

## ЭФФЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ И ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ПОДНЯТИЕ ВОДЫ В МАКРОКАПИЛЛЯРАХ

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

*\*Ровенский государственный технический университет,  
ул. Соборная, 11, г. Ровно, UA 33028, Украина*

Влажные тела природного и искусственного происхождения являются капиллярно-пористыми коллоидными телами. Они пронизаны сетью макро- и микропор разнообразных размеров и формы, которые являются транспортными каналами в процессе увлажнения (кинетика) и емкостями жидкости в равновесном состоянии (статика увлажнения). Физические, химические и технологические свойства влажных тел определяются молекулярными взаимодействиями твердой фазы тела с окружающей паровоздушной средой и с водой в разных агрегатных состояниях, удерживаемой в макро- и микрокапиллярах. Внешнее электрическое поле (ЭП) оказывает влияние на молекулярные взаимодействия, имеющие электромагнитную природу. Во влажных пористых телах это влияние распространяется и на капиллярные явления, под которыми в широком смысле понимают поверхностные явления на границах соприкасающихся сред (в поверхностных слоях), вызванные молекулярными и внешними силами (гравитационные и различные градиентные поля). В более узком смысле капиллярные явления – это явления, вызванные влиянием поверхностного натяжения, то есть межмолекулярных взаимодействий и внешних сил, на равновесие (статика) и движение (кинетика) свободных поверхностей жидкостей, а также границ жидкостей с твердыми телами или другими несмешивающимися жидкостями.

Таким образом, капиллярные явления охватывают различные случаи равновесия и движения поверхности жидкости под действием сил межмолекулярного взаимодействия и внешних сил. Наиболее простое и распространенное капиллярное явление – всасывание жидкостей в капилляры.

Целью данной работы явилось изучение процесса впитывания воды отдельными цилиндрическими макрокапиллярами в присутствии (воздействие поля) и после прекращения действия неоднородного ЭП (эффект последействия поля) различных напряженностей  $E$ , включая и разрядное поле. Цилиндрические капилляры больших радиусов являются, с одной стороны, простейшей моделью макропор реальных капиллярно-пористых тел, а с другой – большими резервуарами, из которых микрокапилляры этих тел всасывают воду и подают ее на значительную высоту (почвы, грунты, растения и др.). Известно [1], что средняя линейная скорость переноса прямо пропорциональна квадрату радиуса капилляра и обратно пропорциональна длине столбика жидкости в капилляре. В микрокапиллярах ( $1 \cdot 10^{-7} > r_0 > 1 \cdot 10^{-9}$  м) скорость движения жидкости намного меньше скорости ее передвижения в макрокапиллярах. Однако передвижение воды в них лимитируется противодействием силы тяжести. Компенсирование в определенных пределах гидростатического давления или увеличение капиллярного давления в макрокапиллярах позволило бы значительно уменьшить время транспортирования воды на значительные высоты и ее аккумуляцию на длительное время.

Из условия равновесия капиллярного и гидростатического давлений столба жидкости высотой  $h_0$  следует закон капиллярного поднятия (закон Жюрена)

$$h_0 = \frac{2\sigma_{21} \cos \theta}{r_0(\rho_2 - \rho_1)g}, \quad (1)$$

где  $\rho_2$  и  $\rho_1$  – плотности жидкости и ее пара;  $\sigma_{21}$  – поверхностное натяжение воды, граничащей с паровоздушной средой.

Величина краевого угла смачивания  $\theta$ , характеризующего молекулярное взаимодействие трех фаз при равновесии между ними, определяется законом Юнга

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{31} - \sigma_{23}}{\sigma_{21}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{31}$  – поверхностное натяжение твердой фазы на границе с влажным воздухом;  $\sigma_{23}$  – поверхностное натяжение воды, контактирующей с твердым телом.

Из уравнений (1) и (2) видно, что изменение величины  $h_0$  может достигаться за счет изменения плотностей воды и пара или межфазных поверхностных натяжений, то есть изменения сил когезии и адгезии. Сравнение энергии предпробивных ЭП и глубины потенциальной ямы для молекулы жидкой воды, пребывающей в окружении соседних молекул [2], несомненно, указывает на незначительную способность этих полей заметно влиять на интенсивность сил когезии. Водяной пар до состояния насыщения можно считать идеальным газом (силы когезии отсутствуют). Использование формулы Больцмана показывает, что относительное изменение концентрации молекул пара в области наибольшей неоднородности предпробивного ЭП составляет не больше 3% [3].

Поверхностные явления удобно классифицировать в соответствии с объединенным уравнением первого и второго начал термодинамики. Для рассматриваемой гетерогенной системы оно может быть записано в следующей форме:

$$dG = -SdT + Vdp + \sigma ds + \sum \mu_i dn_i + \phi dq. \quad (3)$$

Уравнение (3) выражает приращение энергии Гиббса  $dG$  при бесконечно малом переходе системы в новое положение равновесия. Из него следует, что поверхностная энергия ( $G^s = \sigma s$ ) и, в частности,  $\sigma$  (при  $s = \text{const}$ ) может изменяться за счет привнесения в систему различных видов энергии: тепловой, механической, химической и электрической. Превращения различных видов энергии сопровождаются такими явлениями, как изменение адгезии и смачивания, капиллярности, адсорбции, электрического состояния и реакционной способности с изменением дисперсности составных частей гетерогенной системы. Уравнение (3) также показывает, что изменение состояния равновесия системы в ЭП возможно при изменении величины ее электрического заряда  $dq$ . Последнее можно осуществить за счет возникновения связанных зарядов (при поляризации фаз), либо при внесении в них свободных зарядов (при растворении, диссоциации, насыщении ионами при воздействии разрядных полей). Изменения при этом межфазных натяжений приведут к изменениям положения уровня воды в капиллярах.

В [4] на основе метода Онзагера показано, что наличие внешнего ЭП может приводить к увеличению или уменьшению концентрации носителей тока (ионов в случае электролитов, электронов и дырок в полупроводниках) у границ сред, что приводит к уменьшению или увеличению коэффициента поверхностного натяжения растворов электролитов и твердых тел (полупроводников и даже металлов). При изменении величины и направления поля возможны изменения не только величины, но и знака  $\Delta\sigma$ . При этом могут возникать колебания жидкости или кристаллических пластинок, связанные с зависимостью коэффициента поверхностного натяжения от внешних полей. В [5] термодинамические уравнения для неоднородной системы с плоским поверхностным слоем обобщены на случай произвольно направленного внешнего однородного ЭП. В результате получены зависимости поверхностного натяжения жидкостей, в том числе и воды, на границе с насыщающим паром как от величины, так и от направления поля. Там же указано на изменение двухфазного равновесия в этом случае.

Из приведенных соображений, базирующихся на положениях классической термодинамики, следует, что в принципе возможны изменения высоты подъема воды в макрокапиллярах при воздействии внешних ЭП. Что касается неравновесной термодинамики капиллярных систем, то здесь исследования только недавно расширены за область применимости линейной теории. Николс и Пригожин [6] показали важную роль флуктуаций вблизи точек ветвления. Этот подход подчеркнул нуклеативный процесс образования диссипативных структур, который вызывается

флуктуациями закритического размера. В [7] на основе теории Глендорфа – Пригожина приводится термодинамический анализ устойчивости заряженных жидких межфазных поверхностей. Рассмотрены члены, приводящие к неустойчивости, обусловленные экспериментально наблюдаемой нестабильностью заряженной поверхности жидкости. Здесь явно выделяется значение концепции “упорядочение путем флуктуаций” для нелинейных неравновесных заряженных капиллярных систем. Показано, что электрохимические напряжения, приложенные к поверхности, способны вызвать деформацию и ее движение. Этот термодинамический подход дополняет кинетический анализ устойчивости для определения пороговых условий неустойчивости поверхности, обусловленный электрическими напряжениями, переносом вещества и поверхностными реакциями. При этом система может перейти с одной термодинамической ветви на другую, которая может соответствовать совершенно другой структуре. Интенсивные электрические разряды, являющиеся сильно неравновесными процессами, в капиллярной системе, согласно принципу Ле-Шателье – Брауна, могут вызвать такие же по интенсивности компенсирующие процессы, которые далеко уведут ее от прежнего состояния равновесия. Для описания таких высокоинтенсивных процессов и их последствий для состояния системы потребуется применение методов термодинамики сильно неравновесных процессов [8].

В [9] обсуждаются известные экспериментальные данные о влиянии колебаний на изменение высоты подъема жидкостей, в том числе и воды, в капиллярных трубках с внутренним диаметром 0,5 – 5 мм. Обнаружено, что при относительных колебаниях жидкости и капилляра возможен не только дополнительный подъем, но и опускание уровня жидкости. Выдвигается гипотеза, объясняющая это явление асимметрией сопротивления при втекании и вытекании жидкости из капилляра. В рассматриваемых в [9] работах других авторов эффект объяснялся различными причинами: поперечными колебаниями стенок капилляра; существованием градиента продольной колебательной скорости стенки капилляра; изгибными колебаниями капилляра. Дрожалова и Китайгородский, например, считают, что  $\Delta h$  – эффект имеет место только при звуковых давлениях выше порога кавитации, причем максимум эффекта отвечает звуковому давлению 0,15–0,3 мПа. Высокоскоростная съемка показала, что подъем жидкости связан с локализацией кавитационного облака вблизи входа в капилляр. Это привело авторов к выводу, что дополнительный подъем происходит вследствие захлопывания кавитационных пузырьков во входном сечении капилляра. Следовательно, к ранее приведенным причинам следует присовокупить кавитационную гипотезу эффекта. Однако ни одна из гипотез не дает непротиворечивого объяснения экспериментальных данных не только количественно, но и качественно. Поэтому можно считать, что в настоящее время нет единой теории относительно природы  $\Delta h$  – эффекта. Вероятно, это явление даже в такой простой системе – многовариантное.

Наложение ЭП оказывает влияние на электрические свойства влажного диэлектрика вследствие перераспределения в капиллярах и порах как формы, так и положения газовых или жидкостных включений. Согласно [10], при воздействии ЭП помимо обычных капиллярных сил появляются дополнительные силы электрического происхождения. Явления, вызываемые этими силами, носят общее название электрокапиллярных явлений. Очевидно, сюда можно отнести эффекты Эвершеда и Фарадея – Сумото. Последний касается диэлектрических жидкостей. Изменение высоты столбика жидкости может быть очень значительным, кроме того при высоких напряжениях явление осложняется фонтанированием и бурным кипением жидкости.

Влияние ЭП на скорость фильтрации жидкостей в пористых телах рассматривалось на протяжении многих лет рядом ученых. Большое значение имеют работы Поливанова и Нетушила и др. Но в них отсутствует информация о впитывании жидкостей в одиночный цилиндрический капилляр под влиянием ЭП, как простейшей модели реальных капиллярно-пористых тел. Такие сведения приведены в работах [11, 12], где теоретически и экспериментально показано, что неоднородное ЭП может существенно влиять на кинетику капиллярного впитывания жидкостей в отдельные тонкие ( $r = 7 - 38$  мкм) кварцевые капилляры. Действие поля наиболее заметно на конечной стадии капиллярной пропитки. Но поскольку опыты проводились на капиллярах, длина которых была значительно меньше, чем высота подъема жидкости, факт влияния ЭП на конечное положение мениска не был установлен. К тому же не использовались даже слаботочные разрядные ЭП. Эксперименты [13, 14] показали, что слаботочный высоковольтный разряд типа коронного или других разновидностей оказывает сильное воздействие на процесс испарения различных жидкостей, включая воду, и может более чем на порядок увеличить скорость процесса обезвоживания по

сравнению с безразрядными условиями. Указанный эффект проявляет зависимость от характера разряда, его режимов, расположения электродов, величины заглублия мениска жидкости.

В состоянии равновесия высота столбика жидкости в вертикальном капилляре, находящемся в неоднородном постоянном ЭП, будет определяться из условия

$$(\rho_2 - \rho_1)gh = \frac{2\sigma_{21} \cos \theta}{r_0} + P_e, \quad (4)$$

где  $P_e$  – давление, создаваемое пондеромоторными силами за счет ЭП.

Представим уравнение (4) в виде

$$(\rho_2 - \rho_1)g = \frac{2\sigma_{21} \cos \theta}{r_0 h} + \frac{P_e}{h} \quad (5)$$

или

$$f_z = f_\kappa + f_e, \quad (6)$$

где  $f_z, f_\kappa, f_e$  – плотности объемных гравитационных, капиллярных и электрических сил. В свою очередь

$$f_e = f_n + f_c, \quad (7)$$

где  $f_n, f_c$  – объемные механические силы, действующие на поляризационные и свободные заряды в жидкости. Если принять, что диэлектрическая проницаемость воды  $\epsilon$  пропорциональна ее плотности  $\rho_2$ , то

$$f_n = 0,5\epsilon_0(\epsilon - 1)\nabla E^2. \quad (8)$$

При плотности свободных зарядов  $\rho_c$  в жидкости

$$f_c = \rho_c E. \quad (9)$$

Учитывая уравнения (8) и (9), выражение (6) получим в виде

$$(\rho_2 - \rho_1)g = \frac{2\sigma_{21} \cos \theta}{r_0 h} + 0,5\epsilon_0(\epsilon - 1)\nabla E^2 + \rho_c E, \quad (10)$$

откуда

$$h_e = \frac{2\sigma_{21} \cos \theta}{r_0 \left( (\rho_2 - \rho_1)g - (0,5\epsilon_0(\epsilon - 1)\nabla E^2 + \rho_c E) \right)}. \quad (11)$$

Таким образом, в каждом единичном объеме жидкости в капилляре даже при  $\rho_c = 0$  возникают электромеханические силы (8), стремящиеся переместить их в область большей неоднородности ЭП. Но поскольку в любом реальном диэлектрике, а тем более в воде, являющейся активным растворителем,  $\rho_c \neq 0$ , то к поверхности мениска из объема жидкости будут мигрировать ионы знака, противоположного полярности электрода, расположенного в воздухе над мениском воды в капилляре. В результате под действием кулоновской силы (9) жидкость будет перемещаться к верхнему электроду, то есть согласно (11) будет осуществляться подъем воды в капилляре.

Впитывание в пористые тела и отдельные капилляры определяется одними и теми же физическими механизмами. Однако интерпретация опытов с пористыми телами затруднена в связи со сложностью геометрии их порового пространства. Поэтому, а также вследствие того, что равновесный краевой угол смачивания стремится к нулю, для изучения влияния неоднородного ЭП на ход этого процесса были проведены эксперименты на отдельных кварцевых капиллярах с радиусами от 0,1 до 5 мм. Капилляры были изготовлены по методике Института физической химии РАН. Их вытягивали из трубок плавленого кварца высокой чистоты (более 99,99% SiO<sub>2</sub>) и внутренняя их поверхность была молекулярно гладкой и гидрофильной. Диэлектрическая проницае-

мость использованного кварца составила 3,75. Плавленный кварц очень хороший изолятор, удельное сопротивление его наиболее высокое 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 исключает увеличение диаметра капилляра при возможном нагреве в слаботочном разрядном ЭП на величину, большую ошибки опыта.

Калибровка и условия подготовки капилляров к опытам не отличаются от описанных в [11–13]. Для исследования пропитки установленных вертикально капилляров под воздействием постоянного неоднородного ЭП использовалась установка, схема которой приведена в [11]. Отличие состояло лишь в том, что нижний электрод в виде вольфрамовой фольги опускался в широкий фторопластовый сосуд с водой, а конец заостренного верхнего игольчатого электрода из вольфрамовой проволоки, толщина которой была намного меньше внутреннего диаметра капилляра, располагался в устье капилляра. Следовательно, можно считать, что неоднородное ЭП создавалось совокупностью электродов игла – плоскость. В качестве плоскости выступала поверхность воды в широком сосуде. Характер распределения напряженности поля по продольной оси исследуемого капилляра и методика измерения  $E$  подробно описаны в [11–13]. Для опытов использовался бидистиллированная вода 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 обуславливает заряд поверхности кварца [15]. Поверхностное и объемное насыщение воды ионами происходит и при наличии в капилляре коронного разряда (КР) или искрового разряда (ИР), а также при электролизе воды и набухании поверхностного слоя кварца в случае длительного контакта с водой. После окончания опытов электропроводность воды была на уровне водопроводной и составила  $5,2 \cdot 10^{-2}$  См/м.

Впитывание воды в капилляр осуществлялось в термостатируемой камере, где колебания температуры не превышали 0,5 К. Температуру капилляра в ходе опытов контролировали тонкими медь-константановыми термопарами, которые были экранированы от электростатических наводок. Измерения выполнялись при 293 К и начинались после выдерживания капилляра в течение нескольких часов в атмосфере насыщенных паров, создаваемой залитой в сосуд водой. После крепления капилляра и выведения камеры на заданный температурный и влажностный режим включалось ЭП. С помощью электродвигателя сосуд с жидкостью подводился к нижнему устью капилляра. Момент контакта капилляра с жидкостью принимался за начало измерений. Наблюдение за положением мениска жидкости в капилляре велось с помощью микрокатетометра КМ – 8 через переднюю прозрачную стенку камеры при боковом освещении капилляра. Для уменьшения влияния случайных вибраций камера была установлена на амортизирующие подкладки. Координата мениска определялась с точностью  $\pm 3$  мкм.

При наличии ЭП за счет увеличения  $E$  и  $\nabla E^2$ , а также плотности свободных зарядов  $\rho_c$  знаменатель формулы (11) будет уменьшаться, а высота  $h_e$  подъема воды в капилляре будет расти. Эти выводы касаются доразрядных ЭП, а следовательно, обратимых равновесных процессов, то есть когда выключается ЭП ( $E=0$ ), уровень жидкости быстро релаксирует к жюреновскому. Формула (11) применима лишь к грубым макрокапиллярам, когда пондеромоторные силы сравнимы с капиллярными и зависимостью величин  $\sigma_{21}$  и  $\cos\theta$  от параметров ЭП можно пренебречь. Изменение уровня жидкости под воздействием неоднородного ЭП успешно используется в электрогидродинамических устройствах автоматики [16].

Ситуация, однако, кардинально меняется с переходом в область разрядных, даже слаботочных ЭП. В случае возникновения КР поверхности объемной и пленочной жидкости, примыкающие к мениску, а также стенки капилляра насыщаются ионами, одноименными со знаком потенциала коронирующего электрода. На них воздействуют противоборствующие силы электростатического давления  $0,5\varepsilon_0\varepsilon E^2$ , поверхностного натяжения и коронного ветра (КВ), который также успешно используется в электрогазодинамических устройствах автоматики. С увеличением  $E$  сложным образом изменяются все межфазные поверхностные натяжения [5 – 8], следовательно, в числителе (11) будут таким же образом меняться величины  $\sigma_{21}$  и  $\theta$ . С ростом  $E$  увеличивается  $\nabla E^2$ . При этом уменьшается начальная величина радиуса  $r_0$ , поскольку за счет неоднородных по длине капилляра концентраций поляризационных и свободных зарядов возникает дополнительное к внешнему

неоднородное ЭП с градиентом, направленным к устью капилляра. Это приводит к вытягиванию в том же направлении макроскопической толщины смачивающей пленки. Этому способствуют и случайные во времени продавливания КВ мениска [14]. Пробой разрядного промежутка происходит между металлическим электродом и точкой на поверхности деформированного мениска, соответствующей максимальной напряженности ЭП. Поэтому с ростом  $E$  разрядного поля свободное сечение капилляра уменьшается, что приводит к дополнительному подъему жидкости. Противодействие конкурирующих процессов приводит к сложным колебаниям жидкости относительно исходного уровня.

С последующим увеличением  $E$ , а следовательно, и  $\nabla E^2$ , а также плотности тока возрастает давление КР и возникают новые эффекты, в частности, электромеханические (диспергирование смачивающей пленки), звуковые и тепловые. Звуковые могут содействовать подъему жидкости по механизму [9], а тепловые высушивают смачивающую пленку и уменьшают величину  $\sigma_{21}$ . С переходом КР в интенсивный разряд, когда возле острия электрода начинают зарождаться стримеры и достигают мениска, в столбике воды появляются парогазовые пузырьки. Это приводит к довольно резкому уменьшению  $\rho_2$  и к увеличению  $\rho_1$  за счет повышения температуры жидкости, что ведет к интенсификации испарения воды (увеличение плотности насыщающего пара в капилляре). Но разогрев коронирующего электрода (иногда до температуры плавления) уменьшает плотность воздуха возле устья капилляра и возникает течение влажного воздуха, противоположное КВ. Авторы [14] полагают, что основным механизмом, “ответственным” за интенсификацию испарения жидкости в условиях слаботокового разряда, является не объемный тепловой эффект, а воздействие разряда на поверхностный слой жидкости и вовлечение паров жидкости в разрядные процессы, которые сопровождаются вытяжкой этих паров из устья капилляра (то есть оказывают действие, подобное насосу). К тому же нормальный к мениску электрогазодинамический поток обеспечивает при отражении поперечное перемешивание парогазовой смеси. Это способствует значительному уменьшению парциального давления пара возле поверхности испарения. Опыты [14] показали, что при изменении тока КР от 10 до 70 мкА скорость электрогазодинамического потока изменяется от 6 до 13 м/с. В этих условиях возможна генерация продольных микровихрей в пограничном слое [17]. При этом ламинарный поток переходит в турбулентный, что обеспечивает возбуждение интенсивного уноса пара от поверхности мениска. Естественно, это способствует дополнительному подъему воды в капилляре за счет разрежения среды (насосный эффект).

Перечисленные конфликтующие явления и потоки усиливают как частоту, так и амплитуду вышеупомянутых стохастических колебаний. Причем это явление более интенсивно проявляется в случае положительной полярности коронирующего электрода. Последнее совпадает с данными [14], где с помощью осцилографирования КР показано, что при отрицательном потенциале коронирующего острия ток в широком диапазоне значений имеет только постоянную составляющую и лишь в предпробивном режиме разряд носит импульсный характер. При положительном потенциале острия на фоне постоянной составляющей практически всегда имеют место импульсы тока. Частота этих импульсов и их характер зависят от величины напряжения на разрядном промежутке. Длительность импульсов тока меняется в пределах 30 – 70 мкс, а величина тока в импульсе колеблется в пределах 10 – 50 мкА. Область малых токов (до 25 мкА) соответствует режиму пульсирующего КР. При увеличении тока наступает искровое замыкание короны, что сопровождается резким увеличением частоты пульсаций тока. Более сильное влияние на интенсификацию процесса испарения оказывает пульсирующий КР и чем больше частота этих импульсов, тем больше коэффициент интенсификации. Пульсации тока, как и звуковые колебания, вызывают относительные колебания всех трех фаз капиллярной системы, что усиливает  $\Delta h$  – эффект [9].

С развитием ИР коронный ветер постепенно исчезает, а вместе с ним и обусловленные им эффекты. Но нарастают новые, еще в большей степени нестационарные процессы [8]. Еще в предпробивной области вследствие насыщения приповерхностного объема воды ионами знака коронирующего электрода и их взаимного отталкивания возникает электрическая сила, действующая противоположно силе поверхностного натяжения при горизонтальной поверхности (силам когезии). Она суммируется с лапласовской силой вогнутого мениска, способствуя дополнительному подъему жидкости. При некоторой критической величине заряда  $q_k$  наступит преобладание электрической силы над силами поверхностного натяжения и гравитации. В результате нарушается устойчивость поверхности жидкости. Визуально неустойчивость проявляется в выбросе высокодисперсных капелек с поверхности мениска. Они увлекаются отраженными от поверхности жидкости электрогазодинамическими потоками [18] и отбрасываются на стенки капилляра на

разные, в том числе довольно значительные расстояния от поверхности жидкости. Иногда они оседают даже на коронирующем электроде, изменяя параметры КР и КВ [19]. Выброс струек капелек наблюдается и с заряженных капелек.

Впервые теоретическое изучение капиллярных колебаний и критерий устойчивости заряженной, идеально проводящей капли были представлены Рэлеем в [20]. Он представил каплю как колебательную систему с бесконечным набором собственных частот колебаний. При этом номер моды соответствовал числу выпуклостей (или впадин) на поверхности капли. Наименее устойчивой оказалась основная (вторая) мода. Капля становится неустойчивой и выбрасывает струйки капелек. При превышении зарядом рэлеевского предела у нее не существует равновесных сферических форм. Появление неустойчивости более высоких мод капиллярных волн приводит к нелинейной динамике поверхности капли [21]. Возможно, это ведет к развитию спонтанных колебаний столбика жидкости и к выбросу капелек, поскольку в определенном приближении его можно рассматривать как последовательность удлиняющихся вытянутых эллипсоидов с частотами и амплитудами, отличными от начальной стадии реализации неустойчивости.

При дальнейшем повышении напряжения, вызывающем ИР, амплитуда и частота таких колебаний настолько увеличивается, что основной столбик при возвращении к положению равновесия разрывается на ряд более мелких частей. Между вторичными столбиками образуются пузырьки паровоздушной смеси, которые продвигаются вглубь капилляра, заполненного жидкостью основного столбика. Это означает, что вода по смачивающей пленке, которая покрывает участок капилляра между менисками пузырьков, перекачивается в область большей неоднородности поля ближе к устью капилляра. Подобный эффект был отмечен и ранее [13] для тонких капилляров. В капиллярах больших диаметров в результате флуктуации толщины толстой неравновесной смачивающей пленки, а также уменьшения ее толщины, вследствие развития ИР не только по оси трубки, но и по пленке, последняя подсушивается. В результате вторичные столбики разрушаются и в виде крупных капелек соскальзывают на поверхность мениска основного столбика, увеличивая его длину.

С последующим увеличением напряженности ЭП увеличивается и 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, обусловленные струйным течением [22] и термоэлектрическими эффектами [23]. Но одновременно проявляются термоосмотические течения и уменьшение толщины смачивающей пленки вследствие ее испарения. Все эти явления действуют в противоположных направлениях относительно высоты подъема 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 пузырьки, 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 итоге в знаменателе формулы (11) уменьшается разность плотностей воды и пара, что увеличивает  $\Delta h$  – эффект. Последнему также способствует вытягивание пузырьков вдоль поля, то есть вдоль оси капилляра. В результате эффекта Эвершеда возникает относительное движение жидкости и пузырьков, что стимулирует перетекание части жидкости из области слабого в область сильного поля [24].

С переходом ИР в более насыщенную форму (при дальнейшем повышении напряжения) стремительно увеличивается джоулев разогрев всех трех фаз, что вызывает изменение всех физических свойств, включая плотности и поверхностные натяжения. 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 [25]. 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 возросло сопротивление как сухих стенок капилляра, так и осушенной газовой среды. Но при этом настолько же значительно возросла неоднородность ЭП вдоль стенок и в объеме канала капилляра. Толстая пленка воды по стенке стремительно вытягивалась к электроду, а за ней также быстро продвигался и столбик жидкости. Как только расстояние между столбиком воды и электро-

дом сокращалось до пробивного, следовал импульс конденсированного ИР. После этого реализовывались предыдущие процессы и столбик снова резко опускался.

При дальнейшем незначительном увеличении напряжения энергия импульса возрастала настолько, что разрушалась пленка адсорбированной влаги, а материал стенки капилляра подвергался электроискровой эрозии. Удар высокоскоростного импульса плазмы о поверхность воды обеспечивал довольно высокое выплескивание воды на стенки, так что отдельные капли вылетали за пределы капилляра. Этому способствует и энергия ударной волны, сопровождающая прохождения искрового импульса через столбик воды при чередующихся расширениях и сужениях канала разряда в воде. В результате образуются интенсивные гидротоки (электрогидравлический эффект [26]), направленные вверх по стенке капилляра при расширении канала разряда и вниз – при его сужении. Поверхностная температура канала разряда в воде может достигать  $15 \cdot 10^3 - 25 \cdot 10^3$  К, что приводит к интенсивному испарению воды внутрь расширяющегося канала. Это охлаждает плазму канала, как и выполняемая работа при расширении против внешнего давления, что вызывает обратный процесс сужения образовавшейся цилиндрической полости. Снова повышается температура и давление, но до значительно меньших значений; начинается новое менее интенсивно протекающее расширение, затем снова сходящееся движение и т. д. Затухающие колебательные явления такого рода порождают в жидкости большое количество микропузырьков. При этом возможны эффекты, подобные явлению кавитации. Как известно, на заключительном этапе схлопывания кавитационных пузырьков возникают огромные давления и температуры. Их воздействие на твердую фазу капиллярной системы приводит к эрозии материала стенки и зарождению новых фаз, отличных от исходных. Локальным выделением энергии при кавитационном смыкании микропузырьков обусловлено образование микрократеров на стенках и появление твердых частиц в воде с поперечными размерами от долей микрона до нескольких десятков микрон [27]. Понятно, что происходящие процессы способствуют развитию неупорядоченных колебаний столбика воды с более значительными частотами и амплитудами.

Новое незначительное повышение напряженности ЭП в канале вследствие крайней неоднородности жидкой среды порождает локальные мощные источники тепла  $\sigma E^2$ , способствующие взрывным вскипаниям воды, что приводит к периодическим выбросам отдельных порций пара и воды с капилляра. Под воздействием электронно - ионной бомбардировки возможно распыление материала стенок и образование дефектов на поверхности кварца. Если источник высокого напряжения достаточно мощный, то при дальнейшем повышении напряжения ИР вырождается в дуговой и происходит бурное объемное испарение жидкости с возможным очаговым плавлением и даже испарением внутренней поверхности капилляра. Понятно, что в этом случае капилляр деформируется и может приобретать конусность, а также из цилиндрического превращаться в гофрированный (четочный) или иной произвольной формы сечения по его длине. Конусность может как повышать, так и понижать высоту столбика жидкости в зависимости от направления сужения. Если четочный капилляр нижним концом погружен в смачивающую жидкость, то она поднимется на высоту  $h_1$ , соответствующую высоте поднятия жидкости в цилиндрическом капилляре, радиус которого равен  $r_1$  (радиус расширения четочного капилляра) [1]. Если же четочный капилляр весь погрузить в жидкость, а затем поднять так, чтобы нижний конец оставался в жидкости, то высота столбика жидкости будет равна  $h_2$ , то есть соответствовать высоте поднятия в узком капилляре, у которого радиус равен радиусу сужения четочного капилляра  $r_2$ . Задержка жидкости на более высоком уровне, обуславливаемая нахождением мениска в суженном участке, может происходить и в капиллярах с иной структурой пространства канала.

Таким образом, в случае изменения формы внутреннего канала в дуговом разряде, после выключения ЭП вследствие капиллярного гистерезиса возможно как понижение, так и повышение уровня воды относительно исходного. Это зависит от того, где в момент выключения находился мениск. Кроме того, после выключения поля наблюдается интенсивная конденсация большой массы перегретого водяного пара на стенках капилляра и они "запотевают". Затем образуются крупные капли, которые сливаются в настолько толстую пленку, что достаточно узкий капилляр практически мгновенно полностью заполняется конденсатом. Если капилляр не достаточно узкий, то его просветность настолько уменьшается, что уровень поднявшейся жидкости значительно превосходит первоначальный.

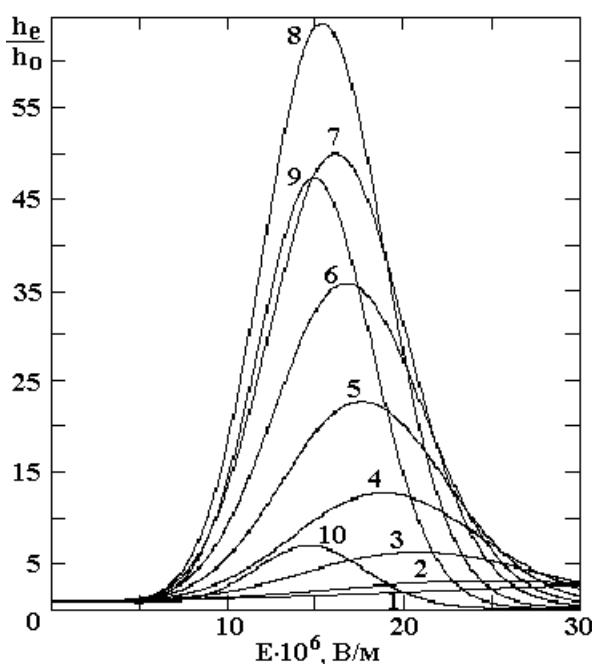
Под действием разрядного поля и тока происходят не только кавитационные и электроэрозионные явления на поверхности твердой фазы [28], но появляются и существенные электрохимические изменения свойств жидкой фазы [29]. Действительно, при насыщении дистиллиро-



ванной воды продуктами газового разряда, а также эрозии нижнего электрода и стенок капилляра, она превращается в концентрированный электролит. В его объеме под влиянием электрического тока протекают сложные физико-химические процессы, в результате которых происходят такие превращения, как коагуляция и флокуляция частиц, изменение валентности ионов при окислительно-восстановительных реакциях с участием примесей воды, формирование твердой и газовой фаз, деструкция соединений и т. д. Физико – химическое состояние электролита определяют также продукты электродных реакций. При миграции продуктов вглубь раствора происходит их химическое взаимодействие с примесями или водой. Это изменяет окислительно-восстановительные и протолитические реакции, приводящие к изменению pH и  $Eh$  раствора. При электролизе образуются растворимые продукты, а также газовая и твердая фазы. Начальная паровоздушная фаза также насыщается разнообразными продуктами газового разряда, включая и значительную концентрацию озона. Эти продукты реакционноактивны и поэтому определенное время в газовой фазе и на поверхностях остальных двух фаз могут осуществляться химические реакции.

Таким образом, после прекращения действия разрядного ЭП все три фазы капиллярной системы по своим свойствам далеко уходят от первоначально равновесного состояния. Неравновесность нового состояния вызывает интенсивные релаксационные процессы, стремящиеся вернуть систему в целом и столбик жидкости, в частности, в исходное положение. Поэтому не только в силу быстроменяющегося пространственного положения уровня жидкости при воздействии разряда, но и в силу наличия после отключения поля быстротекущих релаксационных процессов фиксация положения мениска начиналась спустя 5 минут. За это время все колебательные процессы прекращались и положение мениска стабилизировалось.

На рис. 1 представлены некоторые из полученных зависимостей  $h_e/h_0(E)$  для воды в капиллярах разных радиусов. Вначале впитывание шло без поля до достижения столбиком высоты  $h_0$ , а затем включалось поле. Через некоторый промежуток времени (обычно не более 10 мин.), когда колебания столбика жидкости стабилизировались возле определенного уровня ЭП выключалось, после чего фиксировалось положение мениска.



*Зависимость относительной высоты поднятия воды в кварцевых макрокапиллярах разных радиусов  $r_0$ , мм : 1 – 0,1; 2 – 0,5; 3 – 1; 4 – 1,5; 5 – 2; 6 – 2,5; 7 – 3; 8 – 3,8; 9 – 4,5; 10 – 4,95, от напряженности ЭП.*

Как видно из графиков, начиная с напряженностей, приблизительно равных  $3,5 \cdot 10^6$  В/м, заметно проявляется положительный  $\Delta h$  – эффект. Для меньших значений  $E$  поле на 3 – 5% повышает уровень жидкости, в капиллярах, близких за радиусами, до 3,8 мм. При этом зависимости  $h_e/h_0(E)$  близки к линейным. Это свидетельствует о практической обратимости процессов в области

доразрядных ЭП. С появлением КР ( $E_{KP} \approx 3,5 \cdot 10^6$  В/м) наблюдается отступление от линейности и тем раньше, чем больше радиус. Чем выше напряженность ЭП, тем круче идут зависимости  $h_e/h_0(E)$ , приближаясь к характерному для каждого радиуса максимуму. Эти зависимости характерны для высокоинтенсивных процессов, далеко уводящих систему от первоначального состояния равновесия. Заметное расхождение кривых происходит при достижении напряжений  $E_{KP}$ . Для широких капилляров  $E_{KP}$  определяется формулой Пика, для более узких, начиная с  $r_0 < 0,5$  мм, наблюдаются увеличения  $E_{KP}$  по сравнению с определяемыми с формулы Пика. Это связано с ограниченностью пространства, необходимого для развития внешней зоны КР.

Для одинаковых значений  $E$  влияние поля проявляется сильнее при впитывании в капилляры с большими радиусами вплоть до  $r_0 = 3,8$  мм. Дальнейшее увеличение  $r_0$  ведет к уменьшению влияния поля. Это, по-видимому, можно объяснить падением капиллярного давления с увеличением  $r_0$  и ростом относительной роли ЭП, поскольку величина объемных электрических сил не зависит от  $r_0$  для широких капилляров. При  $r_0 > 3,8$  мм капиллярное всасывание вырождается и взаимодействие трех соприкасающихся фаз, а также влияние ЭП на это взаимодействие, не может уже столь существенно изменить уровень большой массы воды в очень широкой капиллярной трубке. Однако для  $r_0 \rightarrow \infty$  уравнение (4) не теряет физического смысла за счет  $P_e$ , а вместе с ним и уравнение (11). Действительно, при относительной влажности воздуха, близкой к единице, по стенкам широкого сосуда вода все же подымается, поскольку под влиянием неоднородного ЭП изменяется величина “движущей силы” [30]

$$\Delta\sigma = K(\sigma_{31} - \sigma_{23}) - \sigma_{21}. \quad (12)$$

Здесь  $K$  – коэффициент шероховатости, определяемый уравнением Дерягина – Венцеля [3]

$$K = \cos\theta_{ш} / \cos\theta, \quad (13)$$

$\theta_{ш}$  – равновесный краевой угол на шероховатой поверхности. Так как всегда  $K > 1$ , то  $|\cos\theta_{ш}| > |\cos\theta|$ . При смачивании  $\cos\theta > 0$ , поэтому шероховатость, увеличивая  $\cos\theta$ , уменьшает угол смачивания, то есть улучшает смачивание, а следовательно, способствует повышению уровня жидкости.

Согласно [31] произведение  $rh = a^2$  называется капиллярной постоянной и при 293 К для воды на границе с собственным паром или с влажным воздухом она равна  $1,49 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>. Эта постоянная является физико-химической константой данной жидкости или, точнее, данной поверхности раздела жидкость – пар и не зависит от формы прибора, размера трубки и материала ее стенок. Очевидно, что изменение этой константы после прекращения действия ЭП указывает на изменение свойств поверхностного слоя воды в капилляре, происшедшее под действием поля. Если представить графически зависимости  $a^2(E)$  для воды в капиллярах тех же радиусов, что и на рис. 1, то из сопоставления этих рисунков будет видно, что кривые для одних и тех же радиусов симбатны. Следовательно, между глубиной изменения физико-химических свойств поверхностного слоя воды под воздействием ЭП и высотой ее подъема при фиксированном радиусе капилляра после прекращения действия поля существует прямая корреляция. Поскольку для кварца краевой угол весьма близок к нулю, к тому же он термодинамически и химически стойкий, механически прочен, то, видимо, он мало подвержен эрозии под воздействием слабых разрядных ЭП. Таковыми можно считать поля до максимумов зависимостей  $h_e/h_0(E)$  и  $a^2(E)$ . Это означает, что дополнительный подъем воды в ЭП и длительное сохранение уровня воды в капилляре после выключения поля обусловлено прежде всего глубокими изменениями физико-химических свойств воды под влиянием слабых разрядных полей. Время релаксации  $\tau_p$ , то есть промежуток времени, в течение которого высота столбика уменьшается в 2,71 раза, прямо пропорционально отношению  $E/E_{KP}$  и составляет примерно 20 суток при  $E$ , которые соответствуют максимумам указанных кривых.

Из уравнения (4) при условии  $\cos\theta = 1$  можно получить новую капиллярную постоянную

$$a = \sqrt{a^2} = \sqrt{\frac{2\sigma_{21} + P_e r_0}{(\rho_2 - \rho_1)g}}, \quad (15)$$

которая определяет характерный размер капиллярной системы  $L < a$ , при которой становятся существенными капиллярные явления [32]. Для воды при  $P_e = 0$  и температуре 293 К  $a = 3,8$  мм. Следовательно, если радиус капилляра  $r_0 = L$  будет больше 3,8 мм, то искривленные возле противоположных стенок участки поверхности воды уже не перекрываются и поднятие жидкости прекращается. Но, как видно из формулы (15), наличие неоднородного ЭП увеличивает значения  $a$  и, следовательно,  $r_0$  в тем большей степени, чем более высокие значения имеют  $E$  и  $\nabla E$ . Действительно, как видно из рис.1, при значении  $r_0 = 4,95$  мм и  $E$ , соответствующей максимуму кривой  $h_e/h_0(E)$ , ЭП вызывает заметный подъем жидкости. В наших опытах слабое капиллярное всасывание в ЭП наблюдалось при диаметре капилляра равном 10 мм. Нужно заметить, что при  $r_0 = 3,8$  мм и более величиной  $h_0$  служила высота поднятия воды возле стенки капиллярной трубки, поскольку в отсутствие ЭП поднятие жидкости на оси такого широкого капилляра равнялось нулю. Следовательно, и в таком широком капилляре после выключения внешнего поля продолжает существовать очень сильное внутреннее поле, обусловленное значительной поверхностной концентрацией зарядов. В [33] 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 дефекты – как точечные, так и протяженные. Внутреннее поле удерживает на противоположных стенках макроскопические пленки воды такой толщины, что они обеспечивают радиус жидкостного канала несколько меньшей величины характеристической капиллярной постоянной без поля. Отметим, что в работе [34] для предпробивной стадии электрического разряда под действием ЭП под металлическим электродом с полированной полусферической поверхностью диаметром 2,7 мм наблюдался подъем водного электролита в сосуде с  $r_0 \rightarrow \infty$ . При этом поверхность электролита принимала конусообразную форму, и электрический пробой разрядного промежутка осуществляется между электролитным “острием” и металлическим электродом.

Существование максимумов на кривых зависимостей  $h_e/h_0(E)$  и  $a^2(E)$ , особенно четко выраженных для капилляров с большими радиусами, свидетельствует о смене механизмов влияния при значительном увеличении  $E$  внешнего ЭП на свойства взаимодействующих фаз. Как показали наблюдения, значения  $E_m$ , отвечающие максимумам указанных кривых, соответствуют переходу слабotoчного КР в сильноточный ИР. Постепенное вырождение КР влечет за собой значительное уменьшение степени насыщения ионами поверхностей твердой и жидкой фаз, а это равносильно уменьшению центров дальнедействующих пондеромоторных сил, удерживающих макроскопические пленки воды на внутренней поверхности капилляра и дополняющих лапласовые силы на поверхности мениска, ответственные за подъем жидкости в капилляре. Естественно, это обуславливает постепенное снижение уровня жидкости в капилляре после прекращения действия поля, хотя напряженность его была гораздо выше значения  $E_m$ . Вместе с тем развитие интенсивного ИР при дальнейшем увеличении  $E$  ( $E > E_m$ ) приводит к значительной электроэрозии внутренней поверхности капилляра, внедрению в нее “отравляющих” продуктов в виде разнообразных химических соединений, образующихся в воздухе и воде под действием ИР. Разогрев поверхности канала капилляра ведет к удалению таких мощных адсорбционных центров, как группы ОН, взаимодействующие с молекулами воды по механизму водородных связей. Согласно [35] разупрочняющее влияние плазмы газового разряда увеличивается по мере роста напряжения разряда и обусловлено разогревом поверхности стекла, десорбцией воды из поверхностного слоя стекла, а также химическим взаимодействием частиц плазмы с компонентами стекла. Все это стимулирует развитие гидрофобизации поверхности твердой фазы, а следовательно, и водоудерживающей способности стенок капилляра. Толщина смачивающих пленок воды резко уменьшается, а с ней увеличивается просветность жидкостного канала, что ведет к снижению высоты столбика воды в капилляре после снятия действия поля. Во второй своей части кривая  $a^2(E)$  уже не может быть совокупностью физико-химических констант данной жидкости при разных  $E$  поля или, точнее, данной поверхности раздела жидкость – пар и не зависит от формы прибора, размера трубки и материала ее стенок. Теперь она может характеризовать изменение краевого угла смачивания за счет изменения всех трех величин поверхностных натяжений в формуле (2). Падение значений  $a^2$  обусловлено коренным изменением свойств приповерхностного слоя твердой фазы, а с ними и адгезионной способности по отношению к воде [33, 35].

Как видно из рис. 1, при  $E \gg E_m$  падение адсорбционной способности приводит к такой потере смачивающих свойств, что  $\cos\theta$  приобретает все меньшие значения и уровень жидкости опускается ниже исходного, то есть отношение  $h_e/h_0$  становится меньшим единицы после прекращения действия поля. Для широких капилляров это отношение сравнительно быстро стремится к нулю. Чем уже капилляр, тем при более высоких  $E \gg E_m$  наблюдается это явление. С уменьшением радиуса капилляра происходит размывание максимумов, а само значение  $E_m$  стремительно смещается в область более высоких напряженностей. Это связано с тем, что с уменьшением диаметра капилляра для возникновения и развития КР нужно резко увеличивать напряженность ЭП, поскольку объем зоны ионизации сокращается обратно пропорционально кубу радиуса. Поэтому возникновение и переход КР в ИР в узких капиллярах происходит при гораздо больших напряженностях, чем в капиллярах с большими диаметрами. При дальнейшем сужении канала капилляра КР может вообще не возникнуть. В таких капиллярах существенно затрудняется и возникновение ИР [36].

Результаты наших экспериментов хорошо согласуются с классической лавинно-стримерной теорией пробоя газов. Согласно этой теории образованию проводящего канала между электродами предшествует развитие электронной лавины, распространяющейся от катода к аноду. До тех пор, пока диаметр капилляра превышает размер головки лавины, ограничение объема разрядного промежутка на его электрической прочности не сказывается. В том случае, когда диаметр капилляра становится меньше головки лавины, стенки его препятствуют процессу развития разряда, поэтому требуется дополнительная затрата энергии, выражающаяся в увеличении пробивной напряженности  $E_{пр}$ . Все это указывает на то, что критические значения диаметра капилляра, начиная с которых наблюдается увеличение  $E_{пр}$  воздуха в них, должны быть соизмеримы с максимальными размерами головки лавины в момент стримерообразования. Экспериментальные данные, полученные Ретером в камере Вильсона [37], показывают, что максимальный радиус электронной лавины в момент стримерообразования при пробое воздушного промежутка в 1 см лежит в пределах 0,07–0,13 мм.

Полученные экспериментальные данные показали, что начиная с радиуса 0,1 мм и меньше для возбуждения в капилляре ИР необходимо почти экспоненциальное нарастание пробивной напряженности ЭП. Сравнивая приведенные значения радиусов электронной лавины с критическим размером радиуса использованных капилляров, нетрудно убедиться в их хорошем соответствии. Экспериментальные данные согласуются с теоретическими представлениями о пробое газов в том смысле, что критическое значение радиуса в 0,1 мм при длине капилляров больше 1 см не зависит от их длины [37]. Экспериментальные исследования электрической прочности воздуха в капиллярно-пористых диэлектрических средах (пористые стекла, имеющие одинаковую твердую фазу и отличающиеся лишь размерами пор) показали [36], что качественная зависимость электрической прочности этих тел, включая и бетоны, от размеров пор имеет такой же характер, как и у одиночных капилляров. Поэтому полученная в данной работе информация по подъему воды в одиночных капиллярах в ЭП может быть применима к реальным оводненным капиллярно-пористым системам.

Таким образом, неоднородные ЭП, в особенности слаботочные разрядные поля, способны существенно влиять на подъем в широких капиллярах воды, которая в своем объеме почти на два порядка ослабляет напряженность внешнего ЭП. При насыщении поверхностного слоя воды ионами прибавляется экранирующее действие ее поверхности, которое существенно дополняет объемный эффект ослабления поля. Но, тем не менее, благодаря взаимодействию в данном капиллярном явлении трех фаз и воздействию на них внешнего неоднородного ЭП, особенно разрядного, уводящего оводненную гетерогенную систему далеко от первоначального равновесного состояния за счет значительного изменения поверхностных свойств ее фаз и в первую очередь жидкой фазы, происходит значительный подъем жидкости в широких макрокапиллярах. Подобный электрогидродинамический  $\Delta h$  – эффект может быть использован для интенсификации процессов фильтрации воды и пропитки реальных капиллярнопористых систем, а также для ускорения процесса сушки их за счет подъема зоны испарения свободной воды ближе к поверхности тела с последующим диспергированием ее и выброса капелек за пределы тела без затрат теплоты фазового перехода [38]. Согласно [39], высокая концентрация ионов даже в дистилляте, а тем более в водопроводной воде, на порядки превышающей концентрации ионов в жидких диэлектриках (трансформаторное масло и др.), приводит к увеличению плотности объемных зарядов  $\rho_e$ , возникающих в электролитах как в области межфазных границ (объемный заряд двойного электрического слоя), так и

вследствие электростатической индукции (струи, капли, пленки). Это ведет к пространственному разделению ионов, а следовательно, к образованию отрицательных и положительных зарядов, отстоящих в пространстве на диаметр капли, струи (в рассматриваемом случае столбика воды), толщину пленки. Возникающие заряды можно представить как дипольные структуры с плотностью зарядов  $+\rho_{0c}$  и  $-\rho_{0c}$ , притягивающихся между собой с силой  $f_k = -\rho_{0c}^2/r^2$  [40]. На этом этапе происходит превышение сил притяжения над силами отталкивания, когда капля или столбик воды приобретает лишь заряды одного знака при более высоких полях. В последнем случае происходит значительное изменение свойств воды вследствие обогащения окислами азота, озоном, абсорбции различных продуктов разряда. Это явление способствует улучшению питания растений и других объектов живой природы за счет насыщения природных вод указанными продуктами при грозах и передвижению влаги в сильных атмосферных полях.

Естественно, высказанные здесь соображения являются во многом гипотетическими и потребуют дальнейшей проверки и уточнения. Однако вся совокупность данных укладывается в некоторую общую картину. Это позволяет с немалой величиной вероятности надеяться на достоверность основных концепций, использованных нами при объяснении происходящих процессов в заполненных водой широких макрокапиллярах как в присутствии полей, так и после прекращения их воздействия.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М., 1954.
2. Эйзенберг Д., Кауцман В. Структура и свойства воды / Пер. с англ. А.К. Шамелина. Л., 1975.
3. Каминский В. А., Павленко А. М., Шаумян А. И. Влияние электростатического поля на давление насыщенного пара // Электронная обработка материалов. 1977. № 6. С. 39–40.
4. Иоффе 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.
5. Бродская Е. Н., Русанов А. И. О влиянии произвольно направленного электрического поля на поверхностное натяжение жидкостей // Коллоидный журнал. 1983. Т. XLV. № 4. С. 636–643.
6. Nicolis G., Prigogine I. Self-organization in Nonequilibrium System, N. Y., Wiley, 1977.
7. Штайнхен А., Санфельд А. Термодинамическая устойчивость заряженных поверхностей: В моногр. Современная теория капиллярности: К 100-летию теории капиллярности Гиббса / Под ред. проф. А.И. Русанова (СССР) и проф. Ф.Ч. Гудрича (США). Л., 1980.
8. Пастухов В.Н. Исследование внутренней структуры канала электрического разряда в воде // Электронная обработка материалов. 1982. № 4. С. 50–55.
9. Кардашев Г. А., Соболев В. Д., Чураев Н.В., Шаталов А. Л. Влияние колебаний на уровень жидкости в капилляре // Коллоидный журнал. 1976. Т. XXXVIII, № 3. С. 461–466.
10. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов. М., 1982.
11. 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.
12. 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.
13. Карпович И.Н., Чураев Н.В., Панченко М.С. Влияние поля коронного разряда на испарение жидкостей из капилляров // Инженерно-физический журнал. 1981. Т.XLI, № 6. С. 1049–1056.
14. Бабеня Л. А., Головейко А. Г., Новикова В. И. и др. Интенсификация испарения жидкостей под действием слаботочного высоковольтного разряда // Инженерно-физический журнал. 1986. Т. L, № 6. С. 951–959.
15. Ершов А. П., Зорин З. М., Соболев В. Д., Чураев Н. В. Кинетика движения пузырька газа в капилляре // Коллоидный журнал. 2001. Т. 63. № 2. С. 200–207.
16. Денисов А.А., Нагорный В.С. Электрогидро- и электрогазодинамические устройства автоматизации. Л., 1979.
17. 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.
18. Болога М.К., Руденко В.М. Об интенсификации испарения жидкости под воздействием электрического поля // Электронная обработка материалов. 1975. № 3. С. 37–40.

19. Григорьев А.И., Голованов А.С., Григорьева И.Д. О критических условиях возникновения огней св. Эльма // Электронная обработка материалов. 2001. № 1. С. 21–30.
20. Rayleigh J. W. S. On the equilibrium of liquid conducting masses charged with electricity // Physophical Magazin. 1882. V. 14. P. 184–186.
21. Ширяева С.О., Белоношко Д.Ф., Григорьев А.И., Голованов А.С. Нелинейные капиллярные колебания заряженной капли // Электронная обработка материалов. 2001. № 2. С. 26–35.
22. Штернер С.Р. Возникновение струйного течения закритических водных растворов электролитов при джоулевым разогреве в тонких капиллярах // Инженерно-физический журнал. 1981. Т. XXXX. № 2. С. 213–217.
23. Саранин В.А. Движение жидкости, обусловленные термоэлектрическими эффектами // Электронная обработка материалов. 2001. № 1. С. 30–34.
24. Коробейников С.М. Деформация пузырьков в электрическом поле // Инженерно-физический журнал. 1979. Т. XXXVI. № 5. С. 882–884.
25. 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.
26. Гак Е.З. Гидродинамические эффекты в водных средах в электрических и магнитных полях // Инженерно-физический журнал. 1982. Т. XLIII. № 1. С. 140–153.
27. Меркулова С.П., Шелетин Л.А. Об особенностях импульсного воздействия на твердые материалы // Инженерно-физический журнал. 1979. Т. XLVIII. № 5. С. 812–815.
28. Намитоков К.К. Электроэрозионные явления. М., 1978.
29. Рогов В.М., Филипчук В.Л. Электрохимическая технология изменения свойств воды. Львов, 1989.
30. Биховський А.І. Деякі випадки застосування електрокапілярності // Український хімічний журнал. 1974. Т. 40. № 5. С. 478–482.
31. Физический энциклопедический словарь. Т.2, М., 1962. С. 278–279.
32. Физическая энциклопедия. Т.2, М., 1990. С. 240–241.
33. Богомолова Л.Д., Жачкин В.А. Парамагнитные центры в ион – имплантированных неорганических стеклах // Физика и химия стекла. 1998. Т. 24. № 1. С. 3–30.
34. Дураджи В.Н. Об электрическом импульсном разряде между металлическим и электролитным электродами // Электронная обработка материалов. 2001. № 3. С. 22–26.
35. 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.
36. Бернацкий А.Ф., Целебровский Ю.В., Чунчин В.А. Электрические свойства бетона. М., 1980.
37. Ретер Г. Электронные лавины и пробой в газах. М., 1968.
38. Панченко М.С., Чураев Н.В., Панасюк А. Л., Мосиевич О.С., Марченко Е.М. О возможности электронно – ионной сушки керамического материала // Электронная обработка материалов. 1986. № 5. С. 37–41.
39. Гак Е.З. Электрогидродинамические явления в водных электролитах и их применение к решению задач электромагнитной гидродинамики // Электронная обработка материалов. 2001. № 4. С. 29–36.
40. Жаров Н. А., Григорьев А. Н. Капиллярные колебания заряженного пузырька в жидкости // Электронная обработка материалов. 2001. № 4. С. 15–21.

*Поступила 12.01.02*

### **Summary**

Discharging fields can influence on water raining in broad quartz macrocapilars thanks to interaction of three phases and influence on them outside nonuniform electric fields. Influence and afterinfluence effects on this fact are cased by a considerable changing of surface properties of moisture and solid phases.

---