

К.І. ЛУДАНОВ

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”  
(Просп. Перемоги, 37, Київ 03056)

УДК 532.68

**ТРАНСПІРАЦІЙНИЙ МЕХАНІЗМ  
КАПІЛЯРНОГО ТРАНСПОРТУ В КСИЛЕМІ РОСЛИН**

*Стаття присвячена проблемі капілярного транспорту водного розчину мінеральних речовин у ксилемі рослин за рахунок процесу транспірації. На основі аналізу балансу рушійних сил (капілярних сил, сил тяжіння та сил в'язкого тертя) отримано та проінтегровано диференціальне рівняння течії рідини в ксилемі, що складається з капілярів змінного перетину. Отримано профіль вертикального капіляра змінного перетину для максимальних витрат води. На основі отриманої формули для мінімального перетину капіляра і закону Томсона для тиску пари над увігнутим меніском стоми листя отримано вираз для продуктивності адгезійного насосу в залежності від довжини капілярів ксилеми та вологості атмосферного повітря.*

*Ключові слова:* ксилема, транспірація, капілярний транспорт, радіус меніска, стома листя, профіль капіляра, шкала висот.

**1. Вступ**

У даний час людство переходить від етапу використання теплоти згоряння деревини до етапу використання енергії біомаси у формі рідкого автоторного палива (біодизелю). Тому темпи сільськогосподарського виробництва біомаси, наприклад, у вигляді рапса, набувають високої актуальності. Очевидно, що темпи виробництва біомаси в цьому випадку залежать не тільки від добрив, поливу тощо, а й від наявності новітніх, інтенсивних сортів. А для їх виведення необхідно розуміння сутності процесів транспіраційного механізму капілярного транспорту водних розчинів речовин з ґрунту до листя рослин.

Ще тридцять років тому [1] відомий спеціаліст у галузі капілярних явищ А.Д. Зімон написав: “Саме за рахунок капілярного підняття води відбувається живлення рослинного світу”.

Останніми роками проблеми “живлення” рослин та механізми транспорту водних розчинів мінеральних речовин з ґрунту в листя переходять з науково-популярних видань на сторінки наукових журналів. Навіть у провідних наукових журналах світу, таких як “Nature” [2] та “Science” [3] вже з'явилися статті з оцінками параметрів капілярного транспорту в ксилемі рослин. З'явилися також й абсолютно екзотичні гіпотези для пояснення від-

носно високої пропускну здатності ксилеми по відношенню до водних розчинів з ґрунту [4].

**2. Огляд**

У доповіді автора [5] на 14-й Міжнародній науковій конференції “Возобновляемая энергетика XXI века” у вересні 2013 р. (АР Крим) було представлено огляд сучасного стану досліджень щодо проблем транспіраційного механізму капілярного транспорту водного розчину мінеральних речовин у ксилемі рослин.

Зокрема, на основі аналізу опублікованих раніше даних в [5] було сформульовано низку гіпотез, які лягли в основу математичної моделі капілярного транспорту в ксилемі рослин.

**2.1. Гіпотези,  
що прийняті в математичній моделі**

1. Радіус капіляра – величина змінна, вона максимальна у кінчиків кореня, зменшується зі збільшенням відстані його перетину від кореня та мінімальна на поверхні листя (у стомах). Це положення підтверджується тим, що діаметр стовбура дерев також зменшується з висотою його перетину.

2. За нульову відмітку для висоти підйому рідини в капілярах ксилеми в моделі приймається не поверхня землі, а так званий “рівень води у ґрунті” (оскільки вода, яка розташована вище цього рівня, знаходиться у “капілярному” стані, тобто характеризується увігнутим меніском).

3. “Корневий тиск” засновано на явищі осмоса і не є рушійною силою капілярного транспорту розчину речовин в ксилемі. Поверхневий шар корневої системи рослин являє собою мембрану, котра селективно пропускає з ґрунту водний розчин тільки відповідних мінеральних речовин і лише підводить їх до нижнього зрізу капілярів ксилеми.

4. Транспірація або випаровування води з поверхні менісків на верхніх кінцях капілярів ксилеми (тобто зі стоми на листях) відбувається виключно за рахунок теплоти сонячного випромінювання, що поглинається поверхнею листа.

5. Випаровування з поверхні меніска здійснюється в основному з його країв (по периметру) – при цьому край меніска утончується і зменшується крайовий кут змочування  $\theta$ , що призводить до збільшення капілярного тиску, а відповідно, й витрат води через капіляр.

6. Саме транспірація і є рушійною силою, що піднімає мінеральні речовини у вигляді їх водних розчинів з ґрунту від коренів до листа рослин, де вода випаровується, а мінеральні речовини у процесі фотосинтезу перетворюються на органіку.

Крім того, в [5] було проведено попередній аналіз капілярного транспорту в ксилемі, що складається з елементів сталого радіуса.

## 2.2. Молекулярна фізика капілярних явищ [6]

Капілярний тиск  $\Delta p_\sigma$  пов’язаний з середнім радіусом кривизни поверхні меніска  $r_0$  рівнянням Лапласа:

$$\Delta p_\sigma = \frac{2\sigma}{r_0} = \frac{2\sigma \cos \theta}{r},$$

де  $r$  – радіус капіляра, м,  $r = r_0 \cos \theta$ ,  $\theta$  – крайовий кут змочування водою поверхні капілярів, рад.

Перепад тисків  $\Delta p_g$ , що створюється стовпом води в капілярі:

$$\Delta p_g = \rho g h,$$

де  $\rho$  – щільність води, кг/м<sup>3</sup>,  $g$  – прискорення сили тяжіння (9,8 м/с<sup>2</sup>).

Висота  $h$  капілярного підйому рідини в циліндричному каналі за умови  $\Delta p_\sigma = \Delta p_g$  визначається формулою Жюрена:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r}.$$

З врахуванням того, що комплекс  $2\sigma/\rho g$  – це квадрат капілярної сталої  $a^2$  (для води при 20 °С

$a = 3,8$  мм), формулу Жюрена можливо переписати таким чином:

$$h = \frac{a^2 \cos \theta}{r}.$$

Перепад тисків у капілярі  $\Delta p_\mu$  за рахунок сил в’язкого тертя за ламінарної течії визначається законом Гагена–Пуазейля:

$$\Delta p_\mu = \frac{8\mu V h}{\pi r^4},$$

де  $\mu$  – динамічна в’язкість, для води при 20 °С  $\mu = 1,0$  МПа·с,  $V$  – об’ємні витрати води в капілярі, м<sup>3</sup>/с.

## 2.3. Адгезійний підйом води в капілярах з $r = \text{const}$

Якщо умовно прийняти, що радіус капіляра  $r = \text{const}$  (це не характерно для ксилеми), то з балансу тисків  $\Delta p_\sigma = \Delta p_g + \Delta p_\mu$  можна отримати такий вираз:

$$\frac{2\sigma \cos \theta}{r} = \rho g h + \frac{8\mu V h}{\pi r^4}.$$

З отриманого співвідношення можна виразити витрати води в капілярі сталого перетину:

$$V = \frac{\frac{2\pi r^3 \sigma \cos \theta}{h} - \pi \rho g r^4}{8\mu}. \quad (1)$$

Аналіз цього виразу показав, що він має екстремум у випадку  $r = r_{\text{opt}}$ , який можна встановити, прирівнюючи до нуля похідну  $(dV/dr) = 0$ . В результаті дослідження на екстремум  $V(r)$  отримуємо оптимальне значення радіуса

$$r_{\text{opt}} = 1,5 \frac{\sigma \cos \theta}{\rho g h} = 0,75 \frac{a^2 \cos \theta}{h}$$

та величину максимальних витрат води в капілярі:

$$V_{\text{max}} = \frac{27\pi}{2048\nu} \frac{g}{\left(\frac{a^2 \cos \theta}{h_{\text{max}}}\right)^4}. \quad (2)$$

## 3. Постановка задачі

Аналіз аналітичного виразу (2) для об’ємного розходу  $V_{\text{max}}$  показує, що максимальне значення витрат води (а відповідно, й розчинених у ній мінеральних речовин) через окремий капіляр ксилеми – оборотно пропорційний четвертому ступеню його довжини. А це означає, що наприклад,

зменшення довжини капіляра (відповідно і висоти рослини) удвічі – призводить до збільшення максимальних витрат води через капіляр за рахунок транспірації у шістнадцять ( $2^4 = 16$ ) разів!

Саме таким чином виявилось можливим більше ніж на порядок збільшити урожайність посівів пшениці (“пшеничний переворот” [7]) за рахунок зменшення шляхом селекції довжини її стебла при схрещуванні звичайних сортів пшениці з карликовими, причому зі збереженням довжини колосу звичайної пшениці (що було завданням генетиків).

Тому метою даної роботи є математичне моделювання транспіраційного механізму капілярного транспорту в ксилемі та визначення на цій основі продуктивності адгезійного насоса для капіляра змінного радіуса залежно від довжини каналів ксилеми та вологості атмосферного повітря – на основі законів молекулярної фізики капілярних явищ.

## 4. Результати досліджень

### 4.1. Модель підйому води в капілярах змінного перетину

На основі аналізу формули Жюрена можна отримати модель каналу змінного радіуса з граничними характеристиками для висоти підйому меніску в капілярі. Воно має такий вигляд:

$$r = f(h) = \frac{a^2 \cos \theta}{h}.$$

Однак такий канал не зможе здійснювати капілярний транспорт в ксилемі рослини, оскільки його профіль не враховує витрат на в'язке тертя при течії води, тобто він може “робити” тільки в статичі.

Профіль капіляра змінного радіуса, який може подавати воду від нижнього зрізу до верхнього (до стоми листя) за рахунок її поверхневого натягу можна визначити з балансу перепадів тиску між двома перетинами капіляра: від 0 до  $h$  ( $\Delta p_\sigma = \Delta p_g + \Delta p_\mu$ ), звідки при  $r = f(h)$  маємо

$$\frac{2\sigma \cos \theta}{r(h)} = \rho gh - \int_0^h \left( \frac{\partial p}{\partial h} \right)_\mu dh, \quad (3)$$

де похідна під знаком інтеграла  $(\partial p / \partial h)_\mu$  знаходиться з закону Гагена–Пуазейля в диференці-

альній формі:

$$\left( \frac{\partial p}{\partial h} \right)_\mu = - \frac{8\mu V}{\pi r^4}.$$

Почленне диференціювання правої та лівої частин отриманого балансу тисків по змінній  $h$  (тобто по поточній довжині капіляра) приводить до диференціального рівняння:

$$\frac{dr}{dh} = - \frac{\frac{8\mu V}{\pi \rho g} + r^4}{r^2 a^2 \cos \theta}. \quad (4)$$

Розділ змінних та інтегрування диференціального рівняння, що описує ламінарну течію рідини проти сил тяжіння в циліндричному каналі змінного радіуса, дає профіль капіляра у вигляді залежності висоти підйому меніска в ксилемі  $h$  від об'ємних витрат води  $V$  та поточного радіуса капіляра  $r$ :

$$h = \frac{b}{2c\sqrt{2}} \left( \arctg \frac{rc\sqrt{2}}{r^2 - c^2} + \operatorname{arcth} \frac{rc\sqrt{2}}{r^2 + c^2} \right), \quad (5)$$

де  $h$  – відстань від рівня ґрунтових вод у землі до поточного перетину капіляра, м,  $r$  – поточний радіус капіляра, м,  $b$  і  $c$  – комплекси:  $b = a^2 \cdot \cos \theta$ ,  $m^2$ ,  $c^4 = 8V \cdot \nu / (\pi g)$ ,  $m^4$ ,  $\nu = \mu / \rho$ ,  $m^2 / c$ .

Очевидно, що для  $r \rightarrow r_{\min} = c$  маємо  $h \rightarrow h_{\max}$ , при цьому  $\arctg \infty = \frac{\pi}{2}$ , а  $\operatorname{arcth} \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,8814$  [8]. У результаті проведеного аналізу для  $h_{\max}$  можна записати вираз:

$$h_{\max} = \frac{b \left( \frac{\pi}{2} + 0,8814 \right)}{2c\sqrt{2}} \approx 0,867 \frac{b}{c}.$$

А для витрат рідини в капілярі змінного перетину  $V_{\max}$  отримуємо заключний вираз:

$$V_{\max} = \frac{2g}{9\nu} \left( \frac{a^2 \cos \theta}{h_{\max}} \right)^4. \quad (6)$$

Детальний аналіз отриманих виразів  $V_{\max}$  для оптимального капіляра сталого перетину і капіляра змінного перетину показав, що при інших рівних умовах максимальна витрата води в капілярі змінного радіуса буде в 5,36 разів більше, ніж в оптимальному капілярі сталого радіуса. При цьому аналітичний вираз  $V_{\max}$  як для капіляра сталого радіуса, так і капіляра змінного радіуса, не містить верхньої границі довжини капілярів, тобто їх

максимальної величини, а відповідно, і граничної висоти дерев.

Однак широко відомо, що довжина капілярів ксилеми високих дерев обмежена: вона становить близько 150 м (так, наприклад, максимальна висота евкаліпта досягає 120 м і ще близько 30 м становить довжина його коренів). А отримана вище залежність для максимальних витрат води в капілярі не дає граничного значення для мінімального радіуса його верхнього зрізу (радіуса стоми на листі).

#### 4.2. Оцінка мінімального радіуса капілярів у стомі листя

Для розрахунку мінімального радіуса капілярів у стомі листя скористаємося відомим рівнянням Томсона (лорда Кельвіна [9]) для рівноважного тиску пари  $P_s$  над зігнутою поверхнею меніска:

$$P_s = P_\infty \exp\left(-\frac{2\sigma M}{\rho RT r_0}\right), \quad (7)$$

де  $P_\infty$  – рівноважний тиск насиченої пари води для плоскої поверхні при даній температурі. Він росте з температурою і для значень 12 °С і 14 °С дорівнює, відповідно, 1,4 і 1,6 кПа,  $r_0$  – радіус поверхні меніска,  $r_0 = r/\cos\theta$ ,  $r$  – радіус стоми, м;  $\theta$  – крайовий кут змочування водою поверхні капіляра, град;  $\sigma$  – поверхневий натяг води, Н/м;  $\rho$  – щільність води, кг/м<sup>3</sup>;  $M$  – молярна маса води, для H<sub>2</sub>O  $M = 18$  гр/моль;  $T$  – абсолютна температура, К;  $R$  – універсальна газова стала,  $R = 8,3144$  Дж/моль·К.

З цього рівняння можна визначити радіус стоми:

$$r = \frac{2M\sigma \cos\theta}{\rho RT \ln \frac{P_s}{P_\infty}}. \quad (8)$$

Очевидно, що в процесі транспірації тиск насиченої пари над меніском  $P_s$  повинен бути більше парціального тиску  $P_{\text{парц}}$  водяної пари в повітрі, що є навколо листя. Його величина звичайно задається “відносною вологістю” повітря  $\varphi = P_{\text{парц}}/P_\infty$ .

Крім того, на шляху пари від поверхні меніску до навколишнього повітря має місце перепад  $\Delta P_D$  між тисками  $P_s$  і  $P_{\text{парц}}$ , який визначається в стомі листя  $V_{\text{max}}$  і дифузійним опором  $R_D$  на шляху па-

ри від поверхні меніска до повітря навколо листя:

$$\Delta P_D = R_D V_{\text{max}} \left(\frac{\rho''}{\rho'}\right),$$

де співмножник у дужках дорівнює відношенню щільності пари  $\rho''$  до щільності рідини  $\rho'$ . З цього рівняння можна визначити значення  $P_s$ :

$$P_s = \varphi P_\infty + \Delta P_D. \quad (9)$$

Підставляючи значення  $P_s$  у вираз (8) для радіуса стоми остаточно отримуємо:

$$r_{\min} = \frac{2M\sigma \cos\theta}{\rho RT \ln\left(\varphi + \frac{\Delta P_D}{P_\infty}\right)}. \quad (10)$$

Аналіз отриманого рівняння показує, що мінімальний радіус стоми  $r_{\min}$  буде величиною реальною, тобто більшою за нуль, лише у випадку, коли вираз у круглих дужках менше одиниці, оскільки у цьому випадку логарифм виразу в дужках позитивний.

#### 4.3. Оцінка граничних характеристик ксилеми

Аналіз результатів, отриманих вище для мінімального радіуса капіляра (з формули Жюрена та з формул Томсона), показує, що на цій основі можна знайти остаточно результат цього дослідження – максимальну довжину капілярів ксилеми  $h_{\text{max}}$ .

Отже, із виразу  $h_{\text{max}}$  маємо  $r_{\min} = c = \sqrt[4]{\frac{8V\nu}{\pi g}}$ . Прирівнюючи його до виразу  $r_{\min}$ , отриманого з формули Томсона, та скорочуючи однакові співмножники у результаті перетворень отримуємо

$$h_{\text{max}} = \frac{1}{C} \frac{RT}{Mg} \ln \frac{1}{\varphi + \frac{\Delta P_D}{P_\infty}}, \quad (11)$$

де константа  $C = \sqrt[4]{36\pi} \approx 3,26$ .

Безрозмірний комплекс  $RT/Mg$  міститься в давній відомій “барометричній формулі” (вперше отриманій Лапласом [10]), яка має такий вигляд:

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{Mg}{RT}h\right) = p_0 \exp\left(-\frac{h}{H_{\text{в-ха}}}\right), \quad (12)$$

де  $H_{\text{в-ха}}$  – характерний розмір для атмосфери (по вертикалі), який називається “шкалою висот” ( $H_{\text{в-ха}} = RT/Mg$ ) та служить масштабом для висоти повітряного шару над рівнем моря  $h$ .

Порівняння цих формул показує, що вираз повної довжини капіляра  $h_{\max}$  містить в ролі співмножника “шкалу висот”, яка відрізняється від атмосферної “шкали” значенням абсолютної температури (для атмосфери її приймають 250 К) та молярної маси  $M$  (для повітря  $M = 29$  г/моль). Так, розрахунок “шкали висот” для атмосфери дає значення  $H_{\text{в-ха}} = 7,5$  км. А розрахунок величини “шкали висот” для  $\text{H}_2\text{O}$  ( $M = 18$  г/моль та, наприклад, для  $t = 12$  °С) дає ще більше:  $H_{\text{пар}} = 13,5$  км.

Аналіз формули (11) показав, що максимальна довжина капілярів ксилеми практично не залежить від фізичних властивостей води: щільності, поверхневого натягу та кінематичної в’язкості (крім  $M$ ). З цієї формули можна оцінити максимальну вологість повітря  $\varphi_{\max}$ , яка здатна заблокувати процес транспірації та капілярний транспорт в ксилемі. Потенціюючи праву та ліву частину рівності (11), отримуємо

$$\varphi + \frac{\Delta P_D}{P_\infty} = \exp\left(-C \frac{h}{H_{\text{пар}}}\right). \quad (13)$$

Звідси можна отримати вираз максимальної витрати води в капілярі залежно від вологості атмосферного повітря  $\varphi$ :

$$V_{\max} = \left[ \exp\left(-C \frac{h}{H_{\text{пар}}}\right) - \varphi \right] \frac{\rho' P_\infty}{\rho'' R_D}. \quad (14)$$

А для граничної вологості повітря  $\varphi_{\max}$ , очевидно, маємо  $V \rightarrow 0$ , при цьому дифузійний перепад  $\Delta P_D \rightarrow 0$ , тому тут можна записати:

$$\varphi_{\max} = \exp\left[\left(-C \frac{h}{H_{\text{пар}}}\right)\right]. \quad (15)$$

Для максимальної висоти дерев-велетнів (наприклад, евкаліпта або секвої) з довжиною капілярів  $h_{\max} = 150$  м отримуємо значення:

$$\varphi_{\max} \approx \exp(-0,03623) \approx 96,44\%.$$

Таким чином, очевидно, що навіть велика вологість повітря  $\varphi$  не може заблокувати процес транспірації в ксилемі рослин.

## 5. Висновки

У роботі, що пропонується, сформульована математична модель транспіраційного механізму капілярного транспорту води в ксилемі рослин, для обґрунтування якого було запропоновано низку гіпотез для оцінки рушійних сил течії води як в ґрунті, так і в ксилемі рослин.

У рамках аналізу балансу рушійних сил (капілярних сил, сил тяжіння та сил в’язкого тертя) в статті було отримано диференціальне рівняння течії рідини проти сил тяжіння в капілярі, радіус якого залежить від поточної координати каналу.

Шляхом інтегрування отриманого рівняння було знайдено профіль капіляра змінного перетину, який забезпечує максимальну транспортну здатність по відношенню до водного розчину мінеральних речовин у ксилемі. Виявилось, що вона в 5,36 разів вище, ніж в оптимальному капілярі сталого перетину. Крім того, виявилось, що вираз профілю не містить граничної довжини капілярів ксилеми.

Встановлено, що максимальні витрати води в елементах ксилеми дуже сильно залежать від висоти рослини: він обернено пропорційний четвертому ступеню довжини капіляра. Тому зменшення вдвічі довжини капілярів (наприклад, стовбура рослини або її стебла) підвищує продуктивність адгезійного насоса більш ніж на порядок (в 16 разів).

На основі аналізу виразу для максимальної довжини капіляра  $h_{\max}$ , яке отримано з використанням закону Томсона, встановлено, що довжина елементів ксилеми рослин практично не залежить від фізичних властивостей води, щільності, поверхневого натягу та кінематичної в’язкості (крім молярної маси води  $M$ ).

Також на основі дослідження процесу транспірації зі стоми листя у рамках закону Томсона встановлено, що вологість атмосферного повітря практично не впливає на продуктивність адгезійного насоса та не обмежує максимальну довжину капілярів ксилеми.

Таким чином, в статті доведено, що гранична висота дерев-велетнів практично не лімітується транспіраційним механізмом капілярного транспорту в ксилемі. Вона лімітується, очевидно, абсолютно іншими механізмами, пов’язаними з енергією сонячного випромінювання, що надходить на листя за світловий день, або ж з міцністю конструкції ксилеми (деревини).

1. А.Д. Зимон, *Что такое адгезия?* (Наука, Москва, 1983).
2. W.T. Pockman, J.S. Sperry, and J.W. O’Leary, *Nature* **378**, 715 (1995).

3. N.M. Holbrook, M.J. Burns, and C.V. Field, *Science* **270**, 1193 (1995).
4. Г.С. Ходаков, *Журнал Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева* **51**, 172 (2007).
5. К.И. Луданов, *Исследование транспирационного механизма капиллярного транспорта веществ в ксилеме растений Матеріали 14-тої Міжнародної наукової конференції "Відродження енергетика XXI" АР Крим, м.т. Миколаївка, 16-20 вересня 2013* (2013).
6. Капиллярные явления, *Физическая энциклопедия* (Изд. БСЭ, Москва, 1988).
7. Е.Р. Виленский, В.В. Бойко, *Растение раскрывает свои тайны* (Колос, Москва, 1984).
8. Л.М. Мили-Томсон, Л.Дж. Комри, *Четырехзначные математические таблицы. Пер. с англ. Изд. второе* (Наука, Москва, 1964).
9. Р. Беккер, *Теория теплоты* (Энергия, Москва, 1974).
10. З. Бауэр, *Физика планетных атмосфер* (Мир, Москва, 1976).

Одержано 06.12.13

К.И. Луданов

ТРАНСПИРАЦИОННЫЙ  
МЕХАНИЗМ КАПИЛЛЯРНОГО ТРАНСПОРТА  
В КСИЛЕМЕ РАСТЕНИЙ

## Резюме

Статья посвящена проблеме капиллярного транспорта водного раствора минеральных веществ в ксилеме растений за счет процесса транспирации. На основе анализа баланса движущих сил (капиллярных сил, сил тяжести и сил вязкого трения) получено и проинтегрировано дифферен-

циальное уравнение течения жидкости в ксилеме, которая состоит из капилляров переменного сечения. Получен профиль вертикального капилляра переменного сечения для максимального расхода воды. На основе полученной формулы для минимального сечения капилляра и закона Томсона для давления пара над вогнутым мениском устьиц листьев получено выражение производительности адгезионного насоса в зависимости от длины капилляров ксилемы и влажности атмосферного воздуха.

К.І. Луданов

TRANSPIRATION  
MECHANISM OF CAPILLARY TRANSPORT  
IN THE XYLEM OF PLANTS

## Summary

The capillary transport of the aqueous solution of mineral salts in the xylem of plants owing to the transpiration process has been considered. By analyzing the balance of driving forces (capillary forces, gravity forces, and viscous friction), a differential equation describing the liquid flow in the xylem consisting of capillaries with varying cross-sections is derived and integrated. The profile of a vertical capillary with varying cross-section for the maximum water flow is calculated. On the basis of the formula obtained for the minimum capillary cross-section and the Thomson law for the vapor pressure over the concave meniscus of leaf stoma, an expression is obtained for the dependence of the maximum capillary length on the humidity of the atmospheric air.