

as well as the prospects for research and development strategy for the department.

Keywords: *science, research department, innovation, technical service.*

УДК 539.3

К ВОПРОСУ АКТИВИЗАЦИИ ДАЛЬНЕГО ТРАНСПОРТА ЖИДКОСТИ И ВОЛНООБРАЗОВАНИЙ В ПРОВОДЯЩИХ ПУТЯХ ВЫСШИХ РАСТЕНИЙ

***Д.Г. Войтюк, член-корреспондент НААН
Ю.В. Човнюк, Ю.О. Гуменюк, О.П. Гуцол,
кандидаты технических наук***

Приведено физико-механическое обоснование активации дальнего транспорта жидкостей и волнообразований в проводящих путях высших растений. Течение жидкостей (ксилемного и флоэмного сока) обеспечивается механическими факторами и усиливается под воздействием электромагнитного излучения крайне высокочастотного КВЧ-диапазона (с несущей частотой $f = 60\text{ГГц}$).

Влияние, электромагнитоакустоупругость, излучения, крайне высокочастотный диапазон, жидкости, волнообразования, проводящие пути, высшие растения.

Постанова проблемы. Известно, что дальний транспорт жидкости в высших растениях обеспечивается специальными проводящими путями, которые проходят от корней растений по стеблям и стволам до листьев, цветов, плодов и других органов, обеспечивая доставку воды и питательных веществ из почвы (т.н. ксилемные пути). Продукты фотосинтеза транспортируются от листьев к растущим и запасующим органам по параллельно расположенным флоэмным путям. Течение жидкости (ксилемного и флоэмного сока) обеспечивается следующими механическими факторами: гидростатическим и осмотическим давлением, испарением и секрецией воды, гидродинамическим взаимодействием различных подсистем и органов. Механизмы транспорта жидкостей в растениях окончательно не выяснены и до сих пор составляют предмет экспериментальных и теоретических

© Д.Г. Войтюк, Ю.В. Човнюк, Ю.О. Гуменюк, О.П. Гуцол, 2013

исследований. В частности, активно исследуются волнообразования, сопровождающие дальним транспортом жидкости, электрохимическая сигнализация, концентрационные волны, акустоэлектромагнитные явления и ряд других механических и биофизических процессов. Многие физические явления связаны с особенностями распространения, отражения и рассеивания волн в заполненных жидкостью трубках и пористых материалах и требуют своего дальнейшего детального исследования, а также выявления физических механизмов, лежащих в их основе. Кроме того, актуальной является и систематизация существующих экспериментальных и математических моделей, связанных с волновыми процессами и дальним транспортом жидкости в растениях, а также обоснование акустоэлектромагнитотермовязкоупругой природы процессов, активирующих (стимулирующих) дальний транспорт жидкости и сопутствующие ему волновые процессы в проводящих путях высших растений.

Анализ последних исследований. Роль ксилемных путей в дальнем транспорте жидкости в высших растениях изучена в [1]. Механические факторы, обеспечивающие течение жидкостей (ксилемного и флоемного сока) описаны в [2]. Особенности распространения, отражения и рассеивания волн в заполненных жидкостью трубках и пористых материалах исследованы в [3 - 8].

Результаты указанных выше работ будут использованы в данном исследовании.

Цель исследования состоит в обосновании физических механизмов, лежащих в основе дальнего транспорта жидкости и волнообразований в проводящих путях растений, имеющих акустоэлектромагнитотермовязкоупругую природу.

Результаты исследования. Известные и возможные физические механизмы дальнего транспорта жидкости в высших растениях. Проводящие пути ксилемы, образованные пучками параллельных трубок с диаметром $d \sim (10 \dots 800) 10^{-6} \text{ м}$, расположенными торцом к торцу и имеющими проницаемые стенки, обеспечивают восходящий ток жидкости от корней к верхушке растения. Движущей силой ксилемного транспорта является градиент водного потенциала Ψ (химически потенциал воды) в направлении корень-листья. Водный потенциал определяется [9] молярной концентрацией воды C_w и растворенных в ней веществ C_j , а также гидростатическим давлением p : $\Psi = (C_w, C_j, p)$. Для определения водного потенциала используется соотношение:

$$\Psi = \frac{\mu - \mu_0}{V_w}, \quad (1)$$

где μ, μ_0 – химические потенциалы раствора и чистой воды,

V_w – парциальный молярный объем воды, который для разбавленных растворов, подобных ксилемному соку, при заданной температуре можно положить постоянным $V_w = 18 \text{ см}^3/\text{моль}$.

Для приращения $d\mu$ из термодинамики можно получить [2]:

$$d\mu = (p - \sum_j d\Pi_j - d\Psi_m)V_w, \quad (2)$$

где Π_j – параллельное осмотическое давление, создаваемое, j – й компонентой растворенного вещества,

Ψ_m – матричный потенциал, обусловленный взаимодействием воды с внутренней поверхностью клеточных стенок и капиллярными явлениями. Интегрирование последнего соотношения (2) приводит к следующему выражению для водного потенциала:

$$\Psi = p - \Pi - \Psi_m. \quad (3)$$

Противоположную по знаку величину $F_s = -\Psi$ принято называть сосущей силой растения [9]. При обсуждении возможных движущих сил дальнего транспорта жидкости в разное время рассматривались нагнетающее действие живых клеток, капиллярные силы, атмосферное давление и другие [10]. В корневой системе происходит осмотическое накачивание воды из почвы, в результате чего гидростатическое давление на нижнем конце ксилемных путей повышается. В листьях вследствие испарения жидкости давление и осмотический потенциал снижаются. Таким образом, градиент водного потенциала $\nabla\Psi$ вдоль системы ксилемных сосудов является основной движущей силой дальнего транспорта воды и растворенных в ней минеральных и органических компонент по ксилемным проводящим путям растения. Распределение величины Ψ вдоль стебля ветвей и листьев растения носит сложный характер и определяется балансом воды в растении. Так, распределение осмотического потенциала в ксилемных сосудах и в клетках основной ткани (паренхиме) различно и варьирует в разных междоузлиях [11], что можно зафиксировать по периодическим изменениям диаметра отдельных междоузлий. Поскольку диаметр ксилемных сосудов меньше капиллярной постоянной (высота подъема жидкости в капиллярной трубке, умноженная на радиус трубки) для растительного сока, капиллярные явления играют немаловажную роль в транспорте жидкости у растений, однако, в связи с трудностями в экспериментальных измерениях, часто полагают $\Psi_m = 0$.

Дальний транспорт углеводов – основного компонента роста растений – протекает по флоэме, состоящей из ситовидных трубок – вытянутых проводящих элементов с живым клеточным содержимым, расположенных торцом к торцу и образующих длинные

трубки с пористыми поперечными перегородками – ситовидными пластинками. Флоэмный транспорт идет в направлении от фотосинтезирующих листов к растущим листьям, цветкам, плодам и корням растения. По мере продвижения жидкости происходит обмен аминокислотами и азотистыми соединениями между ксилемными и флоэмными проводящими элементами [12]. Движущие силы флоэмного транспорта до конца не исследованы. В качестве возможного механизма была предложена гипотеза, связанная с наличием градиента концентрации осмотически активных веществ во флоэме, однако вплоть до настоящего времени взаимосвязь гидродинамических и осмотических факторов во флоэмном транспорте является предметом интенсивных исследований, в том числе в рамках моделей механики сплошных сред [13 - 17]. В фотосинтезирующих листьях высокая концентрация углеводов обеспечивает осмотическое накачивание воды в ситовидные трубки. В растущих органах, активно потребляющих углеводороды, которые идут на синтез новых клеточных стенок и рост, низкая концентрация обуславливает малое осмотическое давление. Таким образом, создается градиент гидростатического давления вдоль флоэмных путей, что обеспечивает массоперенос в направлении от источников углеводов к стокам (потребителям). В качестве дополнительных механизмов транспорта жидкости рассматривается электроосмос, перистальтические волны в транспортных микротрубочках ситовидных пластинок, концентрационные волны [13 - 16].

По мере перемещения вдоль проводящего элемента ксилемный и флоэмный соки могут перетекать в радиальном направлении, от одного элемента к другому, через пористые клеточные стенки и от клетки к клетке через специальные поры в клеточных стенках – плазмодесмы. Флоэмный сок может перемещаться вдоль ситовидных трубок в противоположных направлениях, поступая вниз – и нижерасположенные органы в соответствии с динамикой активных конкурирующих источников и стоков углеводов в фотосинтезирующем растении. Соотношение между проводимостью трубок проводящей системы в радиальном L_r и аксиальном L_x направлениях по данным измерений [18] составляет $L_r/L_x \sim 10^{-6}$.

Эффективность дальнего транспорта жидкости определяется гидравлической проводимостью проводящих путей на единицу длины $L_h = Q/|\vec{V}p|$, где Q – объемный расход, $|\vec{V}p|$ – модуль градиента давления. Выражение для скорости течения \vec{V} при этом примет вид [9]:

$$\vec{V} = \frac{L_h}{S} - \vec{\nabla}p + \delta \vec{\nabla}\Pi + \vec{\nabla}\Psi_m \quad (4)$$

где $\delta \in [0, 1]$ – коэффициент отражения, характеризующий проницаемость стенок проводящих путей и тканей для растворенных веществ;

S – площадь поперечного сечения проводящих путей;

$\vec{\nabla}\Psi_m$ – градиент матричного потенциала, обусловленный взаимодействием воды с внутренней поверхностью клеточных стенок и капиллярными явлениями.

Выражение (4) может быть переписано в виде, удобном при решении задач, путем использования соотношения между осмотическим давлением Π концентрацией C осмотически активных веществ с молярной массой M_c (уравнение Вант-Гоффа): $\Pi = RT C/M_c$, где R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура вещества. Матричная компонента движущей силы в силу трудностей в точной ее оценке редко используется при решении конкретных задач и поэтому полагается равной нулю [9] (хотя это некорректно!). При интенсивной транспирации жидкости осмотической компонентой потока пренебрегают по сравнению с гидростатической. Гидравлические соотношения записываются с учетом равенства объемного расхода жидкости, транспортируемой по проводящей системе и испаряемой с полной листовой поверхностью площадью Σ с интенсивностью E : $Q = E\Sigma$, откуда $\delta p = E\Sigma/(L_{in} + L_s)$, где L_s, L_{in} – сопротивление движению водяного пара со стороны слоя воздуха у наружной поверхности листовой пластинки и внутри пластинки, δp – разница давления водяного пара внутри листа (на поверхности межклеточных полостей) и в воздухе [19]. При этом влажность воздуха над испаряющей поверхностью внутри листа зависит от влажности воздуха в приповерхностном слое и окружающей среде и может сильно отличаться от насыщающей влажности [20]. Для решения задач при этом используются данные о скорости транспирации различных растений при разных условиях (освещенность, доступность влаги и др.).

Пространственно-временная эволюция волнообразований, возникающих в растениях, возможные физические механизмы, лежащие в основе таких феноменов.

Волны давления и концентрационные волны в ксилеме, электромагнитные волны во флоэме, акустические волны в тканях растений, акустическая эмиссия схлопывающихся пузырьков при газовой эмболии проводящих путей, - все подобные явления рассматриваются как возможные механизмы коммуникации в растениях. Растения непрерывно подвергаются термодинамическим

воздействиям: освещение и нагрев, ветровая нагрузка, сезонные изменения функциональной активности и массы и др. Растения отвечают на внешние физико-химические стимулы, на излучения электромагнитных волн (различных частотных диапазонов), они способны воспринимать гидростатическое давление, механические напряжения в тканях, гравитацию, волны электромагнито-термовязкоупругого происхождения (физической природы), акустические поля (различных частотных диапазонов).

Гравитационная реакция растений связана с дифференцированным удлинением клеток, а также образованием механических тканей, обеспечивающих устойчивость растения. Помимо общепризнанного механизма гравичувствительности, связанного с оседанием частиц крахмала в цитоплазме клеток (starch-statolith hypothesis), в литературе обсуждается возможная роль индуцированных гравитацией концентрационных волн [21 - 23]. Волновые процессы могут модифицировать перенос гормональных сигналов, которые регулируют рост и развитие растения, обеспечивая тем самым постоянную коммуникацию между его отдаленными органами [24]. Корни растений подвержены влияниям периодических изменений концентрации воды [25, 26], кислорода [27], минерального состава [28] и плотности [29] почвенного раствора. Водный дефицит приводит к быстрым изменениям испарения воды, гидравлической проводимости и роста растения, что связывают с передачей химических сигналов в виде концентрационных волн, распространяющихся от корней к верхушке растения [30 - 32].

Экспериментально был зафиксирован быстрый ксилемный транспорт флуоресцирующего маркера, нанесенного на черешок свежесрезанного листа, к неповрежденным листьям того же растения [33]. Конвективный перенос сигнальных молекул, указывающих на дефицит воды в почве, от корней растений к листьям, изучен достаточно хорошо [34 - 36], но в некоторых растениях гидродинамическая сигнализация предшествует химической [37], причем как у низкорослых растений, так и у деревьев [38], изменение гидравлической проводимости листьев наблюдается через несколько минут после изменения состава почвенного раствора [39], а также после иных внешних воздействий [40 - 43]. Электрические сигналы передаются в растениях в виде потенциала действия, который распространяется в виде одиночной волны или нескольких повторных импульсов, распространяющихся вдоль проводящих путей.

Скорость распространения электрических импульсов у разных растений варьирует от 0,2 м/с до 2 м/с [43, 44]. При надрезе растения

химические компоненты выделяющиеся в месте ранения, обнаруживаются в удаленных органах и тканях, причем в их переносе можно выделить конвективный перенос со скоростью 10 – 15 мм/с и волновой скоростью 300мм/с [31]. Наличие активных механизмов транспорта и регуляции транспирации и насыщения тканей водой на уровне целого растения приводит к появлению нестационарных режимов течения. Непрерывная регистрация величины Ψ при различных экспериментальных условиях показывает наличие коротко- и длинноволновых колебаний [45].

Экспериментально показано, что поглощение корнем воды из почвы и движение ксилемного сока носят автоколебательный характер [46]. Короткопериодические ($T \sim 15 - 80$ мин) колебания параметров водного обмена растения при неизменных внешних условиях обнаружены для многих растений и могут быть объяснены системой обратной связи между фотосинтезом в листьях и корневым дыханием [47]. При изменении осмотического давления раствора зафиксированы связанные с изменением Π быстрые изменения диаметра стеблей погруженных в раствор растений [47]. Реакция растения проявлялась при малых ($\sim 0,01$ м) изменениях концентрации C осмотически активного вещества, увеличивалась с ростом C и опережала биоэлектрическую реакцию, которая проявлялась только при $C \sim 0,3 - 0,5$ м. Волна, связанная с изменением диаметра стебля, распространялась со скоростью $V \sim 10^{-1} - 1$ м/с, значительно превышающей скорость движения жидкости $\sim 10^{-4}$ м/с, поэтому в качестве возможного механизма столь быстрой реакции рассматривалось распространение волн в системе, состоящей из заполненного жидкостью пористого каркаса проводящих путей растения [48].

Гидродинамические явления, связанные с распространением волн по проводящим путям и связанным с ними пористым каркасом основной ткани растений, остаются практически не исследованными к настоящему времени. Вместе с тем, многие экспериментаторы предлагают те или иные гидродинамические явления для объяснения наблюдавшихся феноменов, связанных, например, с восстановлением проводимости ксилемы после газовой эмболии путем вытеснения воздушного пузырька в смежные с проводящими путями области [49, 50]. Схлопывание пузырьков приводит к появления акустических волн, распространяющихся по проводящей системе растения. В частности, при замораживании срезанного растения или его частей можно зафиксировать появление акустической эмиссии, интенсивность которой возрастает при

увеличении насыщенности образца водой и появляется при $t^{\circ}\text{C} = -14,5 - -4,5^{\circ}\text{C}$ [51 - 53].

Поскольку эмболизация сосудов может быть создана искусственно на заданном участке проводящей системы [54], параметры эмиссии могут использоваться для определения характеристик материала (древесины) после решения соответствующей обратной задачи [51, 52].

Акустическая эмиссия сопровождает также эмболизацию проводящих путей при резкой дегидратации растительных материалов [55]. При этом величина водного потенциала, вызывавшего кавитацию газовых пузырьков ксилемных путях листа растений составила $\Psi = -0,94 \pm 0,09 \text{ МПа}$, что отличалось по резкому увеличению интенсивности I_a акустической эмиссии (с выходом кривой $I_a(\Psi)$ на насыщение при $\Psi \sim -(1,4 - 1,6) \text{ МПа}$).

Исследование подобных вопросов крайне актуально, поскольку задача об определении параметров древесины, важных для ее промышленной заготовки, без предварительного повреждения растения (неинвазивные методы), в настоящее время однозначно не решена. При этом полезную информацию можно было бы получить на основании исследования характеристик распространения акустических волн по стволу (стеблю) растения. Аналогичные неразрушающие методы (ультразвуковая дефектоскопия) широко используются в медицине для исследования структуры костей и диагностики, причем основаны они на моделях механики сплошных сред, где кости рассматривается как твердый пористый материал, насыщенный жидкостью [56]. Известен также и обратный феномен – возникновение акустических колебаний в ответ на механическое нагружение кости [57]. Поскольку древесина также относится к классу пористых водонасыщенных твердых биологических материалов, имеет смысл рассмотреть аналогичные феномены, связанные с распространением волн в материале и проводящей системе. С точки зрения механики растительные материалы представляют собой двухфазные сплошные среды, состоящие из упругодеформируемого пористого каркаса клеточных стенок и заполняющей поры каркаса несжимаемой вязкой жидкости [58, 59]. Наличие проводящих элементов, ориентированных продольно (в корнях растений), продольно и радиально (в стволах и побегах) или образующих сложные разветвленные водопроводящие системы (в листьях и стеблях) [16, 59 - 62] обуславливает определенный тип анизотропии материала, который может быть выявлен путем измерения акустических параметров материала.

Известно, что под действием сильной ветровой нагрузки происходит закручивание стволов и ветвей деревьев, растущих в открытой местности, и вместо продольных образуются спирально закрученные проводящие элементы (spiral grooves), которые определяют винтовую анизотропию [63]. Древесина таких растений непригодна для промышленного использования и наличие такого типа анизотропии может быть выявлено с помощью акустических методов.

Регистрация параметров отраженных и поглощенных растительным материалом акустических волн позволяет выявить наличие личинок [64] и уровень деградации материала [65]. Живущие на растениях организмы используют акустические сигналы для коммуникации, и при исследовании этих явлений также возникают задачи о распространении специфических акустических сигналов в водонасыщенных пористых материалах [66]. Исследование волновых явлений, возникающих при циклически меняющемся внешнем давлении, приложенной к корневой системе растения в камере давления (т.н. воздушная бомба), позволит предложить новые методики определения структуры и функций растительных тканей [67].

Для исследования гидравлической сигнализации и волновых явлений в растениях предложены различные математические модели.

Математические модели движения жидкости в растениях.

Наиболее простые модели движения жидкости в стеблях и стволах растений связаны с одномерным движением вязкой несжимаемой жидкости по последовательной системе камер (трубок) с различными гидравлическими сопротивлениями $Z = Z_1 + iZ_2$, где Z_1 и Z_2 характеристики трубок, описывающие их сопротивление течению жидкости и способность накапливать транспортируемую жидкость за счет радиального притока-оттока ($i^2 = -1$). Подобные гидродинамические модели используются для описания движения ксилемного сока по вытянутым неразветвленным проводящим путям корней и стеблей растений [68].

Для обработки результатов измерений гидравлических характеристик стволов, веток, стеблей, корней, черешков и цельных листовых пластинок, используется представление о стационарном течении жидкости и формула Пуазейля в виде:

$$Q = |\vec{\nabla}p|L_h, L_h = \frac{\pi R^4}{8\eta L} \quad (5)$$

где R и L – радиус и длина проводящего элемента, рассматриваемого как цилиндр кругового сечения, $\eta \sim 1,01 \text{ сПа}$ – вязкость растительного сока ($1 \text{ сПа} = 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$). Гидравлическая проводимость проводящих путей, рассчитанная по этой формуле, согласуется с результатами многочисленных измерений [69]. Для одиночной трубки наличие пористых поперечных пластинок в ксилеме и ситовидных полей во флоэме может быть учтено путем использования в формуле Пуазейля вместо L_h величины $L_h^j = L_h/\varepsilon$, причем для флоэмной трубки $\varepsilon = 24$ [13], для ксилемы лиан $\varepsilon = 2,04$ [69]. В (5) Q – секундный расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$.

В простейших гидродинамических моделях ксилема растения часто рассматривается в виде вертикальной трубки кругового сечения с непроницаемыми стенками (рис.1). Система уравнений, описывающая стационарное движение жидкости в связанной с трубкой цилиндрической системе координат, имеет вид:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial p}{\partial r} = 0; \quad -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} - \rho g = 0, \quad (6)$$

где ρ, g – плотность жидкости и ускорение свободного падения;

η – динамическая вязкость жидкости;

V_x – скорость вдоль оси Ox течения жидкости;

p – давление.

Граничные условия суть:

$$V_x|_{r=R} = 0, \quad 2\pi \int_0^R V_x r dr = Q, \quad p|_{x=0} = p^+, \quad p|_{x=L} = p^-, \quad (7)$$

где p^\pm – давление на нижнем и верхнем концах трубки, которые можно считать постоянными при заданных внешних условиях, а можно связать с дополнительными параметрами, описывающими стационарный поток жидкости на границах почва-корень и лист-воздух.

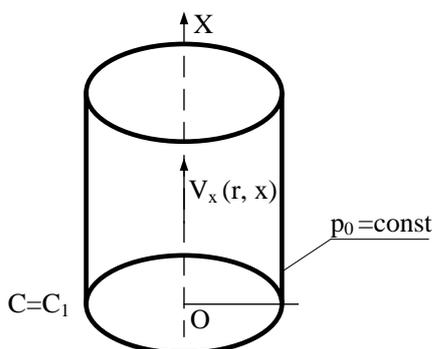


Рис. 1. Проводящий элемент, окруженный растительным материалом.

Замкнутая система уравнений модели осевого течения растительного сока по цилиндрической флоэмной трубке представлена уравнением баланса массы и импульсов:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_x}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} \right) \end{cases} \quad (8)$$

и уравнением диффузии для растворенной компоненты с концентрацией C :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (V_x C) = D_c \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (9)$$

где D_c – коэффициент диффузии растворенного вещества в жидкости (растительном соке).

Для замыкания системы (8) – (9) используется представление о динамическом равновесии между гидростатическим P и осмотическим Π давлением в трубке и гидростатическим давлением p_0 в окружающих тканях (рис. 2):

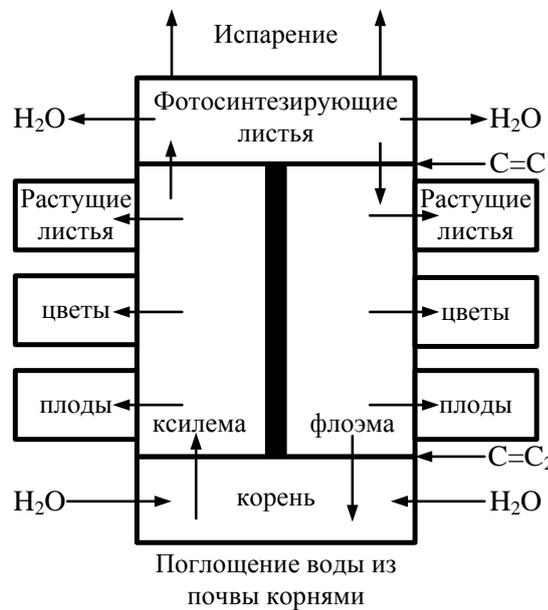


Рис. 2. Схема дальнего транспорта жидкости в растении.

$$p = \Pi + p_0 \quad (10)$$

а также уравнением Вант-Гоффа для осмотического давления в разбавленном растворе:

$$\Pi = \frac{\tilde{R}T}{M_c} C, \quad (11)$$

где M_c – молярная масса углеводов;

\tilde{R} – универсальная газовая постоянная;

T – температура ($^{\circ}K$).

На базе приведенной модели исследовалось стационарное течение флоэмного сока для случая $R/L \ll 1$, $V_x = V_x(t, r)$ [13] и распространение малых возмущений [15] как возможный механизм быстрой коммуникации и передаче информации в растениях [70].

Численные расчеты по (8) – (11) с использованием параметров, характерных для растительных тканей, показывают, что скорость распространения возмущений лежит в диапазоне (20 - 60)м/с, что согласуется с данными экспериментальных измерений [46 - 48].

Осреднение уравнений (8) – (11) по координате приводит к нульмерной модели, интегрирование уравнений которой позволяет получить соотношения между давлением, объемным расходом и концентраций осмотически активных веществ в различные моменты времени.

Для осесимметричного движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрическом проводящем элементе обобщение системы (8) – (11) имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial V_x}{\partial x} = -q \quad (12)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} (V_r C) + \frac{\partial}{\partial x} (V_x C) = \left[\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} \right] D_r + D_x \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} \quad (13)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_x \frac{\partial V_r}{\partial x} = -\frac{RT}{\rho M_c} \frac{\partial c}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial x^2} \right) \quad (14)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_x}{\partial r} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} = -\frac{RT}{\rho M_c} \frac{\partial c}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_x}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} \right) \quad (15)$$

где q – скорость оттока жидкости в окружающие проводящий элемент ткани;

D_r, D_x – коэффициенты диффузии в радиальном направлении и в направлении оси Ox , соответственно;

ν – кинематическая вязкость жидкости.

Для исследования транспорта жидкости в целом растении модель (12) – (15) является более реалистичной, поскольку по мере продвижения жидкости по проводящей системе часть ее оттекает через проницаемую стенку проводящих элементов в окружающие пористые ткани, где она поглощается растущими клетками и испаряется в окружающую среду (рис. 2). Одна из вариаций модели (12) – (15), связанная с заменой (14), (15) уравнениями фильтрации жидкости в пористом растительном материале, была исследована в [71].

Общая трехмерная постановка связанной задачи о движении жидкости по трубкам с пористыми стенками и дальнейшей ее фильтрации в окружающем трубку пористом материале была предложена в [72]. При этом произвольный объем материала можно представить как совокупности взаимосвязанных микроциркуляторных ячеек образованных отдельным проводящим элементом и окружающим его объемом пористого материала, в котором транспорт жидкости и растворенных компонент обеспечивается этим проводящим элементом.

Для определенности выбираем декартовую систему координат (x, y, z) и считаем, что проводящий элемент и пористый материал занимают области:

$$V_1 = \{x \in [0, L], y \in [-a, a], z \in [-h, h]\} \text{ и}$$

$$V_2 = \{x \in [0, L], y \in [-H, -a[U]a, H], z \in [-h, h]\}$$

Математическая модель включает уравнения неразрывности, закон Дарси и уравнения диффузии для концентраций C и b растворенного вещества в областях V_1 и V_2 , соответственно:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0, \quad U = -\frac{K_x \partial p}{\mu \partial x}, \quad V = -\frac{K_y \partial p}{\mu \partial y}, \end{array} \right. \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(CU) + \frac{\partial}{\partial y}(CV) + \frac{\partial}{\partial z}(CW) = D_c \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \end{array} \right. \quad (17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad u = -\frac{k_x}{\mu} \left(\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x} - \zeta \frac{\partial \pi}{\partial x} \right), \quad v = -\frac{k_y}{\mu} \left(\frac{\partial \tilde{p}}{\partial y} - \zeta \frac{\partial \pi}{\partial y} \right) \end{array} \right. \quad (18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial b}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(bu) + \frac{\partial}{\partial y}(bv) + \frac{\partial}{\partial z}(bw) = D_b \left(\frac{\partial^2 b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 b}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 b}{\partial z^2} \right) \end{array} \right. \quad (19)$$

где (U, V, W) и (u, v, w) – компоненты скорости движения воды;

p, \tilde{p} – гидростатические давления;

(K_x, K_y, K_z) и (k_x, k_y, k_z) – проницаемость в направлении соответствующий оси координат для областей V_1 и V_2 ;

π – осмотическое давление в области 2;

$D_{b,c}$ – коэффициент диффузии растворенного вещества в средах;

q_b – скорость поглощения растворенного вещества клетками;

ζ – коэффициент избирательности, характеризующий проницаемость для растворенного вещества.

Для проницаемой стенки $\zeta = 0$ и течение жидкости определяется только гидростатическими факторами. Для непроницаемой стенки $\zeta = 1$ и осмотические механизмы значимы наравне с гидродинамическими.

Краевые условия задачи (16) – (19) включают условия непротекания на границах материала, условия непрерывности скорости и давления на границе проводящий элемент-пористый материал, испарение воды с внешней поверхности ячейки, значения концентраций и давлений на входе и выходе из проводящего элемента:

$$\text{Область } V_1: x = 0: C = C^+, p = p^+$$

$$x = L: C = C^-, p = p^-$$

$$z = 0; y = 0: V = 0; W = 0$$

$$y = \pm a: U = 0, W = 0, V = \pm V_f, V_f = \xi_1 (p - \tilde{p} - \zeta_s (\Pi - \pi))$$

$$\begin{aligned}
W &= \varepsilon_{\pm}^{(1)}; \quad t = 0: C = C_0(x, y, z) \\
\text{Область } V_2: x &= 0; L: \frac{\partial b}{\partial x} = 0, \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x} = 0 \\
y = \pm H: \frac{\partial b}{\partial y} &= 0, \frac{\partial \tilde{p}}{\partial y} = 0 \\
z = \pm h: W &= \varepsilon_{\pm}^{(2)}, \frac{\partial b}{\partial z} = 0 \\
t = 0: b &= b_0(x, y, z),
\end{aligned} \tag{21}$$

где V_f - скорость оттока жидкости из области V_f в область V_2 через общую поверхность $y = a$;

$\varepsilon_{\pm}^{(1)}$ и $\varepsilon_{\pm}^{(2)}$ – скорость испарения на поверхностях областей V_1 и V_2 ;

$C_0(x, y, z)$ и $b_0(x, y, z)$ – известные начальные распределения растворенного вещества в областях V_1 и V_2 , соответственно;

C^{\pm} – концентрации в начальном и конечном сечениях проводящего элемента;

ξ_1 – проницаемость стенки проводящего элемента для воды;

ζ_s – коэффициент отражения, соответствующий проницаемости стенки для растворенных веществ;

Π – осмотическое давление в области V_1 .

Зависимости $\varepsilon^{(1)}$, $\varepsilon^{(2)}$, q_b , от своих параметров должны быть заданы на основе соотношений (8) – (11) и эмпирических данных, а также удовлетворять условиям баланса потоков поступающей и испаряемой жидкости, поступающего и поглощенного клетками растворенного вещества:

$$\begin{cases}
\int_{-h}^h dz \int_{-a}^a (U^+ - U^-) dy = \int_{-a}^a dy \int_0^L \varepsilon^{(1)} dx + 2 \int_a^H dy \int_0^L (\varepsilon_+^{(2)} + \varepsilon_-^{(2)}) dx, \\
\int_{-h}^h dz \int_{-a}^a (C^+ U^+ - C^- U^-) dy = 2 \int_{-h}^h dz \int_a^H dy \int_0^L q_b dx,
\end{cases} \tag{22}$$

Путем осреднения (16) – (22) по координатам можно получить последовательно плоскую, одномерную и нульмерную модели. Решение задачи (16) – (22) в разных постановках в применении к транспорту жидкости в листьях растений было исследовано в [72 - 76]. Было показано, что модель (16) – (22) хорошо описывает и качественно, и количественно те особенности транспорта жидкости, которые зафиксированы в экспериментах с растениями, включая распространение волн [1, 2, 9, 46 – 48, 68].

Концепция передачи информации в стеблях и стволах растений, ее электромагнитотермовязкоупругая / акустическая физическая природа (электромагнитные волны мм-диапазона и гиперзвуковые колебания мембран клеток контактно-целевой системы).

Одновременное существование в растении двух независимых систем передачи информации: ксилемной и флоэмной,

отличающихся по структурной организации и скорости распространения возбуждения, допускает возможность отводить или самостоятельные (хотя и взаимосвязанные) роли в обеспечении жизнедеятельности организма растения. Способы передачи информации в растении по контактно-щелевой системе (ксилемный/флоэмный пути) эволюционно наиболее древние. Они существовали в растениях еще на той стадии, когда их жизнедеятельность ограничивалась процессами деления (размножения) связанными с секреторной функцией, поглощением энергии из окружающей среды и всасывание пищи (с водой) [77].

При формировании более сложных многоклеточных структур в борьбе за существование выживали те из них, которые быстрее и оперативнее добывали пищу и побеждали в борьбе с соперниками. Существенно увеличивались объем информации и скорость ее передачи. Что привело в итоге к созданию систем ксилемного и флоэмного путей в наиболее совершенной (современной) их форме. В которых информация передается по пучкам параллельных трубок (ксилемные пути) и ситовидных трубок с пористыми поперечными перегородками (ситовидные пластинки) – флоэмные пути.

Таким образом, мы полагаем, что основная функция контактно-щелевой системы (КЩС) растения имеет соматическую направленность, а именно осуществлять достаточно оперативную передачу информации от корней к кроне (и наоборот), управлять органами и системами растения, которые обеспечивают жизнедеятельность его организма в условиях окружающей среды (дыхание, сенсорные реакции растения на свет), а также управление вегетативными функциями.

Следует заметить, что КЩС не имеет определенной модальности. Однако она способна в относительно короткий срок (например, бамбук) формировать новые клеточные (или клеточно-контактные) группы и увеличивать размеры уже существующих. Это свидетельствует о ее высокой пластичности и динамичности. Проводящие элементы (стенки) трубок, перегородки (ситовидного типа) ксилемных и флоэмных путей являются представителями КЩС. Эти своеобразные «рецепторы» обеспечивают прием и передачу информации в КЩС. Возбуждая поверхностные слои/перегородки этих путей полями различной физической природы (акустическими, электромагнитными, тепловыми), мы тем самым посылаем информацию соответствующему адресату. В этой связи особый интерес представляют акустоэлектромагнитные поля (и вибрации, в т.ч. ультразвукового и гиперзвукового диапазонов). Любая биосистема (в т.ч. растение) обладает свойством проявлять избирательную чувствительность к механическим колебаниям

(указанных диапазонов) и генерировать их в ограниченных диапазонах частот. Поэтому вибрацию акустоэлектромагнитной природы (в ультразвуковом, гиперзвуковом диапазонах) следует рассматривать как наиболее адекватный и, вероятно, специфический способ активации КЦС-передачи информации, тем более, что такая передача сопровождается выделением биологически активных веществ из клеточных структур растения и периодическими изменениями их размеров и форм (в электромагнитном диапазоне таким колебаниям соответствуют волны мм-диапазона с несущей частотой $f = (20 \dots 80) ГГц$), а в акустическом – гиперзвук с длиной волны $\lambda \approx (1,25 \dots 50) нм$ – т.н. «нанотранспорт» в растениях).

На наш взгляд, флорные пути КЦС передачи информации имеют двойственную (первично- и вторичночувствующую природу) их возбуждения в конкретном растении. Именно наличие двух механизмов отражает сущность функционирования рецепторов растения, а именно: 1) первичночувствующих механизм функционирует при надпороговых воздействиях, при этом возбуждается непосредственно поверхностный слой, стенка трубки, перегородка флорного пути, находящиеся в непосредственной близости к источнику воздействия (в т.ч. электромагнитной или акустоэлектромагнитной физической природы), и информация передается с большой скоростью в соответствующие «отделы» организма растения; 2) при вторичночувствующем механизме порог возбуждения значительно ниже (например, меньше $10 мкВт/см^2$) и преобразование воздействия (конкретной физической природы) осуществляется при участии медиатора, причем латентный период соизмерим с временем передачи информации в КЦС растения. Эти наблюдения (размышления) позволяют предложить общность механизма передачи возбуждения в КЦС и в рецепторах различных сенсорных систем организма растения, имеющих вторичночувствующую природу возбуждения. Таким образом, КЦС растения можно рассматривать как функционирующую при надпороговых и слабopороговых воздействиях на растение.

Таким образом, постулируется существование во флорной транспортной системе организма растения двух систем передачи информации, а также избирательная чувствительность его к воздействиям акустоэлектромагнитной природы, способность подобных систем генерировать собственные механические колебания ультразвукового (в ситовидных пластинках) и гиперзвукового (в мембранах отдельных клеток растения) частотного диапазона.

Следует заметить, что подобные свойства характерны и для биологических систем животного мира и человека [78 - 82].

Наличие этих свойств, которые, по-видимому, требуют экспериментального обнаружения в структурно-физиологических характеристиках растений, представляет особый интерес в качестве примера того, как появление новых факторов и сведений позволяет токовать ранее неясные или необъяснимые феномены в будто бы отдаленной области наук.

Появление новых экспериментальных данных о структуре и функциях высокопроницаемых контактных мембран их клеточных структур и свойствах биосистем проявлять избирательную чувствительность и способность генерировать колебания в ограниченном (низко- и высокочастотном) диапазоне частот позволяет – пока в гипотетическом плане – рассматривать механизм повышенной (фотосенсорной) чувствительности и способности внешнего источника электромагнитного поля КВЧ-диапазона (с несущей частотой $f \approx (40 \dots 60) ГГц$) воздействовать на развитие растений (на заболевшие их органы и системы). КЩС растения, а именно к ней, как мы полагаем, адресуется рассматриваемый эффект, представляет собой структурно-организованную (по крайней мере, во флоэмной части транспортной системы растения) цепочку электрически связанных между собой кластеров клеток (клеточных структур), образующих высокопроницаемый «канал протекания» - своеобразный электрический проводник. Уже имеется прямое доказательство электрической связи между цепочками структур, соединенными между собой специализированными высокопроницаемыми контактами [83] – на уровне кластеров клеток. Следовательно, флоэмные пути растений могут и должны обладать свойствами, характерными для электрических проводников, а именно: при протекании электрического тока создавать электромагнитное поле, а при пересечении электромагнитного поля в них возникает ЭДС.

Таким образом, в норме по КЩС растений (флоэмные и ксилемные транспортные пути) постоянно протекает слабый ионный ток. При воздействии на кластеры поверхностных клеток/клеточных структур растений (в частности на их семена) электромагнитным полем, этот ток должен значительно усиливаться в центростремительном направлении к заболевшему органу растения, оказывая тормозящее или возбуждающее влияние, возбуждать механические (резонансные колебания) мембран клеточных структур (кластеров клеток), ситовидных пластинок флоэмных путей (в т. ч. в ультразвуковом и гиперзвуковом

диапазонах частот). Величину тока можно зарегистрировать специальными устройствами методами КВЧ-рефлектометрии.

Следует отметить, что эффективность воздействия определяется сопряжением (синхронизацией) частоты колебаний слабых пороговых значений излучаемых полей акустоэлектромагнитной природы и частотно- избирательной повышенной чувствительностью биосистем (растений), к которым эти колебания адресуются.

Выводы

1. Волновые процессы играют немаловажную роль в физиологии растений, обеспечивая дальний транспорт жидкости на расстояния, сравнимые с размером растения.

2. Волны распространяющиеся вдоль ксилемных и флоэмных проводящих путей растения, заполненных растительным соком, могут служить для коммуникации между различными удаленными органами растения и для переноса информации в виде концентрации волн.

3. Акустические сигналы, генерируемые в растениях при схлопывании кавитационных пузырьков, могут служить источником информации о состоянии проводящих путей растения. Акустические сигналы, создаваемые обитающими на растениях животными и передаваемые через древесину, используются для коммуникации, а исследование закономерностей распространения и поглощения волн в тканях растений позволит понять акустические механизмы коммуникации. Поскольку параметры распространяющихся и поглощенных акустических сигналов зависят от типа анизотропии растительной ткани и степени ее насыщенность водой, то перспективными для практических приложений являются методы неразрушающего акустического контроля структуры и качества древесины.

4. Наиболее перспективным для дальнейших исследований являются подходы (нано-) механики сплошной среды, в рамках которой движение жидкости по крупным проводящим элементам рассматривается как движение жидкости по каналам с проницаемыми стенками, а по мелким проводящим путям – как фильтрация жидкости в пористой, в общем случае анизотропной среде. Поскольку транспорт жидкости в растениях определяется гидравлическими и осмотическими факторами, то в уравнения модели могут входить нелинейные слагаемые, описывающие испарение жидкости и осмотическое давление в концентрированном флоэмном соке, поэтому в таких моделях можно исследовать различные типы нелинейных колебаний давления, скорости течения и концентрации растворенных веществ.

5. Обоснована концепция двойственной природы передачи информации в биосистемах (растениях), а также избирательная чувствительность биосистем растений к воздействиям акустоэлектромагнитной природы и способность кластеров клеток КЦС генерировать собственные механические колебания в ультразвуковом и гиперзвуковом диапазонах частот. Наличие резонансных механических колебаний в гиперзвуковом диапазоне присуще мембранам клеточных структур флоэмных транспортных систем растения (при толщинах мембран $\sim 2 \cdot 10^{-8} \text{ м}$). Нанотранспорт вдоль флоэмных путей растений может быть обусловлен резонансным взаимодействием электропроводящих, контактирующих между собой, кластеров клеток с внешним электромагнитным излучением мм-диапазона длин волн (с несущей частотой $f \approx 20 \dots 60 \text{ ГГц}$) т. н. крайневых высокочастотный (КВЧ-диапазон), вызывающим периодические изменения их (кластеров клеток) размеров и форм (акустические колебания гиперзвукового диапазона), сопровождающиеся выделением в местах контакта биологических активных веществ из кластеров клеток, а также усиливающим постоянно текущие во флоэмных транспортных путях ионные токи.

6. Существует перспектива использования эффекта внешнего облучения растений (их семян, в частности) электромагнитным излучением мм-диапазона волн нетепловой интенсивности с удельной модульностью облучения $< 10 \text{ мкВт/см}^2$ для интенсификации роста растений (стеблей, корней кроны), ускоренного развития семян (уменьшения вегетативного периода развития растения) и собственно лечения заболеваний органов и систем растения нехимическими способами. В последнем случае необходимы глубокие исследования относительно параметров такого электромагнитного излучения (частота, интенсивность, режим облучения (непрерывный / импульсный / дискретный), его длительность и поляризация), позволяющие существенно повысить эффективность таких воздействий.

Список литературы

1. Раздорский В.Ф. Архитектоника растений. / В.Ф. Раздорский. – М.: Советская наука, 1955. – 432 с.
2. Слейчер Р. Водный режим растений. / Р. Слейчер. – М.: Мир, 1970. – 320 с.
3. Селезов И.Т. Моделирование волновых и дифракционных процессов в сплошных средах. / И.Т. Селезов – Киев: Наукова думка, 1989. – 204 с.
4. Гринченко В.Т. Гармонические колебания и волны в упругих телах / В.Т. Гринченко, В.В. Мелешко – Киев: Наукова думка, 1981. – 283 с.

5. Селезов И.Т. Рассеяние волн локальными неоднородностями в сплошных средах. / И.Т. Селезов, В.Г. Кривонос, В.В. Яковлев – Киев: Наукова думка, 1985. – 136 с.
6. Григолюк Э.И. Неклассические теории колебаний стержней пластин и оболочек./ Э.И. Григолюк, И.Т. Селезов. – М.: ВИНТИ, 1973. – 272 с.
7. Селезов И.Т. Распространение импульса давления в цилиндрической оболочке с жидкостью при различных условиях закрепления. / И.Т. Селезов, О.В. Звонарева// Математичні методи та фізико-механічні поля. – 2003. – Т. 46, №2. – С. 62 – 68.
8. Селезов И.Т. Распространение импульса давления в упругой полубесконечной коаксиальной цилиндрической оболочке с жидкостью. / И.Т. Селезов, В.Н. Кузнецов, О.В. Звонарева // Математичні методи та фізико-механічні поля. – 2007. – Т. 50, №2. – С. 113 – 119.
9. Жолкевич В.Н. Водный обмен растений./ В.Н. Жолкевич, Н.А. Гусев, А.В. Капля и др. - М.: Наука, 1989. — 256 с.
10. Greenidge K.N.H. Ascent of Sap./ K.N.H. Greenidge // Annual Review of Plant Physiology. – 1957. - Vol. 8 – P. 237 – 256.
11. Зялалов А.А. Состояние воды и автокорреляционный анализ объемных колебаний стебля по междуузлиям./ А.А. Зялалов// Доклады АН СССР. – 1981. – С. 247 – 251.
12. Gebler A. Bidirectional exchange of amino compounds between phloem and xylem during long-distance transport in Norway spruce trees (*Picea abies* [L.] Karst). / A. Gebler, P. Weber, S. Schneider, H. Rennenberg //J. Experim.Botany. – 2003. - Vol. 54, No. 386. - P. 1389-1397.
13. Henton S.M. Revisiting the Münch pressure-flow hypothesis for long-distance transport of carbohydrates: modelling the dynamics of solute transport inside a semipermeable tube. / S.M. Henton, A.J Greaves, G.J Piller, P.E Minchin. //J. Experim.Botany. – 2002. - Vol. 53, No. 373. - P. 1411-1419.
14. Thompson M.W. Scaling phloem transport: Elasticity and pressure – concentration waves./ M.W. Thompson //J. Theor. Biol. – 2005. - Vol. 236. - P. 229-241.
15. Kizilova N.N. Biophysical mechanisms of long-distance transport of liquids and signaling in high plants./ N.N. Kizilova, L.O. Posdniak// Biophysical Bulletin. – 2005. - №1(15). – P. 99 – 103.
16. Kizilova N.N. Long-distance liquid transport in plants./ N.N. Kizilova // Proc. Estonian Acad. Sci. Ser. Phys. Wath – 2008. - Vol. 57, №3. – P. 179 – 203.
17. Kizilova N.N. Wave propagation in the conducting systems of plants./ N.N. Kizilova //Proceedings of the Sixth plant Biomechanics Conference. Ed.: Bernard Thibaut. – 2009. – P. 148 – 155.
18. Tyree M.T Cavitation Events in *Thuja occidentalis* L. Ultrasonic acoustic emissions from the sapwood can be measured./ M.T. Tyree, M.A. Dixon // Plant Physiology. – 1983. - vol. 72, №4. – P. 1094-1099.
19. Pachepsky L.B. Transpiration rates and leaf boundary layer parameters for peanut analyzed with the two-dimensional model 2d-leaf./ L.B. Pachepsky, R. A. Ferreyra, D. Collino, B. Acock // Biotronics. – 1999. – Vol. 28. – P. 1-12.
20. Егоров В.П. Экспериментальное исследование моделирование взаимосвязи кинетических параметров водообмена листа./ В.П. Егоров, Л.Т. Карпушкин // Физиология растений. – 1990. – Т.37, №6. – С.1104 – 1112.
21. Wagner O.E. Anisotropy of wave velocities in plants: gravitropism./ O.E. Wagner // Physiol. Chem. Phys. Medical NMR. – 1996.- V.28.- P. 173 - 186.

22. *Wagner O.E.* A plant's response to gravity as a wave phenomenon./ *O.E. Wagner* // *J. Gravit. Physiol.*- 1999.- V.6.- P. 17-18.
23. *Wagner O.E.* Plants respond to gravity with gravity related waves. / *O.E. Wagner* // *J. Gravit. Physiol.* - 2007.- V.14.- P. 119-120.
24. *Mouchel C. F.* Novel phytohormones involved in long-range signaling. / *C. F. Mouchel, O. Leyser* // *Current Opinion in Plant Biology.*- 2007.- V. 10.- P. 473-476.
25. *Davies W. J.* Stomatal control by chemical signalling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture./ *W. J. Davies, S. Wilkinson, B. Loveys* // *New Phytologist.*- 2002.- V. 153.-P. 449–460.
26. *Wilkinson. S.* ABA-based chemical signalling: the co-ordination of responses to stress in plants./ *S. Wilkinson, W.J. Davies* // *Plant Cell Environ.* - 2002.- V.25.- P. 195-210.
27. *Drew M. C.* Regulation of K⁺ uptake and transport to the xylem in barley roots; K⁺ distribution determined by electron probe X-ray microanalysis of frozen-hydrated cells./ *M.C. Drew, J. Webb, L.R. Saker* // *J. Exp. Botany.*- 1990.-V.41.- P. 815-825.
28. *Schachtman D.P.* Nutrient sensing and signaling: NPKS./ *D.P. Schachtman, R. Shin* // *Ann. Rev. Plant Biol.*-2007.-V.58.- P. 47-69.
29. *Masle J.* Effects of Soil Strength on the Relation of Water-Use Efficiency and Growth to Carbon Isotope Discrimination in Wheat Seedlings./ *J. Masle, G.D. Farquhar* // *Plant Physiology.*- 1988.-V.86- P. 32-38.
30. *Jones H. G.* Interaction and integration of adaptive responses to water stress: the implications of an unpredictable environment./ *H.G. Jones* // *Adaptation of plants to water and high temperature stress.*- Turner, N.C., Kramer, P.J., Ed.-New York: Wiley, 1980.- P. 353-365.
31. *Malone M.* Wound-induced hydraulic signals and stimulus transmission in *Mimosa pudica* L./ *M. Malone* // *New Phytologist.*- 1994.- V. 128.- P. 49-56.
32. *Schachtman D.P.* Chemical root to shoot signaling under drought. / *D.P. Schachtman, J.Q. Goodger* // *Trends Plant Sci.*-2008.- V. 13.- P. 281-287
33. *Hlavácková V.* Chemical signal as a rapid long-distance information messenger after local wounding of a plant? / *V. Hlavácková, J. Nauš* // *Plant Signal Behav.*- 2007.- V. 2.- P. 103-105.
34. *Crocker J.L.* Stomatal sensitivity of six temperate, deciduous tree species to non-hydraulic root-to-shoot signalling of partial soil drying. / *J.L. Crocker, W.T. Witte, R.M. Augé* // *Journal of Experimental Botany.* - 1998. - V. 49. - P. 761-774.
35. *Stikic R.* Partial root drying: a new technique for growing plants that saves water and improves the quality of fruit. / *R. Stikic, S. Popovic, M. Srdic, D. Savic, Z. Jovanovic, Lj. Prokic, J. Zdravkovic* // *Bulg. J. Plant Physiol.* - 2003. - Special Issue.- P. 164–171.
36. *Telewski F.W.* A unified hypothesis of mechanoperception in plants./ *F.W. Telewski* // *Amer. J. Bot.*- V. 93.- P. 1466–1476.
37. *Christmann A.* A hydraulic signal in root-to-shoot signalling of water shortage. / *A. Christmann, E.W. Weiler, E. Steudle, E. Grill* // *Plant J.*- 2007.- V. 52.- P. 167-74.
38. *Jia W.* Stomatal movements and long-distance signaling in plants./ *W. Jia, J. Zhang* // *Plant Signal Behav.*- 2008.- V. 3.- P. 772-777.
39. *Fuchs E.E.* Hydraulic control of stomatal conductance in Douglas fir and alder seedlings./ *E.E. Fuchs, N.J. Livingston* // *Plant Cell Environment.*- 1996.- V. 19.- P. 1091–1098.

40. Pieterse C.M. Signaling In Plant Resistance Responses: Divergence and Cross-Talk of Defence Path./ C.M. Pieters, A. Schaller, B. Manch-Mani, U. Conrath // Multigenic and Induced Systemic Resistance in Plants .-N.Y.: Springer.-2006.- P. 166-196.
41. Gowing D.J.G. Xylem-transported abscisic acid: the relative importance of its mass and its concentration in the control of stomatal aperture./ D.J.G. Gowing, H.G. Jones, W.J. Davies //Plant Cell Environment.- 1993.- V. 16.- P. 453-459.
42. Suárez-López P. Long-range signalling in plant reproductive development./ P. Suárez-López // Int. Journ. Dev. Biol.- 2005.- V.49.- P. 761-771.
43. Mwesigwa J. Electrochemical signaling in green plants: effects of 2,4-dinitrophenol on variation and action potentials in soybean. / J.Mwesigwa, D.J. Collins, A.G. Volkov // Bioelectrochemistry.- 2000.- V. 51.- P. 201-205.
44. Wagner E. Hydro-Electrochemical Integration of the Higher Plant — Basis for Electrogenic Flower Induction./ E. Wagner, L. Lehner, J. Normann, J. Veit, J. Albrechtová // Communication in Plants. Neuronal Aspects of Plant Life.- Baluška F., Mancuso S., Volkmann D. (eds.) .-Springer, 2006.- P. 369-389.
45. Nardini A. Xylem cavitation in the leaf of *Prunus laurocerasus* and its impact on leaf hydraulics./ A. Nardini, M.T. Tyree, S. Salleo //Plant Physiol.- 2001.- V. 125.- P. 1700-1709.
46. Лазарева Н.П. Об автоколебательном характере нагнетающей деятельности корневой системы *Zea mays* L./ Н.П. Лазарева Т.А. Борисова, В.Н Жолкевич //Доклады АН СССР.- 1986.- Т. 289, № 3.- С. 761-764.
47. Карманов В.Г. Динамика водного обмена высшего растения и её информационная роль. / В.Г. Карманов, О.О. Лялин, Г.Г. Мамулашвили и др. //Физиол. и биох. культур, растений.- 1974.- т. 6, вып.1.- С. 69-75.
48. Карманов В.Г. Механизм автоколебаний водного обмена растений./ Карманов В.Г, Мелещенко С.Н. // Биофизика.- 1982.- Т.27, Вып.1.- С. 144-149.
49. Zwieniecki M.A. Hydraulic properties of individual xylem vessels of *Fraxinus americana*./ M.A. Zwieniecki, P.J. Melcher, N.M. Holbrook //Journal of Experimental Botany.- 2001.- V. 52, №355.- P. 257-264.
50. Zwieniecki M.A. Hydrogel Control of Xylem Hydraulic Resistance in Plants./ M.A. Zwieniecki, P.J. Melcher, N.M. Holbrook // Science .- 2001.- V. 291.- P. 1059-1062.
51. Kikuta S.B. Ultrasound acoustic emissions from dehydrating leaves of deciduous and evergreen trees. / S.B. Kikuta, M.A. Lo Gullo, A. Nardini, H. Richter, S. Salleo // Plant, Cell & Environment.- 1997 .- V. 20.- P. 1381–1390.
52. Kikuta S.B. Ultrasound acoustic emissions from freezing xylem. / S.B. Kikuta, H. Richter //Plant, Cell & Environment.- 2003.- V. 26, №3.- P. 383–388.
53. Kikuta S.B. Ultrasound acoustic emissions from bark samples differing in anatomical characteristics. / S.B. Kikuta // Phytion.- 2003.- V. 43.- P. 161-178.
54. Lo Gullo M.A. Xylem embolization by the pressure collar in *Salix viminalis* L.: sites for embolization and ultrasound acoustic emissions. // M.A. Lo Gullo, S.Zhang, S.B. Kikuta, H. Richter // Plant biosystems.-1997.- V.131.- P. 25-34.
55. Nardini A. Effects of the experimental blockage of the major veins on hydraulics and gas exchange of *Prunus laurocerasus* L. leaves. / A. Nardini, S. Salleo // Journal of Experimental Botany.-2003.- V. 54, №385.- P. 1213-1219.
56. Tissue characterization with ultrasound.- V. 1, 2. Boca Raton, Fla.: CRC Press.-1986.
57. Thomas I.M. Acoustic emission from vertebral bodies. / I. M. Thomas, J.H. Evans // Journal of Materials Science Letters.- 1988.- V. 7.- P. 267-269.

58. Кантор Б.Я. Механика растущего биологического континуума. / Б.Я. Кантор, Н.Н. Кизилова // Доповіді НАН України.- 2003.- №2.- С.56-60.
59. Кизилова Н.Н. Транспортная система и рост листа. / Н.Н. Кизилова //Современные проблемы биомеханики. Механика роста и морфогенеза.- М.: Изд-во Московского университета.- 2000.- Вып.10.- С.379-405.
60. . Kizilova N.N. Construction principles and control over transport systems organization in biological tissues. / N.N. Kizilova // International Conference «Physics and Control» Proceedings. Eds. A.L.Fradkov, A.N.Churilov. St. Petersburg, Russia.- 2003.- V.1.- P. 303-308.
61. Kizilova N.N. Computational approach to optimal transport network construction in biomechanics. / N.N. Kizilova // Lecture Notes in Computer Science. – 2004.- V.3044. – P.476-485.
62. Кизилова Н.Н. Гидравлические свойства ветвящихся трубопроводов с проницаемыми стенками. / Н.Н. Кизилова //Прикладная гидромеханика.- 2003.- т. 5 (77).- С. 28-35.
63. Leelavanichkul S. Why the grain in tree trunks spirals: a mechanical perspective. / S. Leelavanichkul, A. Cherkaev // Structural and Multidisciplinary Optimization.- 2004.- V. 28, № 2-3.- P. 127-135.
64. Mankin R.W. Acoustic System for Insect Detection in Plant Stems: Comparisons of *Cephus cinctus* in Wheat and *Metamasius callizona* in Bromeliads. / R.W. Mankin, D.K. Weaver, M. Grieshop, B. Larson, W.L. Morrill //J. Urban. Entomol.- 2004.- V. 21, No. 4.- P.239-248.
65. Jhang K.-Y Evaluation of material degradation using nonlinear acoustic effect. / K.-Y. Jhang, K.-Ch. Kim // Ultrasonics.- 1999.- V. 37, №1.- P.39-44.
66. Casas J. Dispersive and non-dispersive waves through plants: implications for arthropod vibratory communication. / J. Casas, C. Magal, J. Sueur //Proceedings the Royal Society B.- 2007.- V. 274, № 1613.- P. 1087-1092.
67. Wei C. The transmission of gas pressure to xylem fluid pressure when plants are inside a pressure bomb. / C. Wei, M.T. Tyree, J.P. Bennink // Journal of Experimental Botany.- 2000.- V. 51, №343.- P. 309-316.
68. Анисимов А.В. Оценка скорости аксиального тока воды по симпласту цепи клеток растения из величины коэффициента квазидиффузии. / А.В. Анисимов, А.Г. Егоров // Биофизика.-1992.-Т.37, № 2.-С.335-340.
69. Ewers F.W. Water Transport in the Liana *Bauhinia fassoglensis* (Fabaceae). / F.W. Ewers, J.B. Fisher, Shau-Ting Chiu // Plant Physiology.-1989.- V. 91.- P. 1625-1631.
70. Burdon-Sanderson J. Note on the electrical phenomena which accompany irritation of the leaf of *Dionaea muscipula*. / J. Burdon-Sanderson // Proceedings of the Royal Society (London).- 2007.- V.21.- P. 495-496.
71. Aumann C.A. Modeling Tree Water Flow as an Unsaturated Flow through a Porous Medium. / C.A. Aumann, E.D. Ford // Journal of Theoretical Biology.- 2002.- V. 219. - P. 415-429.
72. Кизилова Н.Н. Фильтрация жидкости в микроциркуляторной ячейке листа растения. Квазиодномерная модель. / Н.Н. Кизилова // Прикл. гидромеханика. – 2005.- Т.7, №2.- С. 33-43.
73. Кизилова Н.Н. Фильтрация жидкости в тканях листа растения: Модель с сосредоточенными параметрами. / Н.Н. Кизилова // Динамич. системы. – 2005. – №19. – С. 37-43.

74. Кізілова Н.М. Рух в'язкої рідини в мікроциркуляторній комірці листків рослин та параметри оптимальної комірки. / Н.М. Кізілова // Вісник Київського університету. Сер. Фізико-математичні науки. - 2003. – №5.- С. 54-59.
75. Кизилова Н.Н. Исследование транспорта жидкости и структуры оптимальной микроциркуляторной ячейки. / Н.Н Кизилова., М.Г. Столкинер // Проблемы бионики. – 2002 .- №57.- С. 103-108.
76. Kizilova N.N. Transport of fluids in plant leaves: movement through the porous media with distributed sources. / N.N. Kizilova // International conference «Physics of liquid matter: modern problems».- Kyiv.- 2001.- P.182.
77. Crick F. Diffusion in Embryogenesis. / F. Crick // Nature.- 1970.- V. 225.- P. 420 – 422.
78. Миркин А.С. Два возможных механизма возбуждения в тельцах Пачини. / А.С. Миркин // Проблемы интерорецепции, регуляция физиологических функций и поведения.— Л.: Наука, 1976.— С. 74—79.
79. Миркин А.С. О возможности двойственной природы возбуждения в механорецепторах — тельцах Пачини. / А.С. Миркин В.Ф. Машанский //Тез. докл. VII Всесоюз. съезда физиологов.— Тбилиси, 1975.— С. 98—99.
80. Винников Я.А. Структурная и цитохимическая организация рецепторных клеток органов чувств в свете эволюции их функции. / Я.А. Винников // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. — 1965.— Т. 1, №1.— С. 67—72.
81. Винников Я.А. Цитологические и молекулярные основы рецепции. / Я.А. Винников — Л.: Наука, 1971. — 298 с.
82. Винников Я.А. Эволюция рецепторов. / Я.А. Винников — Л.: Наука, 1975.— 324 с.
83. Амченкова А.А. Митохондральный электрический кабель. / А.А. Амченкова, Л.Е. Бакеева, В.А. Драгеев, Д.Б. Зоров, В.П. Скулачѳв, Ю.С. Ченцов //Вестник МГУ. Сер. биолог. — 1986. — №3. — С. 3—15.

Приведено фізико-механічне обґрунтування активації дальнього транспорту рідин і хвилеутворення в провідних шляхах вищих рослин. Плин рідин (ксілемного і флоємного соку) забезпечується механічними факторами і посилюється під впливом електромагнітного випромінювання вкрай високо частотного ВВЧ-діапазону (з несучою частотою $f = 60\text{ГГц}$).

Вплив, електромагнітоакустопружність, випромінювання, вкрай високочастотний діапазон, рідини, хвилеутворення, провідні шляхи, вищі рослини.

This paper describes physical-mechanical substantiation on activation of long-distance transport of liquids and process of wave generation in the spending ways of high plants. The flow of liquids (xylem and phloem sap) is provided by mechanical factors and amplified by electromagnetic radiation of ultra-high frequency UHF-band (with carrier frequency $f = 60\text{GHz}$).

Influence, electromagnetic acoustic elasticity, radiation, ultra-high frequency band, liquids, wave generation, spending ways, high plants.