

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт фундаментальной биологии и биотехнологии
Кафедра биофизики

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

« _____ » _____ 20 ____ г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Гидравлическая модель изометрической межклеточной поры с
торусом

06.04.01.03 – Биофизика

Руководитель	_____	к.б.н., доцент	И.В. Свидерская
Выпускник	_____		М.В. Камзалаков
Рецензент	_____	д.б.н., профессор	В.Г.Суховольский

Красноярск 2018

Содержание

Введение.....	3
Глава 1 Проведение воды в древесине хвойных.....	5
1.1 Анатомия водопроводящей ткани хвойных.....	5
1.2 Механизм восходящего транспорта воды в древесине.....	9
1.3 Нарушения функционирования системы восходящего транспорта воды в деревьях.....	12
1.4 Строение и функционирование межклеточных пор с торусом	13
1.5 Концепция, основные понятия и определения модельного подхода	14
1.6 Гидравлическая модель межклеточной поры с торусом	17
Глава 2 Материалы и методы.....	22
2.1 Объекты исследования	22
2.2 Приготовление препаратов для микроскопии	23
Глава 3 Результаты и обсуждения	26
3.1 Гидравлическая модель изометрической межклеточной поры с торусом	26
3.2 Верификация гидравлической модели отдельной поры	28
3.3 Модельная оценка гидравлических характеристик отдельных межклеточных пор в ксилеме <i>Pinus sylvestris L.</i> и <i>Larix sibirica L.</i>	31
Выводы	38
Список литературных источников	39

Введение

Важность водопроводящей ткани у фотосинтезирующих организмов связана с тем, что они нуждаются в гораздо большем количестве воды, чем они расходуют в ходе фотосинтеза для создания глюкозы. Большая часть воды (много больше 90%), которая попадает в фотосинтезирующий аппарат, расходуется на транспирацию, обеспечивая диффузию углекислого газа из атмосферы в клетки (Kramer, и др., 1995). Транспирацию называют неизбежным злом или платой за газообмен в устьицах. Скорость диффузия воды из устьиц и диффузия углекислого газа из атмосферы зависит от градиента их давлений. Градиент водных паров остается неизменным на всем протяжении периода эволюции растений (2,3 кПа при 20°C), в то время как градиент давления углекислого газа менялся от 0,5 кПа во время происхождения растений до 0,03 кПа в каменноугольном периоде и в преиндустриальный период (Bernier, 2001). В Силуре на одну молекулу углекислоты тратилось 22 молекулы воды, а в Каменноугольном периоде на одну молекулу углекислоты тратилось уже 390 молекул воды. В настоящее время молярное отношение углекислота-вода составляет 1:200-400. Если бы подъем воды к кроне требовал от дерева прямых затрат энергии, то дерево просто не хватало бы энергетических ресурсов на транспорт воды в необходимом количестве. Растения могут отчасти регулировать эффективность использования воды, регулируя температуру листьев и их фотосинтетическую способность (Lambert, и др., 1998).

Была сформулирована гипотеза, о том, что размеры структурных элементов межклеточных поры у хвойных линейно связаны между собой и радиальным размером просвета трахеид, т.е. люмена.

Целью работы стала разработка модели для количественной оценки зависимости гидравлических характеристик отдельной межклеточной поры от размеров ее структурных элементов и радиального размера люмена.

Для достижения цели необходимо было

1. Установить количественные характеристики зависимости размеров структурных элементов межклеточных пор (диаметров торуса, апертуры, мембраны, отверстий в мембране) между собой и радиальным размером люмена по литературным данным.

2. Модифицировать представленную в литературе математическую модель межклеточной поры с торусом с учетом установленных зависимостей.

3. Верифицировать модель поры, учитывающую зависимость размеров структурных элементов поры между собой и размером люмена.

4. Рассчитать по модифицированной модели зависимость гидравлических характеристик межклеточной поры от ее диаметра и радиального размера люмена

[Изъято 33 страницы]

Выводы

1. Установлено, что размеры структурных элементов межклеточной поры с торусом находятся в тесной линейной зависимости между собой и радиальным размером люмена.
2. Верифицированная модель изометрической поры с торусом позволяет рассчитывать гидравлические характеристики межклеточной поры с торусом по данным о радиальном размере люмена и толщине клеточной стенки.
3. Гидравлическое сопротивление межклеточной поры более чем на 99% определяется ее диаметром, водопроведение межклеточных пор в ранней древесине лимитируется апертурой, в поздней древесине - каналом поры.

Список литературных источников

1. Baas P. Ecological patterns of xylem anatomy [Раздел книги] // On the economy of plant form and function / ред. Givnish T.J.. - Cambridge : Cambridge University Press, 1986.
2. Bohm J. Kapillaritat und Saftsteigen [Журнал] // Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft. - 1893 г.. - 11. - стр. 506-515.
3. Calkin H.W., Gibson A.C. and Nobel P.C. Biophysical model of xylem conductance in tracheids of the fern *Pteris vittata*. [Journal] // Journal of Experimental Botany. - 1986. - 37. - pp. 1054-1064.
4. Calkin H.W., Gibson A.C. and Nobel P.S. Xylem water potentials and hydraulic conductance in eight species of ferns. [Journal] // Canadian Journal of Botany. - 1985. - 63. - pp. 632-637.
5. Carlquist S. Comparative wood anatomy [Book]. - Berlin : Springer, 1988. - p. 436.
6. Carlquist S. Ecological strategies in xylem evolution [Книга]. - Berkeley : University of California Press, 1975.
7. Cochard H. [и др.] Cryo-scanning electron microscopy observation of vessel content during transpiration in walnut petioles. Facts or artifacts? [Журнал] // Plant Physiology. - 2000 г.. - 124. - стр. 1191-1202.
8. Cochard H., Cruiziat P. и Tyree M.T. Use of positive pressures to establish vulnerability curves: further support for the air seeding-hypothesis and implications for pressure-volume analysis [Журнал] // Plant physiology. - 1992 г.. - 100. - стр. 205-209.
9. Crombie D.S., Hipkins M.F. and Milburn J.A. Gas penetration of pit membranes in xylem of *Phododendron* as the cause of acoustically detectable sap cavitation [Journal] // Australian Journal of Plant Physiology. - 1985. - 12. - pp. 445-454.

10. Dagan Z., Weibbaum S. and Pfeffer R. An infinite-series solution for the creeping motion through an orifice of finite length. [Journal] // Journal of Fluid Mechanics. - 1982. - Vol. 115. - pp. 505-523.
11. Davis S.D., Sperry J.S. and Hacke U.G. The relationship between xylem conduit diameter and cavitation caused by freeze-thaw events [Journal] // American Journal of Botany. - 1999. - 86. - pp. 1367-1372.
12. Dixon H. H. and Joly J. On the ascent of sap [Journal] // Philosophical Transaction of the Royal Society of London. - 1895. - 186. - pp. 563-676.
13. Dixon H.H. Transpiration and the Ascent of Sap in Plants [Book]. - London : Macmillan and Co., 1914.
14. Domec J-C., Lachenbruch B. and Meinzer F.C. Bordered pit structure and function determine dpstisl patterns of air-seeding thresholds in xylem of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*; Pinaceae) trees [Journal] // American Journal of Botany . - 2006. - 93 : Vol. 11. - pp. 1588-1600.
15. Domec J-C., Lachenbruch B. and Meinzer F.C. Bordered pit structure and function determine spatial patterns of air-seeding thresholds in xylem of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*; Pinaceae) trees [Journal] // American Journal of Botany . - 2006. - 93 : Vol. 11. - pp. 1588-1600.
16. Gregory S.G. and Petty J.A. Valve action of bordered pits in conifers [Journal] // Journal of Experimental Botany. - 1973. - Vol. 24. - pp. 763-767.
17. Hacke U. G. [et al.] Cavitation fatigue: embolism and refilling cycles can weaken the cavitation resistance of xylem. [Journal] // Plant Physiology. - 2001. - 125. - pp. 779-786.
18. Hacke U. G. [et al.] Scaling of angiosperm xylem structure with safety and efficiency [Journal] // Tree Physiology. - 2006. - Vol. 26. - pp. 689-701.
19. Hacke U. G. and Sperry J. S. Functional and ecological xylem anatomy. [Journal] // Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics. - 2001. - 4 : Vol. 2. - pp. 97-115.

20. Hacke U. G., Sperry J. S. and Pittermann J. Analysis of circular bordered pit function II. Gymnosperm tracheids with torus-margo pit membranes [Journal] // American Journal of Botany. - 2004. - Vol. 91. - pp. 386-400.
21. Hacke U.G. and Jansen S. Embolism resistance of three boreal conifer species varies with pit structure. [Journal] // New Phytologist. - 2009. - Vol. 182. - pp. 675-686.
22. Hacke U.G. and Sauter J.J. Xylem dysfunctions during winter and recovery of hydraulic conductivity in diffuse -porous and ring-porous species [Journal] // Oecologia. - 1996. - 105. - pp. 435-439.
23. Hacke U.G., Sperry J. and Pittermann J. Analysis of circular bordered pit functions II. Gymnosperm tracheids with torus-margo pit membranes [Journal] // American Journal of Botany. - 2004. - 91 : Vol. 3. - pp. 386-400.
24. Hacke U.G., Sperry J.S. and Pockmann W.T. Trends in wood density and structure are linked to prevention of xylem implosion by negative pressure [Journal] // Oecologia. - 2001. - Vol. 126. - pp. 457-461.
25. Hammel H.T. Freezing of xylem sap without cavitation [Журнал] // Plant physiology. - 1967 г.. - 42. - стр. 55-66.
26. Jane F.W., Wilson K. and White D.J.B. The structure of wood [Book]. - London : Adam and Charles Black, 1970.
27. Jarbeau J.A., Ewers F.W. and Davis S.D. The mechanism of water-stress-induced embolism in two species of chaparral shrubs [Journal] // Plant, Cell and Environment. - 1995. - 18. - pp. 189-196.
28. Kramer P. J. и Boyer J. S. Water relations of Plants and Soils [Книга]. - San Diego : Academic Press, 1995.
29. Lambers H., Chapin T. L. и Pons T. L. Plant physiological ecology [Книга]. - New York : Springer, 1998.
30. Lancashire J.R. and Ennos A.R. Modelling the hydrodynamic resistance of bordered pits. [Journal] // Journal of Experimental Botany. - 2002. - 53. - pp. 1485–1493.

31. Liang C., Filion L. и Cournoyer C. Wood structure of biotically and climatically induced light rings in eastern larch (*Larix laricina*) [Журнал] // Canadian Journal of Forest Research. - 1997 г.. - 27. - стр. 1538-1547.
32. Liese W. and Bauch J. On the closure of bordered pits in conifers [Journal] // Wood Science and Technology. - 1967. - 1. - pp. 1-13.
33. Milburn J. A. Cavitation studies on whole *Risinus* plants by acoustic detection. [Journal] // Planta. - 1973. - 112. - pp. 333-342.
34. Passioura J.B. Water transport in and to roots [Журнал] // Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology. - 1988 г.. - 39. - стр. 245-265.
35. Petty J.A. The aspiration of bordered pits in conifer wood [Journal] // Proceedings of the Royal Society of London, B, Biological Sciences. - 1972. - 181. - pp. 395-406.
36. Pittermann J. [et al.] Inter-tracheid pitting and the hydraulic efficiency of conifer wood: the role of tracheid allometry and cavitation protection. [Journal] = Am.J.Bot. // American Journal of Botany. - 2006б. - 93 : Vol. 9. - pp. 1265-1273.
37. Pittermann J. [et al.] Mechanical reinforcement of tracheids compromise the hydraulic efficiency of conifer xylem [Journal] // Plant, Cell and Environment. - 2006в. - pp. 1618-1628. - DOI: 10.1111/j.1365-3040.2006.01539.x.
38. Pittermann J. [et al.] Torus -margo pits help conifers compete with angiosperms. [Journal] // Science. - 2005. - 310. - p. 1924.
39. Pittermann J. and Sperry J. Tracheid diameter is the key trait determining the extent of freezing-induced embolism in conifers [Journal] // Tree Physiology. - 2003. - Vol. 23. - pp. 907-914.
40. Pittermann J. and Sperry J.S. Analysis of freeze-thaw embolism in conifers. The interaction between cavitation pressure and tracheid size. [Journal] // Plant Physiology. - 2006а. - Vol. 140. - pp. 374-382.
41. Scholander P.F., Hammel H. and Hemmingsen E. Sap pressure in vascular plant [Journal] // Science. - 1965. - Vol. 148. - pp. 339-346.

42. Schulte P.J. and Gibson A.C. Hydraulic conductance and tracheid anatomy in six species of extant seed plants. 66:1073-1079. [Journal] = Can J Bot // Canadian Journal of Botany. - 1988. - Vol. 66. - pp. 1073-1079.
43. Schulte P.J., Gibson A.C. and Nobel P.S. Xylem anatomy and hydraulic conductance of *Psilotum nudum* [Journal] // American Journal of Botany. - 1987. - Vol. 66. - pp. 1438-1445.
44. Siau J.F. Transport processes in wood. [Book]. - Berlin etc. : Springer Verlag, 1984. - p. 356.
45. Smith A.M. Xylem transport and negative pressures sustainable by water [Journal] // Annals of Botany. - 1994. - Vol. 74. - pp. 647-651.
46. Sperry J. S. [et al.] Limitation of plant water use by rhizosphere and xylem conductance: results from a model. [Journal] // Plant, Cell and Environment.. - 1998. - 21. - pp. 347-359.
47. Sperry J. S. [et al.] New evidence for large negative xylem pressure and their measurement by the pressure chamber method. [Journal] // Plant, Cell and Environment. - 1996. - Vol. 19. - pp. 427-436.
48. Sperry J. S. [et al.] Xylem embolism in ring-porous, diffuse-porous, and coniferous trees of northern UTAH and interior Alaska [Journal] // Ecology. - 1994. - 75. - pp. 1736-1752.
49. Sperry J. S. [и др.] New evidence for large negative xylem pressure and their measurement by the pressure chamber method. [Журнал] // Plant, Cell and Environment. - 1996 г.. - Т. 19. - стр. 427-436.
50. Sperry J. S. and Sullivan J.E. M. Xylem embolism in response to freeze-thaw cycles and water-stress in ring-porous, diffuseporousand conifer species. [Journal] // Plant Physiology. - 1992. - Vol. 100. - pp. 605–613.
51. Sperry J. S. and Tyree M. T. Water stress induced xylem cavitation in three species of conifers. [Journal] // Plant, Cell and Environment. - 1990. - 13. - pp. 427-436.

52. Sperry J. S. Limitation of stem water transport and their consequences. [Book Section] // Plant Stems: Physiology and Functional Morphology / ed. B. Gartner. - 1995.
53. Sperry J. S., Donnelly J. R. and Tyree M. T. A method for measuring hydraulic conductivity and embolism in xylem. [Journal] // Plant, Cell and Environment. - 1988. - 11. - pp. 35-40.
54. Sperry J.S. and Hacke U.G. Analysis of circular bordered pit function. I. Angiosperm vessels with homogeneous pit membranes. [Journal] // American Journal of Botany. - 2004. - 91. - pp. 369-385.
55. Sperry J.S. and Robson D.J. Xylem cavitation and freezing in conifers. [Book Section] // Conifer cold hardiness / ed. Bigras F.J. and Colombo S.J.. - Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2001.
56. Sukoff E. Freezing of conifer xylem sap and the cohesion-tension theory [Журнал] // Physiologia Plantarum. - 1969 г.. - Т. 22. - стр. 424-431.
57. Timell T.E. Compression wood in gymnosperm [Book]. - Berlin etc. : Springer Verlag, 1986.
58. Tio K.K. and Sadhal S.S. Boundary conditions for stokes flows near a porous membrane. [Journal] // Applied Scientific Research. - 1994. - Vol. 52. - pp. 1-20.
59. Tyree M. T. and Sperry J. S. The vulnerability of xylem to cavitation and embolism. [Journal] // Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology. - 1989. - 40. - pp. 19-38.
60. Tyree M. T., Davis S. D. and Cochard H. Biophysical perspectives of xylem evolution: is there a tradeoff of hydraulic efficiency for vulnerability to dysfunction? [Journal] // International Association of Wood Anatomist Journal. - 1994. - Vol. 15. - pp. 335-360.
61. Tyree M.T. and Ewers F.W. The hydraulic architecture of trees and other woody plants. [Journal] // New Phytologist. - 1991. - 119. - pp. 345-360.
62. Tyree M.T. and Zimmermann M.H. Xylem Structure and the Ascent of Sap. [Book]. - Berlin etc. : Springer-Verlag, 2002. - p. 139.

63. Tyree Melvin T. The Cohesion-Tension theory of sap ascent: current controversies. [Журнал] // Journal of Experimental Botany. - 1997 г.. - 315 : Т. 48. - стр. 1753-1765.
64. Van Bel A.J.E. Evolution, polymorphology, and multifunctionality of the phloem system [Journal] // Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics. - 1999. - 2. - pp. 163-184.
65. van den Honert T. H. Water transport as a catenary process. [Journal] // Discussion of the Faraday Society. - 1948. - 3. - pp. 146-153.
66. Van den Honert T. H. Water transport as a catenary process. [Журнал] // Discussion of the Faraday Society. - 1948 г.. - 3. - стр. 146-153.
67. Vogel S.J. Life in moving fluids: The physical biology of flow [Book]. - [s.l.] : Princeton University Press, 1994. - p. 269.
68. Zimmermann M.H. [Book Section] // Trees, structure and function / ed. Zimmermann M.H. and Brown C.L.. - 1971.
69. Zobel B. J. and Buijtenen van J. P. Wood variation. Its causes and control. [Book]. - Berlin, Heidelberg : Springer, 1989. - p. 363.
70. Бабубшкина Е.А., Ваганов Е.А. и Силкин П.П. Влияние климатических факторов на клеточную структуру годичных колец хвойных, произрастающих в различных топоэкологических условиях лесостепной зоны Хакасии [Журнал] // Журнал Сибирского федерального университета. Биология 2.. - 2010 г.. - Т. 3. - стр. 159-176.
71. Ваганов Е.А. [и др.] Гистометрический анализ роста древесных растений [Книга] / ред. И.А. Терсков. - Новосибирск : Наука, 1985. - стр. 100.
72. Кедров Г.Б. Факторы, определяющие расположение окаймленных пор на радиальной стенке трахеид во вторичной трахеидной древесине. [Журнал] // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Биологическая серия. - 1984 г.. - 89 : Т. 2. - стр. 70-82.
73. Силкин П.П. Методы многопараметрического анализа структуры годичных колец [Книга]. - Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2010. - стр. 335.

74. Чавчавадзе Е. С. Древесина хвойных. [Книга]. - Ленинград : Наука, 1979. - стр. 190 .

75. Эсау К. Анатомия растений [Книга]. - Москва : Мир, 1969. - стр. 564.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт фундаментальной биологии и биотехнологии
Кафедра биофизики

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой



« 13 » 06 20 18 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Гидравлическая модель изометрической межклеточной поры с
торусом

06.04.01.03 – Биофизика

Руководитель



к.б.н., доцент

И.В. Свидерская

Выпускник



М.В. Камзалаков

Рецензент



д.б.н., профессор

В.Г. Суховольский

Красноярск 2018