacoustical and medical equipment; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 581.1

DOI 10.23683/2311-3103-2017-8-88-97

И.А. Кипнис, Ю.М. Вернигоров**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДЪЕМА ВОДЫ В КАПИЛЛЯРЕ ПРИ НАЛИЧИИ
В НЕМ ПОПЕРЕЧНЫХ СПЛОШНЫХ И ПЕРФОРИРОВАННЫХ
ПЕРЕГОРОДОК***

В большинстве публикаций, связанных с писанием подъема воды в растениях не учитывается строение ксилемы, обеспечивающей подъем и распределение воды. Сосуды листовых растений формируются из пористых трахеид, форма которых влияет на образование простых либо лестничных и эфедронидных перфорационных пластинок. Перфорационные пластинки находятся на концах сосудов и связывают их между собой. Перегородки повернуты в пространстве на некоторый угол друг относительно друга. В работе впервые описана модель подъема воды в вертикальном капилляре с поперечными сплошными и перфорированными перегородками. Показано, что наличие наклонных перфорационных перегородок обеспечивает большую площадь перфораций. Произведена оценка угла наклона лестничных перфорированных перегородок к горизонтали для разных радиусов капилляра и показано, что углы наклона находятся в пределах от 55° до 88° . При этом площади перегородок могут быть от 2 до 28 раз больше площади поперечного сечения капилляров, что даёт возможность в этой же пропорции увеличить площадь, занимаемую перфорацией и снизить сопротивление продвижению воды. При углах наклона перфорированных перегородок близких к 90° вода в капилляре поднимается, как в обычном капилляре с внутренней продольной вертикальной прозрачной для воды перегородкой. Показано, что различная пространственная ориентация перегородок приводит к увеличению высоты подъема воды в капилляре. Получено аналитическое выражение оценки влияния перфорированных перегородок на высоту подъема воды в ксилеме, что позволяет объяснить реальный подъем воды в листовых деревьях, который в действительности во много раз выше, чем рассчитанный по классической формуле Жюрена. Показано, что с увеличением непрозрачной площади перегородки, уменьшением угла ее наклона и высоты расположения относительно поверхности воды высота подъема воды увеличивается. Система перегородок в ксилеме растений, как и любая открытая система, проявляет свойство мультипликативности: действие каждой из подсистем (каждой перегородки) суммируется

Растение; ксилема; сосуд; капилляр; модель

I.A. Kipnis, Yu.M. Vernigorov**MODELING THE WATER RISE IN THE CAPILLARY
IN PRESENCE OF TRANSVERSE SOLID AND PERFORATED PARTITIONS**

In most publications related to the water rise in plants the structure of the xylem, which provides rise and distribution of water, is not taken into account. Vessels in leafy plants are formed from porous tracheids, which affects the formation of simple or stair and average perforation plates. Perforation plates are located at the ends of the vessels and connect them with each other. Partitions

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

are rotated in space at a certain angle relative to each other. The model of water rise in a vertical capillary with transverse solid and perforated partitions is described herein for the first time. It is shown that the presence of oblique perforation of the partitions provides a large area of perforations. The angle of inclination of the perforated partitions staircase to the horizontal for different radii of the capillary is estimated and it is shown that the tilt angles are in the range from 55° to 88° . The area of walls can be from 2 to 28 times greater than the cross sectional area of the capillaries, which gives the opportunity in the same proportion to increase the area occupied by the perforation and reduce the resistance in moving water. At angles of perforated partitions close to 90° the water in the capillary rises, as in a conventional capillary with an inner longitudinal vertical transparent water partition. It is shown that the different spatial orientation of baffles leads to an increase in the height of water rise in the capillary. An analytical expression for the evaluation of the influence of perforated baffles on the height of water rise in the xylem is obtained, that helps to explain the actual rise of water in deciduous trees, which in reality is many times higher than calculated by the classic formula Jurina. It is shown that with increasing the opaque area of the walls and decreasing the angle of tilt and height location relative to the water surface, height of the water rise increases. The system of partitions in the xylem of plants, like any open system, shows a property of the multiplicativity: action of each of the subsystems (each septum) is added.

Plant; xylem; vessel; capillary; model.

Введение. В течение многих десятилетий наукой изучается движение и распределение воды в растениях. Результаты описаны в монографиях по физиологии растений, например [1–4]. Детально описано и анатомическое строение водопроводящих путей (ксилемы) в растениях [5–7]. Опубликованы также экспериментальные исследования различных аспектов движения воды в ксилеме растений. Так, например, в [8] рассмотрены вопросы накопления и депонирования воды во флоэме и последующий ее возврат в ксилему при дефиците почвенной влаги. Вопросы продвижения воды в ксилеме в условиях климатического стресса рассмотрены в [9]. Но в литературных источниках и в настоящее время дискутируется вопрос о силах и механизмах, обеспечивающих подъем и распределение воды при её продвижении в ксилеме [10]. Основным недостатком публикаций, связанных с вопросами подъема воды в растениях, является то, что в них не учитывается анатомическое строение ксилемы, от которого существенным образом зависит высота подъема воды. Так в [11] получена формула для определения высоты подъема воды в стволах хвойных деревьев, учитывающая анатомическое строение их трахеидальной ксилемы. Рассчитанная по полученной формуле высота подъема воды в капилляре существенно отличается от таковой, рассчитанной по классической формуле Жюрена [12, 13], используемой в литературных источниках для этих же целей. В [14, 15] показано, что подъем воды в растениях обусловлен действием сил поверхностного натяжения в менисках капилляров. В отличие от хвойных растений, имеющих ксилему, состоящую из трахеид диаметром от $20 \cdot 10^{-6}$ м до $40 \cdot 10^{-6}$ м и длиной от $2,5 \cdot 10^{-3}$ м до $5 \cdot 10^{-3}$ м, сообщающихся между собой через окаймленные поры, ксилема лиственных растений - сосуды диаметром d от $50 \cdot 10^{-6}$ м до $700 \cdot 10^{-6}$ м, длина которых в среднем 0,1 м, но для отдельных пород деревьев может достигать 10 и более метров (см., например, [16] стр.20). Сосуды формируются из пористых трахеид. При этом трахеиды преобразуются в членики сосуда, между которыми в зависимости от типа исходной трахеиды образуется либо простая перфорационная пластинка с одним сквозным отверстием [17] (стр. 118, рис 115, поз.7), или лестничные и эфедроидные перфорационные пластинки [17] (стр. 120, рис. 116 А, Б, поз.5). Таким образом, внутри сосуда возникают два вида поперечных перегородок: образованные перфорационными пластинками со сквозными отверстиями и перегородки лестничного типа, плоскость которых расположена под углом к горизонтали. При этом верхняя и нижняя плоскости лестничной перфорации в есте соединения сосудов не параллельны и расположены под некоторым углом друг к другу относительно вертикальной оси сосуда. В [18] показано,

что наличие кольцевых выступов в полость сосуда на внутренней его стенке, образованных простой перфорационной пластинкой, позволяет воде подниматься на высоту большую по сравнению с вертикальным капилляром того же радиуса. Но до настоящего времени в литературных источниках нет ответа на вопрос о том, какую роль внутри сосуда играют поперечные лестничные и эфедроидные перфорационные пластины.

Цель работы. Моделирование подъема воды в вертикальном капилляре, имеющем поперечные сплошные и перфорированные перегородки и определение их влияния на высоту подъема воды.

Основная часть. Традиционно высоту подъема воды в растениях h оценивают с помощью классической формулы Жюрена, описывающей подъем воды в вертикальном капилляре радиуса r , имеющей вид

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

Полагая угол смачивания $\alpha=0^\circ$, ускорение свободного падения $g=9,8 \text{ м/с}^2$, плотность воды $\rho = 998,84 \text{ кг/м}^3$, коэффициент поверхностного натяжения $\sigma = 0,074 \text{ Па/м}$ формулу Жюрена можно записать в виде

$$h = \frac{0,15}{r} 10^{-4}, \text{ м} \quad (2)$$

На рис. 1 (кривая 1) представлена рассчитанная по формуле (2) зависимость h от r при условии диапазона изменения последнего от $25 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ до $400 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Из рисунка следует, что при $r \sim 350 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ $h \approx 0,07 \text{ м}$, а при $r \sim 25 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ $h \approx 0,6 \text{ м}$.

Таким образом, в указанном диапазоне изменения r вода в сосудах ксилемы листовых растений не может подняться на высоту большую, чем показывает расчет. Это противоречит действительности: листовые деревья достигают высоты нескольких десятков метров. Расчеты также показывают, что увеличение h , связанное с наличием в сосудах простых перфорационных пластинок со сквозными отверстиями [18] при уменьшении радиуса просвета сосуда на $\sim 15 \%$, незначительно (порядка 17%) при $r > 25 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ (рис. 1, кривая 2).

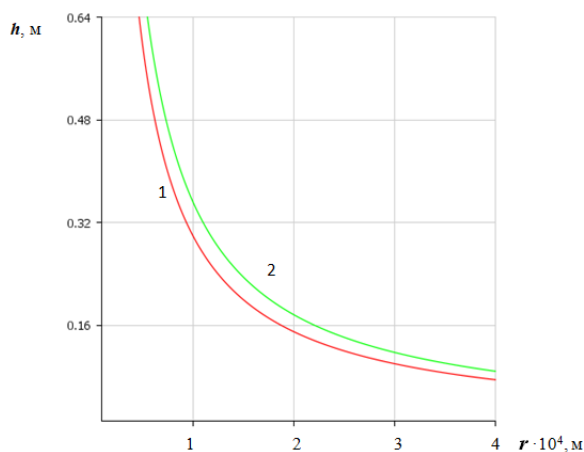


Рис. 1. Зависимость высоты подъема воды в капилляре от его радиуса

В [19, 20] теоретически и экспериментально установлено, что профиль скоростей движения воды в капиллярах не совпадает с пуазейлевским распределением, а именно: скорость жидкости возле стенки цилиндрического капилляра имеет

максимальное значение, существенно превышающее и среднее значение скорости по сечению, и скорость в центре капилляра. Показано, что по мере заполнения капилляра вверх по стенке скользит тонкая (прекурсионная в терминологии авторов) пленка жидкости, значительно опережающая мениск. Когда сила F_n , обусловленная поверхностным натяжением, становится равной силе начального напряжения сдвига $F_{нс}$ в жидкости, происходит её подъем, что фиксируется в виде быстрого подъёма столбика жидкости. Этот результат следует учитывать при изучении движения воды в капиллярах ксилемы растений.

На рис. 2 представлены модели погруженных в воду капилляров радиуса r , имеющих поперечные перегородки. Для простоты положим сначала, что внутри капилляра имеется сплошная жестко закрепленная горизонтальная перегородка радиуса r_1 , расположенная на высоте h_1 от поверхности воды (рис. 2,а). При этом $r_1 < r$. Уравнение равновесия воды на высоте H в таком капилляре можно записать в виде

$$\pi r^2 \rho g H - (H - h_1) \pi r_1^2 \rho g = 2\pi r \sigma \cos \alpha. \quad (3)$$

Полагая $r_1 = k r$ учтем, что перегородка перекрывает капилляр частично, т.е. $0 \leq k \leq 1$. Примем $h_1 = n h$, причем условие погружения перегородки в жидкость имеет вид $0 \leq n \leq 1$. Сокращая обе части уравнения на $\pi r^2 \rho g$ получим

$$H - H k^2 + n k^2 h = h \quad (4)$$

откуда

$$H = h \frac{1 - nk^2}{1 - k^2}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что при уменьшении r_1 ($k \rightarrow 0$) $H = h$, то есть вода поднимается как в обычном вертикальном капилляре. При $k=1$ H обращается в бесконечность, так как перегородка перекрывает капилляр, и задача теряет физический смысл.

При $n \rightarrow 0$ $H \rightarrow h/(1 - k^2)$, т.е. H будет зависеть только от соотношения r_1 и r . Физический смысл полученных результатов состоит в том, что часть веса столба воды в объеме кругового цилиндра радиуса r_1 над перегородкой принимает на себя перегородка и F_n может поднять воду в капилляре на высоту большую, чем в вертикальном капилляре без перегородки. То есть увеличение радиуса r_1 непрозрачной для воды перегородки приводит к увеличению H . Полученные выводы сохраняются и в случае наличия в капилляре нескольких перегородок, поскольку объем V_{abcd} воды, который “опирается” на эти перегородки остается прежним. А высота H зависит только от h_1 и r_1 .

На рис. 2,б сплошная перегородка радиуса r расположена под углом β к горизонтали. Объем воды, удерживаемый мениском, воды будет равен

$$V_{ABCD} - V_{abcf} = V_{ABCD} - V_{ebcf} - V_{aco} + V_{odf}. \text{ Но } V_{aco} = V_{odf}$$

в силу симметрии.

Тогда

$$V_{ABCD} - V_{abcf} = V_{ABCD} - V_{ebcf}.$$

Столб воды над перегородкой представляет собой усеченный эллиптический цилиндр с полуосями r_1 и r'_1 . Уравнение равновесия воды может быть записано в виде.

$$\pi r^2 \rho g H - (H - h_1) \pi r_1 r'_1 \rho g = 2\pi r \sigma \cos \alpha. \quad (6)$$

Полагая $r_1 = k r$ $0 \leq k \leq 1$, $h_1 = n h$ $0 \leq n \leq 1$ и учитывая, что $r'_1 = r_1 \cos \beta$ уравнение (6) можно записать в виде

$$H - H k^2 \cos \beta + n k^2 \cos \beta h = h \quad (7)$$

откуда высота подъема воды в капилляре равна

$$H = h \frac{1 - nk^2 \cos \beta}{1 - k^2 \cos \beta}. \quad (8)$$

Анализ соотношения (8) показывает, что экстремум полученной функции имеет место при $\beta=0$, $n=1$ и $k=0$. Очевидно, что при $k=0$ перегородка отсутствует и, следовательно, высота подъема H стремится к минимуму. При $n=1$ перегородка расположена на плоскости, образованной верхними точками касания мениска стенок капилляра. Перегородка при этом не погружена в воду и, следовательно, высота H минимальна. Наконец, при $\beta=90^\circ$ высота подъема максимальна при заданных n и k . Из (8) следует, что при $\beta \rightarrow 0^\circ$ уравнение (8) совпадает с (5). При $\beta \rightarrow 90^\circ$ $H = h$. Вышеприведенные результаты анализа зависимости H от n и k остаются справедливыми и для рассматриваемого случая.

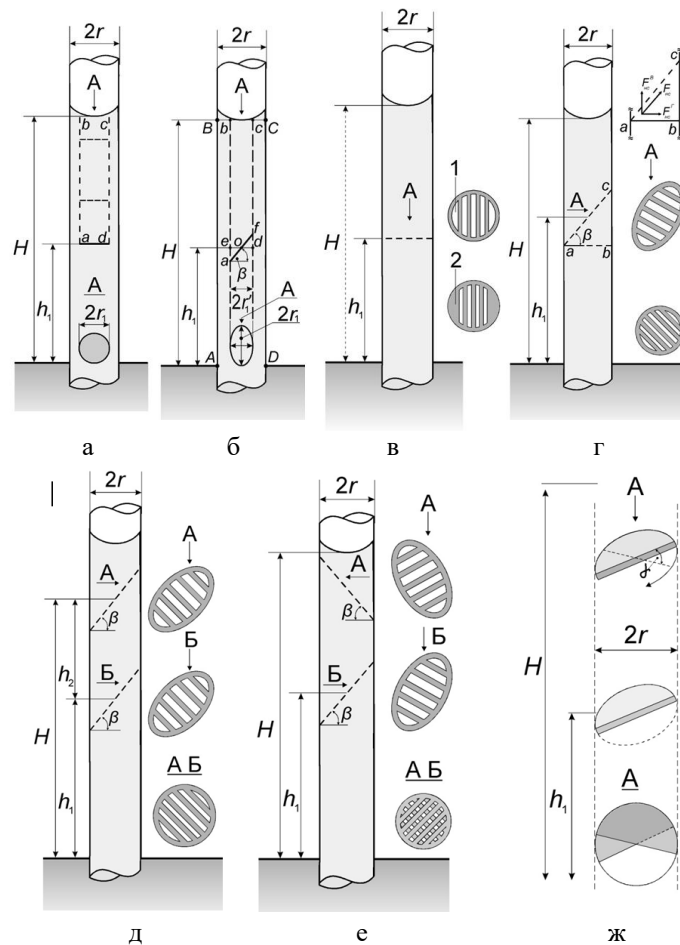


Рис. 2. Модели вертикальных капилляров с поперечными сплошными и с перфорированными перегородками

На рис. 3,а представлены рассчитанные по (8) 3d графики зависимости H/h от k и n при β равном 2° , 60° и 80° – 1,2,3 соответственно, а на рис. 3,б и 3,д графики зависимости H/h от k и β при n равном 0,3 и 0,9 соответственно графики 1 и 2. Из графиков следует, что при $k \rightarrow 1$ ($r_1 \rightarrow r$), а также при $n \rightarrow 0$ ($h_1 \rightarrow 0$) H/h увеличивается тем сильнее, чем меньше β . Этот же вывод следует из рис. 3,б : при $\beta \rightarrow 0^\circ$ и $k \rightarrow 1$ $H/h \rightarrow \infty$. При $\beta \rightarrow 90^\circ$ $H/h \rightarrow 1$. Таким образом, общим условием увеличения H является увеличение площади поперечной перегородки (или ее горизонтальной проекции), уменьшением β и h_1 .

Этот результат можно обобщить и для случая перфорированных перегородок показанных на рис. 2,в–е. При этом суммарные площади непрозрачной для воды перегородки и перфорации, независимо от их формы, можно заменить эквивалентными окружностями соответствующих радиусов. И все вышеприведенные рассуждения при этом останутся справедливыми.

Капилляр с поперечной горизонтальной перфорированной перегородкой изображен на рис. 2,в. Возможны два варианта расположения перфорации. В одном случае стенки капилляра являются одной из длинных сторон ближайших к ним щелей (см. рис. 2,в-1). В этом случае прекурсионная пленка пройдет и через эти щели и будет также двигаться и по нижней не прозрачной для нее поверхности перегородки. Во втором случае щели перфорации граничат со стенками только узкими сторонами, как показано на рис. 2,в-2. В этом случае прекурсионная пленка будет в основном двигаться по нижней поверхности перегородки. При этом прекурсионная пленка изменит вертикальное на горизонтальное направление движения и будет скользить по нижней стороне перегородки. Вызванное при этом напряжение сдвига жидкости будет направлено перпендикулярно оси капилляра. Это может привести к исчезновению мениска и, следовательно, к прекращению подъема воды. Можно предположить, что по этой причине в сосудах ксилемы и не образуется подобного вида перегородок, а образуются простые перфорационные пластины с отверстием и наклонные лестничные и эфедроидные перфорации.

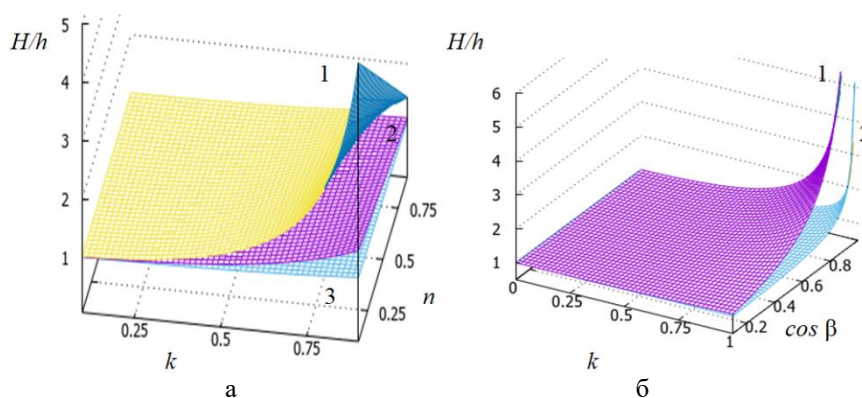


Рис.3. Зависимости отношения H/h от k , n и β

Рассмотрим случай наличия в капилляре поперечной наклонной перегородки лестничного типа (рис. 2,г), расположенной под углом β к горизонтали. Подъем воды будет происходить следующим образом. Прекурсионная пленка, достигнув линии ab , будет продолжать подниматься вертикально по стороне bc , а по стороне ac под углом β . Силу F_{nc} можно разложить на вертикальную F_{nc}^B и горизонтальную F_{nc}^r составляющие. Под действием F_{nc}^B вода будет подниматься вверх, а F_{nc}^r будет продвигать воду по горизонтали. При этом вогнутый мениск не исчезает. Как только вода в капилляре поднимется до первого отверстия в перфорации, она начнет проникать через перегородку и заполнять капилляр с другой ее стороны. Прекурсионная пленка начнет подниматься за перегородкой и подъем воды в капилляре продолжится.

В литературных источниках отсутствуют сведения об углах наклона перегородки, ее площади, площади, занимаемой перфорацией, что не дает возможности численной оценки ее влияния на высоту подъема воды в капилляре. Для решения этого вопроса воспользуемся указанием на то, что сосуды образуются из трахеид, каждая трахеида одной своей третью вклинивается между радиальными стенками

двух трахеид следующего уровня, а перфорационная пластинка образуется в месте контакта трахеид [11]. Длина трахеиды лежит в пределах от $2,5 \cdot 10^{-3}$ м до $5 \cdot 10^{-3}$ м. Тогда высота зоны контакта bc трахеид в месте их слияния составит \sim от $0,8 \cdot 10^{-3}$ до $1,67 \cdot 10^{-3}$ м. Учитывая, что $ab = d = 2r$, длина ac находится в пределах \sim от $0,81 \cdot 10^{-3}$ м до $1,8 \cdot 10^{-3}$ м. При этом площадь эллиптической перфорированной перегородки $S_{эл} = \pi rac/2$ в зависимости от величины r будет находиться в пределах \sim от $6,3 \cdot 10^{-8}$ м² до $2,1 \cdot 10^{-6}$ м². Эти площади эквивалентны окружностям радиусов от $0,14 \cdot 10^{-3}$ м до $0,67 \cdot 10^{-3}$ м. Площадь горизонтальной перегородки S_r в принятом диапазоне изменения r значительно меньше и находится в пределах $1,96 \cdot 10^{-9}$ м² < S_r < $3,84 \cdot 10^{-7}$ м². То есть на эллиптической перегородке количество и суммарная площадь $S_{щ}^{сум}$ занимаемая щелевидными отверстиями (перфорацией), может быть значительно больше (и, следовательно, сопротивление продвижению воды значительно меньше), чем на горизонтальной. Для того, чтобы убедиться в этом, составим отношение $S_{эл}/S_r$ с учетом того, что $ac = d/\cos \beta$. В результате получим $S_{эл}/S_r = 1/\cos \beta$. Из геометрических соображений нетрудно показать, что угол β в диапазоне изменения r лежит в пределах $\sim 55^\circ$ до 86° , что качественно соответствует изображению, приведенному в [14] (стр. 120, рис. 116 А, В). Следовательно, в указанном диапазоне изменения β величина $S_{эл}/S_r$ будет находиться в пределах от 1,8 до 28. В этой же пропорции может быть увеличена площадь перфораций по сравнению с горизонтальной перегородкой и одновременно снижено сопротивление продвижению воды. Как показано выше в случае наличия наклонной перегородки часть веса столба воды над перегородкой будет скомпенсирована силами упругости перегородки, а величина H будет зависеть от соотношения величин n , k и β . Пропорционально $\cos \beta$ будет уменьшаться суммарная площадь горизонтальной проекции непрозрачной для воды части перегородки. Следовательно, пропорционально $\cos \beta$ будет изменяться и объем столба воды над перегородкой, опирающийся на неё. Если принять отношение $S_{щ}^{сум}/S_{эл} = k^2$, то площадь перегородки без щелей пропорциональна $1 - k^2$, что и отражено в (8). Также прямо пропорционально $\cos \beta$ будет изменяться и горизонтальная проекция площади неперфорированной части наклонной перегородки при увеличении β . Влиянием толщины перегородки можно пренебречь, так как её величина не велика и составляет $\sim 10 \cdot 10^{-6}$ м.

Пусть теперь в капилляре имеются две эллиптические перегородки, имеющие одинаковую перфорацию и расположенные в параллельных плоскостях под углом β на расстоянии h_2 между ними (рис. 2,д). Как показано выше, уравнение равновесия воды в капилляре будет иметь вид и решение, как (8): у них будут одинаковыми $S_{щ}^{сум}$, β и одна и та же горизонтальная проекция. Поэтому все рассуждения, приведенные выше для капилляра с одной наклонной перегородкой, остаются справедливыми, а высота подъема воды зависит только от r и h_1 . Однако ситуация изменяется, если эти перегородки расположены в разных плоскостях, как показано на рис. 2,е. В этом случае объем воды между перегородками и их прозрачность для воды останутся такими же, как на рис. 2,д. При этом сопротивление продвижению воды через каждую перегородку не изменится, поскольку они разнесены в пространстве. Величина H будет зависеть от площади их «суммарной» горизонтальной проекции, которая в свою очередь будет зависеть от площади и взаимной угловой ориентации перегородок в пространстве. Рассмотрим две параллельные сплошные поперечные перегородки площадью $\pi r^2/2$, расположенные друг над другом, как показано на рис. 2,ж. Площадь суммарной горизонтальной проекции перегородок составит $\pi r^2/2$. Поворот, какой либо перегородки, например верхней, вокруг вертикальной оси на угол γ , как показано на рис. 2,ж, приведет к увеличению суммарной площади их горизонтальной проекции. Одновременно с поворотом увеличится и объем воды, поддерживаемый перегородкой, что приведет к увеличению H . Но на рисунке в [12]

(стр. 120, рис. 116 А, Б, поз.5) показано, что перфорации занимают большую площадь перегородки и, кроме того, они повернуты в пространстве друг относительно друга. Если учесть, что средняя длина сосуда $\sim 10^{-1}$ м, то можно предположить следующее. Каждая из M последовательно расположенных по высоте сосуда перегородок с лестничной перфорацией имеет свой k_i $1 \leq i \leq M$. При этом непрозрачные для воды площади и пространственная ориентация перегородок таковы, что $\sum_1^M k_i$ в горизонтальной проекции с учетом взаимного перекрытия площадей перегородок стремится к единице. Тогда (8) может быть записано в виде

$$H = h \frac{1 - n (\sum_1^M k_i)^2 \cos \beta}{1 - (\sum_1^M k_i)^2 \cos \beta}, \quad (9)$$

где $0 \leq \sum_1^M k_i \rightarrow 1$.

Полученное уравнение позволяет оценить влияние перфорированных перегородок лестничного типа на высоту подъема воды в сосудах ксилемы лиственных растений. Все вышеизложенное остается справедливым и для перегородок с перфорацией эфедровидного типа.

Выводы.

1. Получено аналитическое выражение, позволяющее оценить влияние перфорированных поперечных перегородок с лестничной и эфедровидной перфорацией на высоту подъема воды в сосудах ксилемы и объяснить реальный подъем воды в лиственных деревьях, который в действительности во много раз выше, чем рассчитанный по классической формуле Жюрена.

2. Показано, что высота подъема воды увеличивается с увеличением непрозрачной площади перегородки, уменьшением угла ее наклона и высоты расположения относительно поверхности воды.

3. Произведена оценка угла наклона лестничных перфорированных перегородок к горизонтали для разных радиусов капилляра и показано, что углы наклона находятся в пределах от 55° до 88° . При этом площади перегородок могут быть от 2 до 28 раз больше площади поперечного сечения капилляров, что даёт возможность в этой же пропорции увеличить площадь, занимаемую перфорацией и снизить сопротивление продвижению воды. При углах наклона перфорированных перегородок близких к 90° вода в капилляре поднимается, как в обычном капилляре с внутренней продольной вертикальной прозрачной для воды перегородкой.

4. При условии достижения в горизонтальной проекции i из M лестничных перфорированных перегородок суммарного коэффициента перекрытия большего или равного единице подъем воды в капилляре не прекратится. А объем находящийся в пределах от 1-ой до i -ой перегородки становится источником воды для последующих $i+1 - M$ перегородок.

5. Полученные результаты показывают, что система перегородок в ксилеме растений, как и любая открытая система, проявляет свойство, получившее название в синергетике, мультипликативность: действие каждой из подсистем (каждой перегородки) суммируется, что и приводит к существенному увеличению высоты подъема воды в растениях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. Физиология растений. – М.: Высшая школа, 2006. – 742 с.
2. Zeiger T., Lond E. Plant Physiology. – 3rd Edition, Sinauer Associated, Inc. Sunderland, MA, 2002. – 690 p.
3. Якушкина Н.И., Бахтенко Е.Ю. Физиология растений. – М.: Гуманитарный изд. Центр ВЛАДОС, 2005. – 460 с.
4. Крамер П.Д., Козловски Т.Т. Физиология древесных растений. – М.: Лесная промышленность, 1983. – 464 с.

5. Myburg A.A., Sederoff R. Xylem Structure and Function. Encyclopedia of life science. – Nature, Publishing Group, 2001. – P. 1-9.
6. Zitte P. [u dr.]. Ботаника: пер. с немецкого. – М.: Изд. центр «Академия», 2008. – 367 с.
7. Лотова, Л.И. Ботаника. Морфология и анатомия высших растений. – 4-е изд. доп. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. – 512 с.
8. Pfautsch S., Renard J., Tjoelker M.G., Salih A. Phloem as Capacitor: Radial Transfer of Water into Xylem of Trees Stems Occurs via Symplastic Transport in Ray Parenchyma // Plant Physiology. – March 2015. – Vol. 167, No. 3. – P. 963-971.
9. Borghetty M., Grace J., Raschi A. Water transport in plant under climatic stress. – Cambridge University Press, Cambridge, 1993. – 300 p.
10. Harvay B.R. The theory of the rise of sap in trees: Some historical and conceptual remarks // Physics in Perspective. – 2013. – Vol. 15. – P. 320-358.
11. Кипнис И.А., Вернигоров Ю.М. Подъем воды в ксилеме растений с трахеидальной проводимостью // Вестник Донского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (81). – С. 117-125.
12. Шейн Е.В. Курс физики почв. – М.: МГУ, 2005. – 432 с.
13. Теория и методы физики почв: коллективная монография / под ред. Е.И. Шейна и Л.О. Карпачевского. – М.: Гриф и К, 2007. – 616 с.
14. Вернигоров Ю.М., Кипнис И.А. Математическое моделирование распределения жидкости в ветвящихся капиллярных системах // Вестник Донского государственного технического университета. – 2010. – Т. 10, № 8 (51). – С. 1195-1206.
15. Кипнис И.А., Вернигоров Ю.М. Механизм продвижения воды в капиллярах ксилемы растений // Вестник Донского государственного технического университета. – 2014. – Т. 14, № 3 (78). – С. 78-88.
16. Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение: учебник для студ. сред. проф. образования. – 3-е изд., стер. – М.: Изд. центр «Академия», 2010. – 272 с.
17. Тимошин А.К. Ботаника: в 4 т. Т. 3. Высшие растения: учебник для вузов. – М.: Изд. центр «Академия», 2007. – 352 с.
18. Вернигоров Ю.М., Кипнис И.А. Капиллярная модель древесных стволов // Вестник Донского государственного технического университета. – 2012. – № 6 (67). – С. 24-40.
19. Де Жен, П.Ж. Смачивание: статика и динамика // Успехи физических наук. – 1987. – Т. 151. – Вып. 4. – С. 619-681.
20. Кирколуп Е.Р. Разработка устройств для исследования свойств жидкости в капиллярной гидродинамике: дисс. ... канд. техн. наук. – Барнаул, 2008. – 146 с.

REFERENCES

1. Kuznetsov V.V., Dmitrieva G.A. Fiziologiya rasteniy [Plant physiology]. Moscow: Vysshaya shkola, 2006, 742 p.
2. Zeiger T., Lond E. Plant Physiology. 3rd Edition, Sinauer Associated, Inc.Sunderland, MA, 2002 690 p.
3. Yakushkina N.I., Bakhtenko E.Yu. Fiziologiya rasteniy [The physiology of plants]. Moscow: Gumanitarnyy izd. Tsentr VLADOS, 2005, 460 p.
4. Kramer P.D., Kozlovski T.T. Fiziologiya drevesnykh rasteniy [Physiology of woody plants]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1983, 464 p.
5. Myburg A.A., Sederoff R. Xylem Structure and Function. Encyclopedia of life science. Nature, Publishing Group, 2001, pp. 1-9.
6. Zitte P. [i dr.]. Botanika [Botany]: translated from the German. Moscow: Izd. tsentr «Akademiya», 2008, 367 p.
7. Lotova L.I. Botanika. Morfologiya i anatomiya vysshikh rasteniy [Botany. Morphology and anatomy of higher plants]. 4th ed. extra. Moscow: Knizhnyy dom «LIBROKOM», 2010, 512 p.
8. Pfautsch S., Renard J., Tjoelker M.G., Salih A. Phloem as Capacitor: Radial Transfer of Water into Xylem of Trees Stems Occurs via Symplastic Transport in Ray Parenchyma, *Plant Physiology* March 2015, Vol. 167, No. 3, P. 963-971.
9. Borghetty M., Grace J., Raschi A. Water transport in plant under climatic stress. Cambridge University Press, Cambridge, 1993, 300 p.
10. Harvay B.R. The theory of the rise of sap in trees: Some historical and conceptual remarks, *Physics in Perspective*, 2013, Vol. 15, pp. 320-358.

11. Kipnis I.A., Vernigorov Yu.M. Pod'em vody v ksileme rasteniy s trakheidal'noy provodimost'yu [Water rise in the xylem of plants with tracheidal conductance], *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of DSTU], 2015, No. 2 (81), pp. 117-125.
12. Shein E.V. Kurs fiziki pochv [Soil physics course]. Moscow: MGU, 2005, 432 p.
13. Teoriya i metody fiziki pochv: kollektivnaya monografiya [Theory and methods of soil physics. Collective monograph], under the ed. E.I. Sheina i L.O. Karpachevskogo. Moscow: Grif i K, 2007, 616 p.
14. Vernigorov Yu.M., Kipnis I.A. Matematicheskoe modelirovanie raspredeleniya zhidkosti v vetvyashchikhsya kapillyarnykh sistemakh [Mathematical modeling of fluid distribution in branching capillary systems], *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [ulletin of the Don State Technical University], 2010, Vol. 10, No. 8 (51), pp. 1195-1206.
15. Mekhanizm prodvizheniya vody v kapillyarakh ksilemy rasteniy [Mechanism of promotion of water in the xylem capillaries plants], *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Don State Technical University], 2014, Vol. 14, No. 3 (78), pp. 78-88.
16. Drevesinovedenie i lesnoe tovarovedenie: uchebnyk dlya stud. sred. prof. obrazovaniya [Wood science and forestry commodity: a textbook for stud. environments. prof. education]. 3rd ed., sr. Moscow.: Izd. tsentr «Akademiya», 2010, 272 p.
17. Timonin A.K. Botanika [Botany].:In 4 vol. Vol. 3. Vysshie rasteniya: uchebnyk dlya vuzov [Higher Plants]. Moscow: Izd. tsentr «Akademiya», 2007, 352 p.
18. Vernigorov Yu.M., Kipnis I.A. Kapillyarnaya model' drevesnykh stvolov [Capillary model tree trunks], *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Don State Technical University], 2012, No. 6 (67), pp. 24-40.
19. De Zhen, P.Zh. Smachivanie: statika i dinamika [Wetting: statics and dynamics], *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Successes of physical Sciences], 1987, Vol. 151, Issue 4, pp. 619-681.
20. Kirkolup E.R. Razrabotka ustroystv dlya issledovaniya svoystv zhidkosti v kapillyarnoy gidrodinamike: diss. ... kand. tekhn. nauk [The development of devices to study the properties of liquids in capillary hydrodynamics: cand. of eng. sc. diss.]. Barnaul, 2008, 146 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.П. Бабичев.

Кипнис Иосиф Аншелевич – ООО «Научно – производственная фирма «КАСИОР»»; e-mail: ikipnis@yandex.ru; 119571, Москва, Ленинский проспект, 154; тел.: 89165205843; зам. генерального директора по научной работе; к.т.н.

Вернигоров Юрий Михайлович – Донской государственный технический университет; e-mail: jvernigorov@dstu.edu.ru; 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1; тел.: 89282291508; д.т.н.; профессор.

Kipnis Iosif Anshelevich – Scientific and production firm "KASIOR" ltd; e-mail: ikipnis@yandex.ru; 154, Leninskiy prospect, Moscow, 119571, Russia; phone: +79165205843; Associate General Director on science; cand. of eng. sc.

Vernigorov Yury Mihailovich – Don State Technical University; e-mail: jvernigorov@dstu.edu.ru; 344000, Rostov-on-Don, Gagarina, 1, Russia; phone: +79282291508; dr. of eng. sc.; professor.