

ВЛИЯНИЕ РАДИУСОВ КВАРЦЕВЫХ КАПИЛЛЯРОВ НА ВЫСОТУ ПОДНЯТИЯ ВОДЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

*Ровенский государственный гуманитарный университет,
ул. Остафова, 31, г. Ровно, UA – 33000, Украина*

**Европейский университет финансов, информационных систем, менеджмента и бизнеса,
ул. Киевская, 64Б, г. Ровно UA – 33028, Украина*

Практически все природные тела и в большинстве своем тела искусственного происхождения пронизаны сетью макро- и микропор, которые являются транспортными каналами для воды в процессах увлажнения и сушки, а также емкостями жидкости в их равновесном состоянии. Часто при существовании и производственном использовании таких тел решающее значение имеет высота поднятия воды, поскольку жизнедеятельность растений и животных, а также физические, химические и технологические свойства тел неживой природы определяются молекулярными взаимодействиями твердой фазы тел с окружающей жидкой и паровоздушной средой, удерживаемой в макро- и микрокапиллярах.

Внешние электрические поля (ЭП), всегда присутствующие как в природе, так и в условиях различных производств, оказывают влияние на молекулярные взаимодействия между твердой, жидкой и парообразной фазами, поскольку эти взаимодействия имеют электромагнитную природу. Термодинамическое равновесие между фазами при равенстве давлений и температур всегда нарушается, если они имеют различные электрохимические потенциалы. Особенно значительное нарушение может произойти, если на влажное тело подействовать внешним неоднородным электрическим полем (НЭП), которое нарушает равномерное распределение свободных и поляризационных зарядов. В этом случае возникающие подеромоторные силы приводят в движение незакрепленную фазу, то есть воду. Еще Тонкс в 1935 г. и Френкель в 1936 г. показали, что на поверхности жидкости в ЭП возникает горб, а при увеличении напряжения между электродами он вытягивается в конус и с его вершины эмитируются капельки жидкости, то есть происходит разрыв поверхности жидкости [1].

Известно, что отдельные цилиндрические капилляры, получаемые искусственно (Н.В. Чураев и др., Институт физической химии РАН), – это простейшая модель макропор реальных капиллярно-пористых тел. В этих телах макропоры являются большими резервуарами, из которых микрокапилляры всасывают воду и подают ее на значительную высоту (почвы, грунты, растения и др.). Но в микрокапиллярах движение воды происходит медленно (скорость ее прямо пропорциональна квадрату радиуса капилляра и обратно пропорциональна длине столбика жидкости). В макрокапиллярах движение жидкости происходит быстро, но высота подъема маленькая вследствие противодействия силы тяжести. Последствие ее действия можно уменьшить за счет пондеромоторных сил НЭП, что подтверждено в [2].

Из теоретических предпосылок [2] следует, что высота поднятия жидкости h_e в макрокапилляре ($r_0 > 1 \cdot 10^{-7}$ м) в условиях противодействия НЭП силе тяжести должна равняться

$$h_e = \frac{2\sigma_{12} \cos \theta}{r_0((\rho_1 - \rho_2)g - f_e)}, \quad (1)$$

где σ_{12} – поверхностное натяжение воды на границе с влажным воздухом; θ – краевой угол смачивания; r_0 – радиус капилляра; ρ_1 – плотность воды; ρ_2 – плотность паровоздушной среды; g – ускорение силы тяжести; f_e – объемная плотность пондеромоторных сил.

Если принять, что диэлектрическая проницаемость воды пропорциональна ее плотности, то классическое выражение для величины f_e имеет следующий вид [3]:

$$f_e = \rho_e E + 0,5 \varepsilon_0 (\varepsilon_1 - 1) \nabla E^2, \quad (2)$$

где ε_0 – электрическая постоянная; ε_1 – диэлектрическая проницаемость воды; E – напряженность ЭП; ρ_e – плотность свободных электрических зарядов. Если воспользоваться формулой Жюрена для высоты поднятия воды h_0 в капилляре при отсутствии ЭП

$$h_0 = \frac{2\sigma_{12} \cos \theta}{r_0(\rho_1 - \rho_2)g} \quad (3)$$

и ввести величину относительной высоты поднятия жидкости h_e/h_0 в НЭП, то получим

$$\frac{h_e}{h_0} = \frac{1}{1 - \frac{(0,5\varepsilon_0(\varepsilon_1 - 1)\nabla E^2 + \rho_e E)}{(\rho_1 - \rho_2)g}}. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что относительная высота поднятия жидкости в макрокапилляре как будто не должна зависеть от его радиуса. Экспериментальные данные [2] противоречат этому утверждению. На рис. 1 в [2] четко прослеживается зависимость h_e/h_0 от r_0 , поскольку кривые зависимости $h_e/h_0(E)$ при разных r_0 капиллярных трубок (КТ) располагаются различным образом.

Как следует из рисунка (кривая $h_e/h_0(r_0)_{E=const}$ [2]), максимальная величина h_e/h_0 при фиксированной величине E наблюдается при $r_0 = 1,9$ мм, то есть при $a_k/2$, где a_k – капиллярная постоянная воды [4]. Кварцевые КТ при впитывании воды располагались вертикально между металлическими электродами: пластина в воде – острие над устьем КТ в воздухе. При r_0 , которое больше либо меньше 1,9 мм, наблюдается стремительное спадание веток кривой $h_e/h_0(r_0)_{E=const}$. Это связано с тем, что с уменьшением r_0 для возникновения и развития искрового разряда (ИР) (величина E выбрана такой, что в КТ с $r_0 = 1,9$ мм существует ИР) необходимо резко увеличивать напряженность E ЭП, поскольку объем зоны ионизации сокращается обратно пропорционально кубу радиуса. При $r_0 < 1,9$ мм возникновение и переход коронного разряда (КР) в ИР в узких КТ осуществляются при намного больших E , чем в КТ с большими r_0 . Если $r_0 \ll 1,9$ мм, КР может вообще не возникать. В таких КТ существенно уменьшается и возможность возникновения ИР даже при $E \gg 16 \cdot 10^6$ В/м. Согласно [5] напряжение пробоя в бетонных образцах толщиной 1 см $U_{np} = 66 - 54lgr_0$ (U_{np} в кВ, r_0 в мкм).

Это согласуется с лавинно-стримерной теорией пробоя газов. Экспериментальные данные, полученные Петером в камере Вильсона, показывают, что максимальный радиус электронной лавины в момент стримерообразования при пробое воздушного промежутка в 1 см находится в пределах 0,07 – 0,13 мм [6].

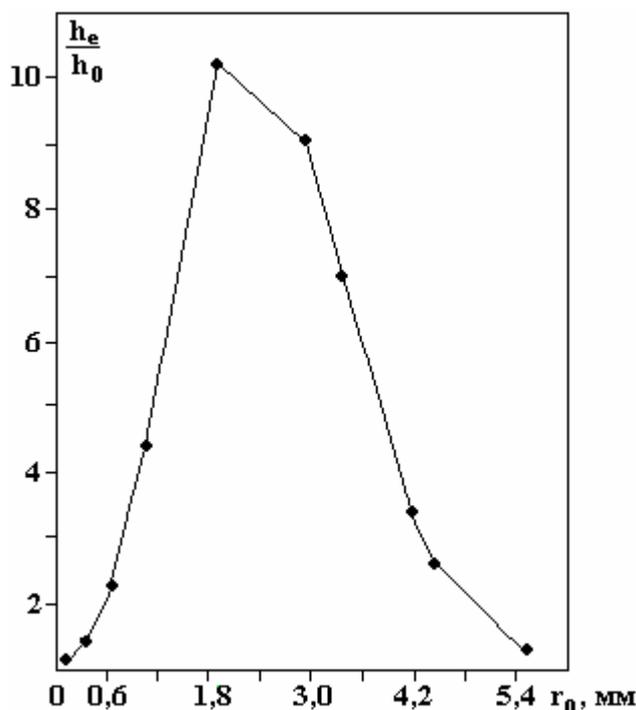
В КТ с $r_0 > 1,9$ мм уменьшение величин $h_e/h_0(r)_{E=const}$, несмотря на благоприятные условия вхождения в их объем силовых линий поля и развития как КР, так и ИР, связано с тем, что чем шире КТ, тем большую массу жидкости необходимо поднимать на каждую единицу высоты. Однако при фиксированных величинах E и ∇E^2 на эту массу действует одна и та же пондеромоторная сила. Поэтому чем большая масса жидкости в трубке, тем на меньшую высоту она поднимается в НЭП. К тому же в широкой КТ в разрядных НЭП, особенно при ИР, осуществляется более глубокая электрофизическая обработка жидкости и вещества трубки. В случае возникновения КР или ИР объемная и пленочная жидкости, которые контактируют с мениском, а также приповерхностные слои стенки трубки насыщаются ионами, одноименными со знаком потенциала электрода, от которого развивается разряд [7]. Уменьшение величин h_e/h_0 также обусловлено коренной сменой (электрофизической модификацией) физических и химических свойств воды и приповерхностного слоя твердой фазы, а с ними и адгезионной способности КТ и воды [8–12]. Это свидетельствует о смене механизма влияния на дополнительный подъем жидкости при значительной напряженности внешнего разрядного ЭП за счет изменения свойств взаимодействующих фаз в широких КТ.

В целом же, для указанных радиусов КТ (см. рисунок) разрядные поля способны существенным образом влиять на поднятие воды. Это происходит благодаря взаимодействию трех фаз и влиянию на них внешнего НЭП, особенно разрядных, которые смещают влажную гетерогенную систему далеко от начального равновесного состояния за счет значительного изменения поверхностных и объемных свойств ее фаз и в первую очередь жидкой фазы.

Подобный электрогидродинамический (ЭГД) Δh_e -эффект (разность высот столбика жидкости в поле и вне его) может быть использован для интенсификации процессов фильтрации воды и пропитки реальных пористых тел жидкими диэлектриками, а также для ускорения осушения влажных тел за счет приближения зоны испарения воды к поверхности пористого тела с последующим диспергированием ее и выбрасыванием заряженных капелек за границы тела без затрат теплоты фазового перехода.

В области разрядных, даже слаботочных ЭП с большой напряженностью поля КР или ИР в формуле Юнга сложным образом изменяются все межфазные поверхностные натяжения [13–19], а поэтому в числителе (1) нужно изменить величины σ_{12} и θ на σ_{12}^e и θ_e . В работе [19] величина Δh_e –

эффекта в ЭП плоского вертикального конденсатора вычислялась по формуле $\Delta h_e = \varepsilon_0(\varepsilon_1 - 1)E^2/2\rho_1g$, которая не учитывает изменений поверхностного натяжения и краевого угла смачивания и других свойств жидкости в разрядных полях.



Зависимость относительной высоты h_e/h_0 поднятия воды ($T = 293$ K) от радиусов r_0 кварцевых КТ при $E = 16 \cdot 10^6$ В/м постоянного ЭП

За счет действия сильных НЭП по длине трубки возникают неоднородные концентрации поляризационных и свободных зарядов, предопределяющие появление дополнительного к внешнему полю внутреннего НЭП, которое также направлено к устью трубки. Это приводит к вытягиванию в том же направлении макроскопической толщины цилиндрической смачивающей пленки.

Под влиянием НЭП по стенкам широкого сосуда, как и в КТ большого радиуса, вода поднимается вверх [20, 21], что объясняется сложным совместным действием пондеромоторных сил НЭП, свободных и связанных зарядов на поверхности разделения жидкости и газа и поляризованной электрической стенки сосуда, а также действием поверхностных сил и силы гравитации. Как известно, без поля высота поднятия жидкости возле вертикальной бесконечной пластинки, которая смачивается жидкостью, определяется формулой [4]:

$$h = \sqrt{\frac{2\sigma_{12}}{\rho_1 g}} (1 - \sin \theta) . \quad (5)$$

Из формулы (1) следует, что при действии НЭП в знаменателе (5) надо взять разность $\rho_1^e g - f_e$. Тогда

$$h_e = \sqrt{\frac{2\sigma_{12}^e}{\rho_1^e g - f_e}} (1 - \sin \theta_e) . \quad (6)$$

Итак, действительно, НЭП, особенно разрядные, могут существенно влиять на высоту поднятия смачивающей жидкости возле стенки сосуда. За счет действия поля выражение для x -й координаты точки, которая находится на искривленной поверхности жидкости [4]:

$$x_e = \sqrt{\frac{\sigma_{12}^e}{\rho_1^e g - f_e}} \left\{ \left[2 \cos \left(45^\circ - \frac{\theta_e}{2} \right) + \ln \operatorname{tg} \frac{90^\circ - \theta_e}{4} \right] - \left[2 \cos \frac{\alpha}{2} + \ln \operatorname{tg} \frac{\theta_e}{4} \right] \right\} , \quad (7)$$

где α_e – угол между касательной в данной точке искривленной поверхности жидкости и горизонтальной плоскостью в ней.

Координата y соответственно будет:

$$y_e = \sqrt{\frac{2\sigma_{12}^e}{\rho_1^e g - f_e}} (1 - \cos \theta_e). \quad (8)$$

Уравнения (7) и (8) являются уравнениями поверхности жидкости возле бесконечной пластинки и представлены в параметрическом виде.

Таким образом, присутствие НЭП ($f_e \neq 0$), особенно больших E и ∇E^2 , может существенным образом изменять не только высоту, но и форму искривленной поверхности жидкости возле стенки сосуда, а это обуславливает вытягивание пленки над мениском, что и приводит к перекачиванию силами ЭП жидкостей [21, 22]. Этому оказывает содействие и продавливание коронным ветром (КВ) мениска по оси широкой КТ, поскольку коронный ветер оказывает давление $\rho_1^e \cdot \bar{v}_{KB}^2 / 2$ [20], где \bar{v}_{KB} – средняя скорость ветра КР. Известно, что вершине деформированного мениска отвечает E_{\max} ЭП [23]. При этом на внутренней поверхности трубки остается цилиндрическая пленка макроскопической толщины, радиуса, естественно, меньшего r_0 . За счет этого увеличивается сила Лапласа и столбик воды поднимается выше, чем в отсутствие поля. Вследствие вытягивания цилиндрической пленки с ростом E и ∇E^2 разрядного поля свободное от жидкости сечение КТ уменьшается, что также приводит к Δh_e -эффекту. Противодействие процессов, которые конкурируют (возросшая сила тяжести, деформация мениска, изменение σ_{12}^e и других величин), приводит к колебаниям столбика жидкости. Этому оказывает содействие также импульсный характер КВ и ИР.

С дальнейшим увеличением E при приближении мениска к устью КТ, а следовательно, и ∇E^2 , а также плотности тока i возникают новые эффекты, в частности диспергирование смачивающей пленки, звуковые и тепловые эффекты. Звук, сопровождающий ИР, оказывает содействие поднятию жидкости согласно механизму [24], а тепловое воздействие высушивает смачивающую пленку и уменьшает поверхностное натяжение, что снижает высоту столбика жидкости.

При $E \approx 1 \cdot 10^7$ В/м в столбике воды появляются парогазовые пузырьки. Это приводит к резкому уменьшению средней плотности водопаровоздушной смеси, а следовательно, согласно (1) к соответствующему росту h_e . В таком неоднородном диэлектрике появляются связанные заряды, плотность которых определяется выражением $\rho_{zg} = \epsilon_0 \vec{E} \nabla \epsilon$. Одноименные заряды на пузырьках вызывают их расширение, и измельченные столбики воды между ними выталкиваются к устью КТ.

При некоторой критической величине заряда q_k на поверхности воды наступает преимущество электрической силы над силами поверхностного натяжения и гравитации. В результате нарушается устойчивость поверхности жидкости, которая визуальнo проявляется в выбрасывании высокодисперсных капелек с поверхности мениска. Они захватываются отраженным от поверхности жидкости КВ [25] и откидываются на стенки КТ на разные, в том числе довольно значительные расстояния от поверхности жидкости. Нарастают новые, еще в большей мере нестационарные процессы, в частности, наблюдаются увеличение частоты и амплитуды колебаний столбика жидкости, а также выбрасывание струек капелек с водных пленок на стенках КТ.

В меру продвижения мениска к устью капилляра КР переходит в ИР, увеличивается плотность тока, а следовательно, и разогревание как смачивающей пленки, так и жидкости основного столбика. Это приводит к возникновению, с одной стороны, продольных и поперечных ∇T , а с другой – ведет к интенсификации движений жидкости, которые обусловлены струйным течением. В столбике жидкости за счет электролиза воды и объемных локальных вскипаний формируются сравнительно большие пузырьки, которые существенным образом уменьшают плотность парожидкостной смеси, а следовательно, согласно (1) увеличивается высота столбика воды (уменьшается ρ_1 , а значит, и разность $(\rho_1 - \rho_2)$). Увеличению Δh_e -эффекта оказывает содействие и эффект Эвершеда, который вызывает относительное движение жидкости и пузырьков, а следовательно, перетекание жидкости в область сильного ЭП.

Повышение уровня воды в КТ под воздействием НЭП подтверждается и тем, что в [26] под металлическим электродом с полированной полусферической поверхностью с $d = 2,7$ мм также наблюдалось поднятие водного электролита в широком сосуде ($r_0 \rightarrow \infty$). При этом поверхность электролита принимала конусообразную форму, а электрический пробой разрядного промежутка осуществляется между электролитным "острием" и металлическим электродом.

Учитывая изложенное выше, а также в [2], вероятно, в формуле (1) для расчета высоты поднятия воды в КТ при действии НЭП в (2) вместо f_e нужно использовать выражение [27]:

$$\begin{aligned}
f_e = & \sigma_e^e \nabla E - 0,5 \varepsilon_0 E^2 \nabla \varepsilon_1 + 0,5 \varepsilon_0 \nabla \left[E^2 \left(\frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \rho_1^e} \right)_T \rho_1^e \right] + \frac{0,5 \varepsilon_0 (\varepsilon_2 E_2^2 - \varepsilon_1 E_1^2)}{h_s} + \rho_e E + \\
& + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 z_i}{\varphi_0 h_e} \int \left(\frac{v}{\sigma_e} \right)^2 \left(\frac{v dr}{\sigma_e} \right) \pm \frac{\Delta p}{\delta_e'} + \frac{\sigma_{12}^e}{2 \varepsilon_0 \varepsilon_1 h_s} + \frac{q^2 \cos^4 \theta_e}{16 \pi^2 \varepsilon_0 \varepsilon_1 r_0^4 h_s} + \\
& + \frac{0,5 \varepsilon_0 \varepsilon_1}{\delta_e'^3} \cdot \frac{l_e U^2}{\left(r_0 - \chi - \frac{\chi}{a'} \right) \ln \left(r_0 / \left(r_0 - \chi - \frac{\chi}{a'} \right) \right)^2} - 0,5 \varepsilon_0 E^2 \left(\frac{\partial \varepsilon_1}{\partial T} \right)_{\rho_1} \nabla T,
\end{aligned} \tag{9}$$

где обозначения величин и физический смысл отдельных членов те же, что и в [27].

В (9) некоторые члены содержат величину радиуса капилляра и поэтому в знаменателе выражения (4) для относительной высоты подъема воды в КТ будут присутствовать величина r_0 и другие специфические параметры, характеризующие изменение физических свойств взаимодействующих в сильных ЭП фаз в условиях протекания разрядных токов и явлений, им сопутствующих. Но ряд параметров нужно определять в условиях конкретных опытов, поскольку они в настоящее время неизвестны. Вследствие этого выражение (9) пока еще нельзя непосредственно использовать для вычислений Δh_e -эффекта, но все же оно качественно указывает на зависимость относительной высоты подъема воды в НЭП от радиуса КТ.

Представленная в данной работе информация по влиянию радиусов отдельных кварцевых КТ на поднятие воды в НЭП может быть применима к описанию влагообмена в реальных пористых телах в условиях действия электрических полей различных пространственных конфигураций и видов газовых разрядов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Френкель Я.И. К теории Тонкса о разрыве поверхности жидкости постоянным электрическим полем в вакууме // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1936. Т. 6. № 4. С. 347–350.
2. Полищук Н.В., Панченко И.М., Панченко М.С., Карпович И.Н. Эффекты воздействия и последствия электрических полей на поднятие воды в макрокапиллярах // Электронная обработка материалов. 2002. № 4. С. 54–67.
3. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1976. 504 с.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Гидродинамика. Т. VI. 3-е изд., перераб. М.: Наука, 1986. 736 с.
5. Бернацкий А.Ф., Целебровский Ю.В., Чунчин В.А. Электрические свойства бетона / Под ред. доктора техн. наук, проф. Ю.Н. Верещагина. М.: Энергия, 1980. 280 с.
6. Ретер Г. Электронные лавины и пробой в газах: Пер. с англ. Под ред. В.С. Комелькова. М.: Мир, 1968. 320 с.
7. Денисов А.А., Нагорный В.С. Электрогидро- и электрогазодинамические устройства автоматики. Л.: Машиностроение, 1979. 288 с.
8. Рогов В.М., Филипчук В.Л. Электрохимическая технология изменения свойств воды. Львов: Выща шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1989. 128 с.
9. Богомолова Л.Д., Жачкин В.А. Парамагнитные центры в ион-имплантированных неорганических стеклах // Физика и химия стекла. 1998. Т. 24. № 1. С. 3–30.
10. Пух В.П., Байкова Л.Г., Иванов-Омский В.И., Звонарева Т.К. Влияние ионной бомбардировки на прочность стекол // Физика и химия стекла. 1998. Т. 24, № 5. С. 648 – 651.
11. Григорьев А.И., Ширяева С.О., Коромыслов В.А. Учет эффекта релаксации электрического заряда в задаче о неустойчивости заряженной поверхности жидкости // Электронная обработка материалов. 1996. № 2–3. С. 37–39.
12. Melcher J.R., Schwarz W.J. Interfacial relaxation overstability in a tangential electric field // Phys. Fluids. 1968. V. 11. N 12. P. 2604–2616.
13. Дубкова В.И., Радцевич С.П., Комаревич В.Г., Котов Д.А. Влияние ионно-лучевой обработки углеродных волокон на краевой угол смачивания эпоксиолигомерами // Инженерно-физический журнал. 2005. Т. 78. № 1. С. 104–108.

14. Коекин В.К. Метод индикации эффекта активации воды // Электронная обработка материалов. 1995. № 1. С. 74–75.
15. Йоффе И.Ф. О влиянии внешних полей на термодинамические свойства растворов и поверхностное натяжение // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1969. Т. 57. Вып. 2(8). С. 529–533.
16. Бродская Е.Н., Русанов А.И. О влиянии произвольно направленного электрического поля на поверхностное натяжение жидкости // Коллоидный журнал. 1983. Т. 45. № 4. С. 636–643.
17. Nicolis G., Prigogine I. Self-organization in Nonequilibrium System. N.Y.: Wiley, 1977. 384 p.
18. Штайнхен А., Санфельд А. Термодинамическая устойчивость заряженных поверхностей: Моногр. / Современная теория капиллярности: К 100-летию теории капиллярности Гиббса; Под. ред. проф. А.И. Русанова (СССР) и проф. Ф.Ч. Гудрича (США). Л.: Химия, 1980. С. 300–316.
19. Копейкина Э.К. Влияние электрического поля на поверхностное натяжение неполярных жидкостей // Электронная обработка материалов. 1970. № 4. С. 57–59.
20. Юрченко Н.Ф., Зигмантас Г.П. Генерация продольных вихрей в пограничном слое при наличии массовых сил // Инженерно-физический журнал. 1989. Т. 57. № 3. С. 392–398.
21. Кравцов А.А., Рачев Л.А. Перекачка слабопроводящих жидкостей силами постоянного электрического и гравитационного полей // Электронная обработка материалов. 1978. № 5. С. 39–34.
22. Middendorf W.H. и др. Жидкие диэлектрики в электрическом поле // Power Appar. and System. 1958. N 38. P. 795–799.
23. Миздряков О.А. Напряженность электростатического поля на поверхности мениска между жидким и газообразным диэлектриками в плоском конденсаторе // Электронная обработка материалов. 1968. № 6. С. 38–40.
24. Кардашев Г.А., Соболев В.Д., Чураев Н.В., Шаталов А.Л. Влияние колебаний на уровень жидкости в капилляре // Коллоидный журнал. 1976. Т. 38. № 3. С. 461–466.
25. Болога М.К., Руденко В.М. Об интенсификации испарения жидкости под воздействием электрического поля // Электронная обработка материалов. 1975. № 3. С. 37–40.
26. Дураджи В.Н. Об электрическом импульсном разряде между металлическим и электролитным электродами // Электронная обработка материалов. 2001. № 3. С. 22–26.
27. Полищук Н.В., Панченко М.С., Панченко И.М. О возможности влияния атмосферного и земного электричества на фильтрацию воды // Электронная обработка материалов. 2007. № 1. С. 57–62.

Поступила 07.02.08

Summary

In quartz macrocapillaries of various radiuses discharges fields with identical intensity differently influence an additional raising of water. It is caused by different change of properties of liquid and firm phases and also power influence of fields.
