

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА СКОРОСТЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ВОДЫ В ШИРОКОМ КАПИЛЛЯРЕ, РАСПОЛОЖЕННЫМ ПОД МАЛЫМ УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ

*Ровенский государственный гуманитарный университет,
ул. Бендеры, 12, UA 33028, г. Ровно, Украина*

**Украинский государственный университет водного хозяйства
и природопользования,
ул. Соборная, 11, UA 33028, г. Ровно, Украина*

Природные и промышленные материалы в основном являются грубодисперсными капиллярно-пористыми телами (КПТ), влагосодержание которых часто достигает больших значений. Для интенсификации производственных и природных массо-теплообменных процессов все чаще используют сильные электрические поля (ЭП). Экспериментальные и аналитические исследования [1, 2] показывают, что при определенных условиях их воздействие на процессы фазовых переходов и движение потоков жидкости и пара приводит к значительным количественным и качественным изменениям в тепловых и гидродинамических явлениях. Прежде всего это происходит за счет развития разнообразных форм электроконвекции, а также сильных гидродинамических возмущений на границах раздела фаз, сопровождающихся формированием электрогидродинамических волн, разрушением границы раздела, что приводит к перестройке структуры и скорости потока.

На транспортные свойства КПТ наряду с другими параметрами пористой структуры (общая пористость, распределение пор, средний диаметр пор, проницаемость) в основном влияет средний диаметр пор. Переносные свойства КПТ оцениваются в конечном итоге по скорости течения и предельной высоте подъема рабочей жидкости. Возможный механизм влияния неоднородного электрического поля (НЭП) на высоту h столбика воды с плотностью ρ , поверхностным натяжением σ и краевым углом смачивания θ в макрокапилляре с таким внутренним радиусом r , при котором необходимо учитывать влияние силы тяжести, то есть выполняется условие $2\sigma\cos\theta/r \leq \rho gh$, рассмотрен в [3]. Ранее в работах [4 – 6] рассмотрены вопросы движения жидкости и пара при впитывании в отдельные, вертикально расположенные цилиндрические капилляры с $r = 7 - 38$ мкм при действии НЭП. Эти макрокапилляры можно отнести к тонким капиллярам, поскольку в них капиллярное давление намного больше гидростатического ($2\sigma\cos\theta/r \gg \rho g l \sin\alpha$). Макрокапилляры с противоположным соотношением капиллярного и гидростатического давлений являются широкими капиллярами или капиллярными трубками.

Согласно [3] объемные и поверхностные электрические силы вносят существенный вклад в высоту подъема жидкости в капиллярных трубках. Понятно, что эти же силы будут влиять и на скорость перемещения жидкости в капилляре, изменяя скорость ее движения. Видимо, наибольшее влияние на кинетику этого процесса электрогидродинамические силы будут оказывать в случае горизонтального расположения макрокапилляра, когда впитывание жидкости происходит перпендикулярно силе тяжести. Стремление максимально увеличить скорость переноса жидкости вынуждает использовать КПТ с возможно более крупными порами. Но при этом значительно возрастает тормозящее действие силы тяжести, если капилляр расположен даже под небольшим углом к горизонту. Наиболее успешно противодействовать ей в крупных порах КПТ может НЭП. Для выяснения механизмов воздействия НЭП на процесс массопереноса в грубодисперсном КПТ целесообразно смоделировать его в виде отдельного широкого капилляра, в котором нельзя пренебрегать гравитационным потенциалом в сравнении с капиллярным потенциалом. Поскольку в реальном КПТ капилляры могут размещаться под любыми углами, необходимо исследовать скорости течения жидкости в них (на- пример, при впитывании жидкости) первоначально при малом угле наклона к горизонту в условиях воздействия НЭП.

В одиночном цилиндрическом капилляре перенос жидкости с гидродинамической точки зрения можно описать известным дифференциальным уравнением А.П. Порхаева [7]

$$\frac{d^2l}{dt^2} + \frac{1}{l} \left(\frac{dl}{dt} \right)^2 + \frac{8\eta}{r^2\rho} \frac{dl}{dt} - \frac{2\sigma \cos \theta}{rpl} + g \sin \alpha = 0, \quad (1)$$

где l – длина столбика жидкости в капилляре; t – время; η – вязкость жидкости; r – радиус капилляра; ρ – плотность жидкости; σ – поверхностное натяжение на границе жидкость – паровоздушная среда; θ – краевой угол смачивания; g – ускорение силы тяжести; α – угол наклона капилляра к горизонту.

Уравнение (1) выведено для случая, когда один конец капилляра погружен в жидкость, и в предположении, что вдали от мениска имеет место параболический закон распределения скоростей. В обычных условиях опытов (квазистационарный режим впитывания) первым и вторым членом уравнения (1) можно пренебречь по сравнению с остальными. Тогда уравнение (1) можно написать [8]:

$$\bar{v} = \frac{dl}{dt} = \frac{r^2\rho}{8\eta} \left(\frac{2\sigma \cos \theta}{rpl} - g \sin \alpha \right), \quad (2)$$

где \bar{v} – средняя линейная скорость движения жидкости в капилляре, расположенном под углом α к горизонту. Линейная зависимость между \bar{v} и l для разных жидкостей подтверждена многочисленными опытами А.П. Порхаева и других исследователей. Из (2) следует, что \bar{v} сильно зависит от угла α , поскольку его синус умножается на довольно значительную величину g . Их произведение (второе слагаемое в скобках выражения (2)) уже при значении угла α в несколько градусов становится величиной одного порядка с первым слагаемым непосредственно после начального этапа (период релаксации к квазистационарному процессу) впитывания [9].

Таким образом, увеличение угла наклона капиллярной трубки к горизонту способно существенно уменьшить скорость движения жидкости в нем за счет возрастания составляющей гравитационного ускорения $g \sin \alpha$.

Если широкий капилляр ориентирован горизонтально, то есть $g \sin \alpha = 0$, полагая $\theta = \text{const}$, после интегрирования (2) получим

$$l = \sqrt{\frac{\sigma r \cos \theta}{2\eta}} \cdot \sqrt{t} \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2) при условии $g \sin \alpha \neq 0$, имеем

$$\bar{v} = \frac{r^2\rho}{8\eta} \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{r^3\rho^2}{8\eta\sigma \cos \theta}}} \frac{1}{\sqrt{t}} - g \sin \alpha \right). \quad (4)$$

Из (4) следует, что скорость впитывания жидкости в капилляр уменьшается обратно пропорционально корню квадратному от времени. Поскольку оба члена в скобках (4) имеют физический смысл ускорений, то для увеличения \bar{v} необходимо компенсировать ускорение силы тяжести за счет ускорений, приобретаемых незаряженной и заряженной жидкостью в доразрядных и разрядных НЭП. Тогда выражение (4) примет вид

$$\bar{v} = \frac{r^2\rho}{8\eta} \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{r^3\rho^2}{8\eta\sigma \cos \theta}}} \frac{1}{\sqrt{t}} - g \sin \alpha + \frac{f}{\rho} \right), \quad (5)$$

где

$$f = 0,5\varepsilon_0(\varepsilon - 1)\nabla E^2 + \rho_e E + \frac{0,5\varepsilon_0(\varepsilon_2 E_2^2 - \varepsilon_1 E_1^2)}{h_s} + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon z}{\varphi_0 h_e} \int \left(\frac{j}{\gamma}\right)^2 \left(\frac{jdr}{\gamma}\right) \mp \frac{\Delta p}{\delta} - \quad (6)$$

плотность сил ЭП [1, 2, 10 – 12]; ε_0 – электрическая постоянная; ε – диэлектрическая постоянная жидкости; ρ_e – величина объемного заряда жидкости; E – напряженность ЭП; ∇E – градиент НЭП; h_s – толщина переходного межфазного слоя; z – валентность ионов; $\varphi_0 = \kappa T/e$ – специфический потенциал опыта, в котором κ – постоянная Больцмана, T – температура, e – заряд электрона; j – вектор плотности электрического тока; h_e – расстояние между электродами; γ – электропроводность электролита; Δp – со знаком минус давление ветра коронного разряда (КР) или плазмы искрового разряда (ИР) в капилляре; δ – расстояние между коронирующим электродом и мениском; в случае знака “плюс” Δp – гидродинамический напор при высоковольтном электроосмосе в цилиндрическом капилляре.

В последнем случае

$$\Delta p = \frac{4\varepsilon_0 \varepsilon \xi U}{d^2}, \quad (7)$$

где ξ – электрический потенциал границы раздела двух фаз; U – разность потенциалов; d – диаметр капилляра.

Первое слагаемое в (6) представляет известную силу, действующую на единицу объема незаряженной жидкости. Для заряженной жидкости объемная пондеромоторная сила поля определяется вторым слагаемым. Из третьего слагаемого видно, что сила, действующая со стороны поля на границу раздела фаз, направлена в область с меньшим значением ε ($\varepsilon_1 > \varepsilon_2$), то есть на границе жидкость – пар механические силы ЭП действуют в направлении, противоположном силам поверхностного натяжения плоской поверхности жидкости, что при определенных условиях приводит к разрушению границы раздела, дроблению жидкости и перестройке структуры течения как жидкости, так и пара в капилляре. В случае искривленной поверхности жидкости в капилляре направление этой силы совпадает с направлением действия лапласова давления.

В работе [12] показано, что в водном бинарном электролите, помещенном между двумя электродами, при прохождении электрического тока возникает отклонение от электронейтральности и, как следствие, специфическое неоднородное распределение удельной электропроводности γ и напряженности ЭП. Причинами такой неустойчивости являются различные неоднородности (газовые пузырьки, пылинки, абсорбированные компоненты), различие скоростей компонентов, изменение температуры. Попутно в жидкости возникают объемный заряд и объемная сила, определяемая четвертым слагаемым. Последнее слагаемое в (6) определяет изменение ускорения жидкости за счет давления на поверхность мениска электрического ветра (ЭВ) или плазмы ИР, возникающих при существовании КР или ИР в паровоздушной среде при расстоянии $\delta = h_e - l$ между мениском и коронирующим электродом. Знак “минус” отражает то, что плазма обоих видов разрядов уменьшает скорость движения жидкости в капилляре, хотя одновременно их сильные поля за счет предыдущих составляющих (6) существенно ускоряют движение жидкости. При знаке “плюс” последнего составляющего происходит ускорение двойного электрического слоя границы раздела фаз жидкость – стенка капилляра. Это влечет за собой выравнивание профиля скоростей по сечению столбика вплоть до перехода ламинарного течения жидкости в турбулентное, что приводит к возрастанию скорости движения столбика жидкости в целом.

Таким образом, на столбик жидкости в капилляре в условиях действия на него безразрядных и разрядных НЭП действует целый ряд объемных и поверхностных пондеромоторных сил ЭП. При этом в разрядных полях изменяются физические свойства всех трех фаз [3] и, естественно, величины поверхностных натяжений и краевой угол (обозначим их σ_e и θ_e), а следовательно, межфазные взаимодействия и условия равновесия фаз. Как следствие, происходят фазовые переходы (растворение твердой фазы, испарение жидкой, конденсация паровой фазы, а также электрохимические реакции во всех трех фазах). Уравнения сохранения импульса (уравнение движения) для двухфазной среды могут быть записаны в форме [13]: изменение количества движения в некотором объеме, содержащем i -ю фазу, равно сумме импульса главного вектора всех внешних сил и сил межфазного взаимодействия и импульса, сообщенного данному объему при фазовом переходе. Этой формулировке соответствует в векторной форме система уравнений для каждой i -й фазы [10]

$$\frac{d}{dp} \left(\int_v \rho_i \vec{w}_i dV \right) = \vec{F}_{vi} + \vec{F}_{Fi} + \int_v \vec{R}_i dV, \quad (8)$$

где \vec{F}_{vi} – главный вектор объемных сил в i -й фазе; \vec{F}_{Fi} – главный вектор поверхностных сил, действующий на i -ю фазу на ее внешних поверхностях в объеме V ; \vec{R}_i учитывает “реактивную” силу, возникающую как результат обмена массой, а следовательно, и импульсом между фазами. Величины \vec{F}_{vi} и \vec{F}_{Fi} по существу есть суммы, в которые в качестве слагаемых входят соответственно главные векторы объемных и поверхностных механических сил ЭП.

Из (5) непосредственно следует, что скорости движения жидкости в капилляре, расположенном под определенным углом к горизонту без поля и находящемуся в НЭП, должны отличаться. В [14] отмечено, что высота поднятия этилового спирта увеличивается в несколько раз в засыпке этирила с диаметром частиц 0,03 мм при наложении разности потенциалов в 1000 В, существенно возрастает и скорость поднятия жидкости. Там же указывается, что для получения значительных напоров в электроосмотических насосах в качестве теплоносителя применяют жидкости с большой диэлектрической проницаемостью и ξ -потенциалами (спирты, воду и водные растворы HCl, KCl, KOH), обладающих большой электропроводностью, что препятствует наложению ЭП высокой напряженности ввиду джоулева разогрева и электролиза, если оба электрода находятся в жидкости. Если же один из них находится над жидкостью, то интенсивность последних эффектов уменьшается пропорционально величине сопротивления воздушной прослойки, а это открывает возможность применения ЭП высоких напряженностей для интенсификации движения высокопроводящих жидкостей, в том числе водных электролитов в капиллярах.

Целью данной работы является исследование скорости впитывания первоначально дистиллированной воды в капилляры из плавленного кварца диаметрами 0,2 мм при температуре 293 К и сопоставления результатов кинетики процессов без поля и в НЭП при горизонтальном положении капилляра и угле наклона его к горизонту 15° . Такая ориентация капиллярных трубок к горизонту соответствует наклону тепловых труб $0 \leq \alpha \leq 15^\circ$ [9]. Длина капилляров $L = 0,76$ м также соизмерима с протяженностью электрогидродинамических низкотемпературных тепловых труб [10, 14].

Важнейшим конструктивным элементом тепловой трубы является фитиль [9], в котором под действием капиллярного потенциала происходит движение жидкого теплоносителя. Ограничение теплопередающей способности из-за транспортных свойств фитиля является одним из основных в работе низкотемпературных тепловых труб. В [10] показано, что электрогидродинамическое воздействие в паровой и жидкостной фазах может существенно влиять на внутренние характеристики тепловой трубы. Благодаря повышению скорости движения теплоносителя достигается улучшение теплопередающей способности тепловой трубы. Оптимизация фитиля, работающего против сил гравитации и в условиях наложения НЭП, должна проводиться прежде всего по среднему диаметру пор. Представление фитиля с определенным значением диаметра средних пор в виде отдельной капиллярной трубки будет способствовать, в частности, выяснению возможных путей интенсификации теплопереноса в тепловых трубах за счет ускорения массопереноса с помощью НЭП.

Капилляры изготовлены по методике, разработанной в Институте физической химии РАН. Их получали путем быстрого растяжения разогретого участка трубки из плавленного кварца высокой чистоты (более 99,99% SiO₂). Диэлектрическая проницаемость использованного кварца составила 3,75. Плавленный кварц – хороший изолятор; его удельное сопротивление – одно из наиболее высоких среди твердых изоляторов – $5 \cdot 10^{16}$ Ом·м. Коэффициент линейного расширения наоборот очень низок и составляет $0,57 \cdot 10^{-8}$ м/К, что позволяет игнорировать увеличение диаметра капилляра при возможном нагреве в слаботочном разрядном ЭП. Диаметр и конусность приготовленных капилляров контролировали с помощью длиннофокусного микроскопа КМ-8. Диаметр измерялся с точностью ± 5 мкм. Конусность не превышала $10^{-5} - 10^{-6}$.

Калибровка и условия подготовки капилляров к опытам не отличаются от описанных в [3 – 5]. Капилляры очищали выдерживанием на протяжении двух суток в хромовой смеси, промывали в дистиллированной воде, удаляли воду из капилляров сжатым воздухом. При капиллярном поднятии воды в очищенных таким образом капиллярах $\cos\theta = 0,98$. После каждого опыта капилляр промывался дистиллированной водой и сушился сжатым воздухом.

Для опытов использовался бидистиллят воды с первоначальной удельной электропроводностью в равновесии с воздухом $\sigma = 5,9 \cdot 10^{-4}$ См/м. После опускания в воду металлического электрода

начинался неконтролируемый процесс его растворения и, естественно, вода превращалась в электролит. Он имел ту или иную концентрацию ионов вольфрама, а также ионов, принесенных с воздуха, которые избирательно адсорбируются на поверхности мениска и поверхности прилегающей к нему пленки воды. Диссоциация ОН-групп также обуславливает заряд поверхности кварца. Поверхностное и объемное насыщение воды ионами происходит и при существовании в капилляре КР или ИР, а также при электролизе воды и набухании поверхностного слоя кварца в случае длительного контакта с водой. После контакта воды с сосудом, в который она наливалась для проведения опытов, и воздухом начинался неконтролируемый процесс абсорбции и растворения газов, ионов и, естественно, вода превращалась в электролит, который имел ту или иную концентрацию ионов. Эти же компоненты, принесенные с воздуха, избирательно адсорбируются на стенках капилляра и на поверхности мениска. Естественно, на эти поверхности оседают заряженные и нейтральные частицы пыли и другие продукты загрязнения воздуха, присутствуют они и в объеме воды. Заряд поверхности кварца без воздействия поля определяется адсорбционным или диссоциативным механизмом. Все промежуточные случаи заключены между этими двумя предельными. После окончания опытов электропроводность воды была на уровне $5,2 \cdot 10^{-2}$ См/м.

НЭП создавалось с помощью электродов, устанавливаемых в начале и конце капилляра. Один электрод в виде вольфрамовой фольги опускался в широкий фторопластовый сосуд с водой и перпендикулярно оси капилляра так, чтобы не заслонял его канал, а конец заостренного игольчатого электрода из такой же вольфрамовой проволоки, толщина которой была намного меньше внутреннего диаметра капилляра, располагался в устье капилляра. Следовательно, можно считать, что в процессе проведения опыта НЭП создавалось совокупностью электродов игла – плоскость в начале опыта и игла – поверхность мениска в конце опыта. Соединяющие проволоки находились в фторопластовой изоляции, которая покрывала их соответственно до плоского электрода и до игольчатого в устье капилляра. Поэтому можно считать, что в основном НЭП было локализовано в канале капилляра. Величины E и ∇E^2 поля по продольной оси исследуемого капилляра в процессе впитывания, естественно, изменялись сложным образом в пространстве и времени. Следовательно, провести их расчет крайне сложно.

Свободная от контакта с водой внутренняя поверхность капилляра при существовании постоянного НЭП неоднородно поляризовалась и заряжалась отрицательными ионами, поскольку коронирующий электрод имел отрицательную полярность. В [15, 16] указывается, что по сравнению с металлами и полупроводниками исследование изоляторов, к которым принадлежит и аморфный кварц, сопровождается дополнительными экспериментальными трудностями, связанными с существованием электростатического заряда, образующегося на поверхности диэлектрика в процессе имплантации ионов и электронов при электронно-ионной бомбардировке этой поверхности. При этом образуются различные заряженные дефекты, как точечные, так и протяженные. Укажем на то, что большинство предпринимавшихся до сих пор попыток теоретического исследования течения жидкости в диэлектрических каналах, например, [17], совершенно игнорируют влияние твердого диэлектрика на характер распределения зарядов в жидкости, что во многих случаях приводило к результатам, противоречащим экспериментальным данным. Между тем, диэлектрик, образующий стенки канала, энергично адсорбирует заряды на своей поверхности, заряжаясь до весьма больших потенциалов. По приблизительным оценкам [18] в каналах из органического стекла потенциал адсорбированного заряда достигает нескольких сотен киловольт при внешних продольных управляющих полях с напряжениями от 10 до 15 кВ. При этом взаимодействие заряженной жидкости и заряженных стенок очень значительно. Эта способность диэлектриков проявляется тем сильнее, чем меньше их проводимость. Поэтому графические зависимости $v(t)$ ниже представлены при постоянном напряжении U между электродами, так как усреднить величины E и ∇E^2 при таком сложном характере их изменения не представлялось возможным. К тому же это удобно при инженерных расчетах скорости течения жидкостей в капиллярных трубках.

Для проведения экспериментов по кинетике течения жидкости с помощью электродвигателя Уоррена сосуд с жидкостью подводился к началу капилляра. Момент контакта капилляра с жидкостью принимался за начало измерений. В горизонтальной капиллярной трубке влияние гидростатического давления жидкости в сосуде на движение жидкости в капилляре исключалось установлением уровня поверхности мерного количества жидкости над входным отверстием. Постоянство температуры ($T = 293$ К) в прозрачной камере спокойного воздуха (кварцевая труба диаметром 0,01 м), в которой находилась используемая в опытах капиллярная трубка, контролировали тонкими медь-константановыми термопарами, впаянными в различные точки вдоль длины камеры. При этом головки термопар находились вблизи капиллярной трубки, но воздействием ЭП на них можно было прене-

бречь, что проверялось специальными опытами на предмет отсутствия электростатических наводок. Естественно, при существовании того или иного разрядного поля во впитываемой жидкости возникал значительный температурный градиент. Колебания температуры по длине камеры не превышали $\pm 0,5$ К.

Горизонтальность положения кварцевой трубки или наклон на нужный угол обеспечивалась ее расположением на поверхности координатного столика с микрометрическими винтами и контролировалась микрокатетометром КМ-8. Положение движущегося мениска определялось совместным применением матричной телевизионной камеры и компьютера типа АВМ РС/АТ (с тактовой частотой ≥ 8 МГц). Работа такого комплекса предназначена для измерения в автоматическом режиме и базируется на компьютерном анализе изображения мениска жидкости, сформированного оптической системой телекамеры и переданного с помощью быстродействующего контроллера в компьютер. Это сразу же позволяло получать на мониторе и в записи графическую зависимость $l(t)$ и $dl/dt(t)$ при различных условиях эксперимента с точностью $\pm 0,1$ мм по длине столбика жидкости и $0,1$ с по времени движения жидкости.

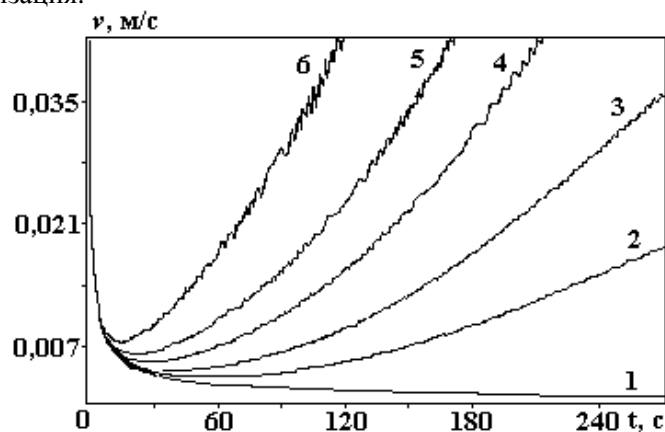
На рисунке представлены зависимости скорости впитывания воды в ЭП и без поля от времени при горизонтальном положении капилляра и при угле наклона его к горизонту 15^0 . Расположение графиков показывает, что НЭП существенно увеличивает скорость впитывания жидкости в обоих случаях ориентации капилляра, за исключением впитывания при очень большой скорости (первый период нестационарного впитывания – период релаксации ко второй стадии – квазистационарному этапу процесса). С увеличением угла наклона капилляра влияние поля существенно уменьшается за счет роста вертикальной составляющей ускорения земного тяготения. Без наложения поля скорость впитывания также заметно уменьшается, что находится в полном соответствии с уравнением (4). Увеличение скорости впитывания в НЭП особенно значительное на заключительной третьей стадии, когда естественный процесс впитывания протекает очень медленно, поскольку градиент капиллярного давления в уравнении Пуазейля устремляется к нулю.

Как видно из рисунка, для третьего периода кривые $v(t)$ в НЭП устремляются вверх. Это происходит тем более стремительно и тем раньше, чем более высокое напряжение приложено к электродам. При этом амплитуды и частоты колебательных движений столбиков жидкости увеличиваются, причем колебания скорости их продвижения становятся нерегулярными. При подходе воды к игольчатому электроду кривые скорости впитывания асимптотически приближаются к соответствующим вертикалям, за исключением кривых $v(t)$, полученных при низком напряжении ($U = 5$ кВ). Скорость впитывания в поле в обоих случаях растет в связи с ростом третьего слагаемого в уравнении (5). Более четко это явление наблюдается для горизонтальной трубки. Это обусловлено непостоянством силы f , которая нарастает по мере приближения жидкости к острию игольчатого электрода, в связи с чем стремительно возрастают все члены в уравнении (6) за счет роста действующих величин E , ∇E^2 , ρ_e , γ , j при уменьшения δ .

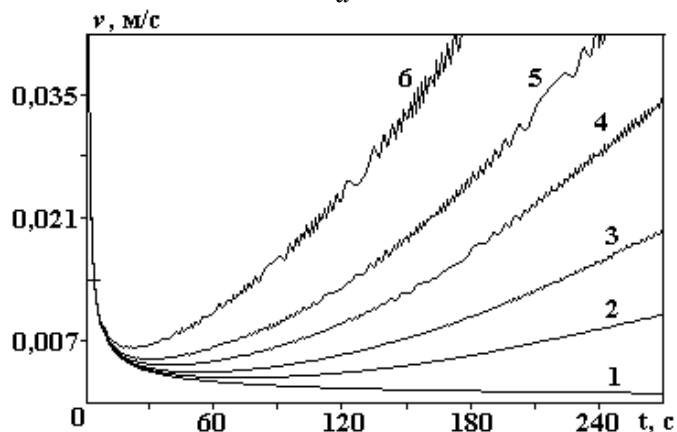
Увеличение скорости пропитки под действием поля в капилляре тем сильнее, чем больше l , то есть чем ближе мениск жидкости подходит к электроду – игле. Раскачивающийся осциллирующий режим электрогидродинамического течения воды в капиллярной трубке, видимо, можно объяснить наличием ряда противоборствующих факторов, которые при перемещении мениска в области все большей неоднородности поля возрастают. Возникновение колебательных движений жидкости в до-разрядных НЭП наблюдалось в [3]. На близких расстояниях от игольчатого электрода величины E и ∇E возрастают настолько, что возникают сначала коронный, а затем и искровой разряды между острием и приближающимся столбиком жидкости. Этому сопутствует появление налагающихся на предыдущие новых специфических конкурирующих эффектов. В этих условиях электрическое взаимодействие между приближающимся столбиком водного электролита и игольчатым электродом, вероятно, следует рассматривать в системе электродов острие – сферическая поверхность жидкого электрода.

С возникновением КР поверхности объемной и пленочной жидкости, примыкающие к мениску, а также стенки капилляра насыщаются ионами, одноименными со знаком потенциала коронирующего электрода. На мениск, объемную и пленочную воду воздействуют противоборствующие силы электростатического давления $0,5\varepsilon_0\varepsilon E^2$, возросшего поверхностного натяжения и ЭВ. Одновременно в любом нормальном до разрядного промежутка сечении распределение плотности тока будет непостоянным, а неоднородность ЭП в направлении устья капилляра усилится. При этом смачиваемость заряженной внутренней поверхности капилляра улучшается [19], а возросшая неоднородность поля (∇E^2) [6] способствует вытягиванию впереди мениска длинной макроскопической толщины ци-

линдрической пленки, что ведет к увеличению косинуса краевого угла смачивания и уменьшению сил трения. Это, естественно, ускоряет движение осевого столбика жидкости в капилляре. Но чем ближе подходит столбик жидкости к коронирующему электроду, тем сильнее возрастает КВ, а с ним и противодействующее движению давление на мениск. При этом он продавливается, а осевой столбик жидкости отталкивается назад в область меньшего воздействия КВ, оставляя за собой толстую цилиндрическую макроскопической толщины пленку объемной жидкости. Но возросшее лапласово и электростатическое давление снова толкают жидкость вперед, мениск проскакивает прежнее положение и приближается к острию настолько, что КР вырождается в ИР. Осцилляциям мениска в КР способствуют колебания пространственного заряда в коронном промежутке. Частота этих колебаний пропорциональна приложенному напряжению и находится в пределах $10^4 - 10^5$ Гц. Их амплитуда существенно зависит от давления и рода газа тем меньше, чем большую роль в механизме разряда играет ступенчатая ионизация.



a



б

Результаты наблюдений за впитыванием воды в горизонтальные капиллярные трубки радиусами $r = 5 \cdot 10^{-4}$ (а) и $r = 5 \cdot 10^{-5}$ м (б). 1 – без поля и в НЭП; 2 – 5 кВ; 3 – 10 кВ; 4 – 17,5 кВ; 5 – 25 кВ; 6 – 40 кВ при $T = 293\text{K}$

С развитием ИР электрический ветер постепенно исчезает, а вместе с ним и обусловленные им эффекты. Но нарастают новые, еще в большей степени нестационарные процессы [20]. Еще в передпробивной области вследствие насыщения приповерхностного объема воды ионами и их взаимного отталкивания возникает электрическая сила, действующая противоположно силе поверхностного натяжения при горизонтальной поверхности (силам когезии). В случае вогнутой поверхности она суммируется с лапласовым давлением мениска, способствуя дополнительному нарастанию скорости движения жидкости. При некоторой критической величине заряда приповерхностного слоя наступит преобладание электрической силы над силами поверхностного натяжения. В результате нарушается устойчивость поверхности жидкости. Визуально неустойчивость проявляется в деформациях мениска, выбросе высокодисперсных капелек с его поверхности. Они увлекаются отраженными от поверхности жидкости электрогазодинамическими потоками и отбрасываются на стенки капилля-

ра на разные, в том числе довольно значительные расстояния от поверхности жидкости. Иногда они оседают даже на коронирующем электроде, изменяя параметры КР и ЭВ.

При дальнейшем повышении напряженности поля ИР, вызванном продвижением жидкости к электроду, амплитуда и частота колебаний продолжают увеличиваться. С последующим увеличением напряженности ЭП увеличивается плотность тока ИР, а следовательно, и джоулев разогрев как смачивающей пленки, так и жидкости основного столбика. Это приводит к возникновению, с одной стороны, продольных и поперечных градиентов температуры, а с другой, – ведет к интенсификации движения жидкости, обусловленной струйным течением [21] и термоэлектрическими эффектами [22]. Но одновременно проявляются термоосмотические течения и уменьшение толщины смачивающей пленки вследствие ее испарения. Все эти явления действуют в противоположных направлениях относительно положения мениска жидкости, что вызывает изменение механизма колебаний уровня жидкости в капилляре.

В столбике жидкости за счет электролиза воды и ее объемных локальных вскипаний формируются сравнительно крупные пузыри, которые и далее существенно уменьшают ее плотность. Вместе с тем резкая интенсификация испарения жидкости с мениска столь же заметно увеличивает плотность пара, поскольку КВ уже не уносит ее. В результате эффекта Эвершеда возникает относительное движение жидкости и пузырьков, что стимулирует перетекание части жидкости из области слабого в область сильного поля.

С переходом ИР в более насыщенную форму (при дальнейшем приближении жидкости к электроду) стремительно увеличивается джоулев разогрев всех трех фаз, что вызывает изменение их физических свойств, включая плотность и поверхностное натяжение. Существенным фактором является очень быстрое и полное испарение смачивающей пленки как за счет выделения в ней джоулева тепла в количестве, достаточном для реализации интенсивного высокотемпературного испарения, так и выбивания высокоэнергетическими ионами и атомами кластеров воды с числом молекул воды вокруг протонов и ионов, достигающим 50 и более [23]. Визуально это проявлялось появлением на короткое время тумана. После его исчезновения, видимо, за счет испарения микрокапелек и кластеров, ИР прекращался (хотя ЭП не выключалось), поскольку резко возрастало сопротивление как сухих стенок капилляра, так и осушенной газовой среды. Но при этом настолько же значительно возрастала неоднородность ЭП вдоль стенок и в объеме канала капилляра. Толстая пленка воды по внутренней поверхности капилляра стремительно вытягивалась к электроду, а за ней также быстро продвигался и столбик жидкости. Как только расстояние между столбиком воды и электродом сокращалось до пробивного, следовал импульс конденсированного ИР. После этого реализовывались предыдущие процессы, и столбик снова резко отступал, а затем в силу действия предшествующих факторов влияния снова продвигался ближе к острию.

При дальнейшем незначительном увеличении напряженности поля энергия плазменного импульса возрастает настолько, что разрушается пленка адсорбированной влаги, а материал стенки капилляра подвергается электроискровой эрозии. Удар высокоскоростного импульса плазмы о поверхность воды обеспечивал выплескивание воды на стенки, а отдельные капли вылетали за пределы капилляра. Происходящие процессы способствуют развитию неупорядоченных колебаний столбика воды с настолько возрастающими частотами и амплитудами, что вода начинает выбрасываться из устья широкого капилляра в виде отдельных порций. В этих условиях наблюдается нарушение сплошности столбика жидкости и она вылетает из устья капилляра в виде струи капелек со скоростью, зависящей от величины напряжения между электродами.

Расположение кривых $v(t)$ без поля и в поле, несомненно, свидетельствует о значительном влиянии ЭП, в особенности разрядных, на массоперенос как в горизонтальном, так и ориентированном под определенным углом к горизонту капилляре. При этом возрастание скорости движения жидкости в ЭП по сравнению с ее движением без поля составляет от нескольких единиц вначале процесса впитывания до десятков в конце этого процесса. Для фиксированного значения времени скорость заполнения жидкостью капилляра тем больше, чем выше межэлектродная разность потенциалов. Это позволяет соответственно увеличивать угол между широким капилляром и горизонтом гораздо больше 15° при обеспечении приемлемой скорости движения жидкости с одновременным увеличением [3] высоты ее подъема.

Таким образом, в случае впитывания горячей жидкости наложение ЭП той или иной напряженности и степени неоднородности позволит существенно интенсифицировать теплоперенос в пористых материалах, в частности, в фитилях тепловых труб, за счет электрогидродинамических явлений, значительно ускоряющих массоперенос в широких макрокапиллярах, расположенных в пористом теле под разными углами к горизонту.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Болога М. К., Гросу Ф. П., Кожухарь И. А.* Электроконвекция и теплообмен. Кишинев, 1977.
2. *Остроумов Г.А.* Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. М., 1979.
3. *Полищук Н.В., Панченко И.М., Панченко М.С., Карпович И. М.* Эффекты воздействия и последствие электрических полей на поднятие воды в макрокапиллярах // *Электронная обработка материалов*. 2002. № 4. С. 54–67.
4. *Карпович И.Н., Панченко М.С., Панасюк А. Л., Чураев Н.В.* Влияние неоднородных электрических и магнитных полей на впитывание жидкости капиллярно-пористыми телами // *Электронная обработка материалов*. 1982. № 4. С. 62–66.
5. *Карпович И.Н., Чураев Н.В., Панченко М.С., Панасюк А.Л.* Ускорение капиллярной пропитки внешним неоднородным электрическим полем // *Коллоидный журнал*. 1982. Т. XLIV, № 6. С. 1044–1050.
6. *Панасюк А. Л., Панченко М.С., Старов В. М., Чураев Н. В.* Влияние неоднородного электрического и магнитного поля на внутренний массоперенос в капиллярно-пористых телах // *Инженерно-физический журнал*. 1989. Т. 57. № 2. С. 227–232.
7. *Порхаев А.П.* Кинетика впитывания жидкостей элементарными капиллярами // *Коллоидный журнал*. 1949. Т.11. № 5. С. 346–353.
8. *Львов А.В.* Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М., 1954.
9. *Семена М. Г., Косторнов А. Г., Гершуни А. Н., Мороз А. Л., Зарипов В. К.* Исследование характеристик капиллярного впитывания фитилей тепловых труб // *Инженерно-физический журнал*. 1974. Т. 27. № 6. С. 1009–1014.
10. *Болога М.К., Смирнов Г.Ф., Дидковский А.Б., Климов С. М.* Теплообмен при кипении и конденсации. Кишинев, 1987.
11. *Губкин А. Н.* Физика диэлектриков. М., 1971.
12. *Остроумов Г.А.* Распределение механических сил в неподвижном электролите при произвольной конфигурации электродов // *Электронная обработка материалов*. 1975. № 2. С. 37–40.
13. *Дейч М.Е., Филлипов Г.А.* Газодинамика двухфазных сред. М., 1981.
14. *Болога М.К., Васильев Л. Л., Кожухарь И.А., Шкилев В. Д.* Влияние электрического поля на характеристики тепловых труб // *Инженерно-физический журнал*. 1979. Т. 36. № 6. С. 1126–1137.
15. *Богомолова Л. Д., Жачкин В.А.* Парамагнитные центры в ион-имплантированных неорганических стеклах // *Физика и химия стекла*. 1998. Т. 24. № 1. С. 3–30.
16. *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.
17. *Копылов Г.Н.* Ламинарное течение заряженной жидкости в плоской трубе под действием внешнего электростатического поля // *Журнал технической физики*. 1963. Т. 24. Вып. 11. С. 1975–1982.
18. *Денисов А.А., Нагорный В.С.* Электрогидро- и электрогазодинамические устройства автоматики. Л., 1979.
19. *Цыгельный И.М., Тынный А.Н.* О влиянии электрического заряда поверхности полимера на ее взаимодействие с жидкой средой // *Коллоидный журнал*. 1977. Т. 39. № 5. С. 1001–1004.
20. *Остроумов Г.А.* К вопросу о гидродинамике электрических разрядов // *Журнал технической физики*. 1954. Т. 24. Вып. 10. С. 1915–1921.
21. *Штернер С.Р.* Возникновение струйного течения закритических водных растворов электролитов при джоулевым разогреве в тонких капиллярах // *Инженерно-физический журнал*. 1981. Т. 40. № 2. С. 213–217.
22. *Саранин В.А.* Движение жидкости, обусловленное термоэлектрическими эффектами // *Электронная обработка материалов*. 2001. № 1. С. 30–34.
23. *Николаев Е.Н., Танцырев Г.Д., Сараев В.А.* Вторичная эмиссия кластеров воды на ионах щелочных металлов // *Журнал технической физики*. 1976. Т. 46. Вып.10. С. 2184–2187.

Поступила 03.02.03

Summary

If was showed, that electric field increases much the rate of water movement while the suction of water into a broad quartz capilar, which is situated at an angle of 15° to horizon.