

ВЛИЯНИЕ ВЛАГОПЕРЕНОСА НА ТЕПЛОПЕРЕНОС ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕОДНОРОДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В КАПИЛЛЯРНЫХ ТРУБКАХ

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

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

Из всех процессов переноса в капиллярно–пористых телах (КПТ) наиболее часто реализуются явления переноса влаги и тепла под действием ∇W и ∇T . При их совместном действии происходит взаимосвязанный массо- и теплоперенос. Значительное влияние на изменение всех теплофизических параметров КПТ, включая и $\lambda_{эф}$, оказывает W [1, 2]. Физически это объясняется тем, что при увлажнении КПТ из их пор удаляется воздух, плохо проводящий тепло. Он заменяется влагой, значительно лучше проводящей тепло. При изменении W различной пористости КПТ от абсолютно сухого состояния до полной влагоемкости величина $\lambda_{эф}$ изменяется в 5 и даже 10 раз.

Взаимодействие пористых материалов с влагой происходит преимущественно под влиянием постоянных и переменных электрических полей (ЭП) природного и промышленного происхождения [3]. Неоднородные электрические поля (НЭП) влияют на динамику массообмена в КПТ за счет силового воздействия как на отдельные дипольные молекулы воды в адсорбированном состоянии и в фазе пара, так и на ее конденсированные образования в капиллярах, а также на поверхностные и объемные заряды гидратированных ионов в жидкой фазе. Они воздействуют и на пористый скелет твердой фазы, вызывая его неоднородную поляризацию и электрострикцию [3–5]. Существуют и другие факторы, вызывающие ускоренное движение воды в КПТ. Поэтому теплоперенос во влажных КПТ, которые находятся в разнообразных ЭП, должен рассматриваться в неразрывной связи с влагопереносом. Следовательно, задача определения потока тепла при взаимосвязанном массо- и теплопереносе во влажных КПТ в условиях действия внешних ЭП имеет актуальное значение, поскольку научно-технический прогресс в различных областях техники и технологий неразрывно связан с использованием ЭП высоких E .

Влажные КПТ во внешнем НЭП – это поляризованные системы, в которых приложенные напряженности электрических полей релаксируются. Следовательно, такие системы являются релаксационно–поляризованными. Поэтому в доразрядных НЭП поток влаги в КПТ определяется соотношением [2]:

$$J = -a_m \rho_0 \nabla W - a_m^T \rho_0 \nabla T - a_m^3 \pi_3 \nabla E, \quad (1)$$

где первый член обозначает величину диффузии влаги, второй – термодиффузию влаги, третий соответствует переносу влаги под действием НЭП. Последний вид переноса является электродиффузией влаги. Он отличается от электроосмотического массопереноса и его существование подтверждено в работах [3, 4]. Эти исследования проведены в изотермических условиях или близких к ним.

Для отдельного цилиндрического капилляра как простейшей модели КПТ по аналогии с (1) можно записать

$$j = -\Phi_w \nabla w - \Phi_T \nabla T - \Phi_3 \nabla E, \quad (2)$$

где Φ_w , Φ_T , Φ_3 – сложные функции текущего радиуса капилляра, вязкости жидкости, влагосодержания, температуры, а также напряженности ЭП. Представить их в явном виде без знания механизмов потоков, существующих в капилляре, при этих условиях невозможно.

Во влажном КПТ вместе с переносом энергии по твердой фазе в виде тепла происходит перенос внутренней энергии за счет влагопереноса, на который влияет НЭП [2–5]. Поля высоких E вызывают в дисперсных системах ряд эффектов, представляющих практический и теоретический интерес. В частности, наблюдаются потоки жидких полярных диэлектриков в ЭП с напряженностью 10^5 – 10^7 В/м. Их существование обусловлено возникновением объемных и поверхностных сил вследствие неоднородной поляризации фаз, объемного заряда в приэлектродных областях жидкости, наличием границы раздела фаз, где реализуются скачок диэлектрической проницаемости, а также двойной электрический слой или нескомпенсированный заряд. Эти явления следует учитывать при интерпретации электрофизических процессов в дисперсных системах. Они, как правило, представляют собой гетерогенные и многокомпонентные системы. В присутствии ряда неоднородных силовых полей, вызывающих совокупность прямых, перекрестных и компенсирующих потоков, выделить роль воздействия НЭП сложно. Необходимо ввести ряд упрощений, фактически сводящих данную многофазную и многокомпонентную систему к модельной. К тому же при наличии разрядных полей капиллярные процессы существенно неравновесные. Следующее рассмотрение ориентировано на выяснение возможной роли в них электрогидродинамических эффектов, и поэтому воспользуемся упрощенной квазиравновесной моделью в виде цилиндрического макрокапилляра, впитывающего воду.

Цель данной работы – изучение влияния электро- и термогидродинамических процессов на теплоперенос в простейшей модели элемента порового пространства в виде цилиндрического макрокапилляра [5] с градиентом температуры по его длине, расположенного между электродами игла–плоскость, в котором происходит перенос тепла при движении жидкости, например при впитывании нагретой воды в условиях воздействия доразрядных и разрядных ЭП.

Известно, что средняя линейная скорость переноса прямо пропорциональна квадрату радиуса капилляра и обратно пропорциональна длине столбика жидкости в капилляре [1]. В микрокапиллярах ($1 \cdot 10^{-7} > r_0 > 1 \cdot 10^{-9}$ м) скорость движения жидкости на несколько порядков меньше, чем в макрокапиллярах. Однако при положении под углом к горизонту перемещение воды в макрокапиллярах лимитируется противодействием силы тяжести. Такие макрокапилляры являются капиллярными трубками, или широкими капиллярами.

Возможный механизм влияния НЭП на высоту поднятия воды в широких макрокапиллярах (статика процесса впитывания), когда необходимо учитывать влияние силы тяжести, то есть выполняется условие $2\sigma\cos\theta/r_k \leq \rho_bgh$, рассмотрен в [6]. До этого влияние НЭП на капиллярное движение жидкости рассматривалось для сравнительно узких капилляров, от нескольких до десятков микрон, где влиянием гравитационного потенциала можно пренебречь по сравнению с капиллярным потенциалом [7]. Такие макрокапилляры считают тонкими. Согласно [6], объемные и поверхностные электрические силы способны изменить высоту подъема жидкости в капиллярной трубке. Эти же силы будут влиять и на кинетику перемещения жидкости в широком капилляре, изменяя скорость ее движения.

В [2] поток тепла во влажном КПТ определяется соотношением

$$J_T = -\lambda_{тс} \nabla T + \sum_i I_i j_i. \quad (3)$$

Для отдельного капилляра уравнение (3) при впитывании воды переписывается в виде

$$J_T = -\lambda_T \nabla T + I_j j_b. \quad (4)$$

Поток воды в капилляре с текущим радиусом r определяется формулой

$$j_b = \rho_b v(r). \quad (5)$$

В [8] на основе неравновесной термодинамики проведен вывод уравнений для потоков массы и заряда в цилиндрическом микрокапилляре, стенки которого оказывают влияние на термодинамические свойства основной массы жидкой фазы. Но они пригодны лишь для микрокапилляров, где физические параметры капиллярной жидкости, в особенности в пределах двойного электрического слоя, заметно отличаются от свойств объемной жидкости, с которой с двух концов контактирует рассматриваемая капиллярная система. К тому же вклад электроосмотического массопереноса в общий поток жидкости в макрокапилляре при обычных потенциалах ЭП крайне мал. Усредненный поток массы по сечению капилляра можно найти из выражения

$$\bar{j}_b = \rho_b \bar{v}. \quad (6)$$

Для вычисления \bar{v} , а затем и \bar{j}_b в широком макрокапилляре целесообразно использовать решение дифференциального уравнения А.П. Порхаева [9]:

$$\frac{d^2l}{dt^2} + \frac{1}{l} \left(\frac{dl}{dt} \right)^2 + \frac{8\eta}{r_k^2 \rho_b} \frac{dl}{dt} - \frac{2\sigma \cos \theta}{r_k \rho_b l} + g \sin \alpha = 0. \quad (7)$$

Уравнение (7) получено для случая, когда один конец капилляра погружен в жидкость, и предположительно, что вдали от мениска имеет место параболический закон распределения скоростей. В обычных условиях опытов (квазистационарный режим впитывания) первым и вторым членами уравнения (7) можно пренебречь. Тогда это уравнение можно написать так [1]:

$$\bar{v} = \frac{dl}{dt} = \frac{r_k^2 \rho_b}{8\eta} \left(\frac{2\sigma \cos \theta}{r_k \rho_b l} - g \sin \alpha \right). \quad (8)$$

Из (8) следует, что \bar{v} зависит от угла α . Даже небольшое его увеличение способно существенно изменить скорость движения жидкости в широком капилляре за счет возрастания составляющей гравитационного ускорения $g \sin \alpha$ [10].

С целью более детального изучения влияния массопереноса на теплоперенос в НЭП отвлечемся от воздействия гравитационного поля на массо- и теплоперенос. Если широкий капилляр расположен горизонтально, то есть $g \sin \alpha = 0$, получим

$$\bar{v} = \frac{dl}{dt} = \frac{r_k^2 \rho_b}{8\eta} \left(\frac{2\sigma \cos \theta}{r_k \rho_b l} \right). \quad (9)$$

После начального периода релаксации скорость впитывания стремительно падает и становится незначительно отличной от нуля для длинных капилляров. Поскольку выражение в скобках (9) имеет физический смысл ускорения, то увеличить \bar{v} можно за счет ускорений, приобретаемых незаряженной и заряженной жидкостями в доразрядных и разрядных НЭП. Тогда (9) принимает вид

$$\bar{v} = \frac{r_k^2 \rho_b}{8\eta} \left(\frac{2\sigma \cos \theta}{r_k \rho_b} \cdot \frac{1}{l} + \frac{f}{\rho_b} \right), \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} f = & \sigma_p^e \nabla E \cos \psi - 0,5 \varepsilon_0 E^2 \nabla \varepsilon + 0,5 \varepsilon_0 \nabla [E^2 (\partial \varepsilon / \partial \rho_b)_{T, \rho_b}] + \rho_e E + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon z}{\Phi_0 h_e} \int \left(\frac{l}{\gamma} \right)^2 \left(\frac{ldr}{\gamma} \right) - \\ & - \frac{\Delta p}{\delta} + \frac{\sigma_e^2}{2 \varepsilon_0 \varepsilon_1 h_s} + \frac{q^2 \cos^4 \theta}{16 \pi^2 \varepsilon_0 \varepsilon_1 r_k^4 h_s} + \\ & + \frac{0,5 \varepsilon_0 \varepsilon_1}{\delta^3} \cdot \frac{U^2}{\left(r_k - \chi - \frac{\chi}{a} \right) \ln \left(r_k / \left(r_k - \chi - \frac{\chi}{a} \right) \right)^2} - 0,5 \varepsilon_0 E^2 \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial T} \right)_{\rho_b} \nabla T - \end{aligned} \quad (11)$$

плотность пондеромоторных сил НЭП, действующих на объемную жидкость и переходной слой, включая мениск [2–7, 11–14].

Первый член в (11) определяет силу втягивания столбика воды как макродиполя в область максимальной напряженности поля. Второе слагаемое представляет силу, действующую на единицу объема незаряженной жидкости в изотермических условиях при взаимодействии НЭП с поляризованными зарядами. За счет изменения ε на границе раздела фаз жидкость–паровоздушная среда изменяется и величина E , что обуславливает втягивание диэлектрической жидкости в зону большей напряженности поля, то есть в область меньших значений ε (газ). На границе жидкость–паровоздушная среда механические силы ЭП действуют в направлении, противоположном силам поверхностного натяжения жидкости, что при определенных условиях приводит к разрушению границы раздела, дроблению жидкости и перестройке структуры течения как жидкости, так и пара в капилляре. Направление этих сил совпадает с направлением действия лапласового давления.

Третий член отражает ситуацию, когда в жидкости действуют факторы, вызывающие изменение плотности вдоль столбика жидкости. Это неоднородное распределение абсорбированных или растворенных компонентов, механических примесей, пузырьков воздуха или капель других жидкостей. Здесь учитывается изменение плотности жидкости вблизи ее поверхности при изменении E , поскольку под воздействием мениска она находится в растянутом состоянии. Как следствие, возникает дополнительная движущая объемная сила, которую часто называют стрикционной. В жидких и твердых диэлектриках стрикционные силы и натяжения – величины одного порядка с максвелловыми

силами и натяжениями (ибо $\rho_v(\partial\epsilon/\partial\rho_v)_T$ одного порядка с ϵ). Если тело окружено вакуумом, то стрикционные силы и натяжения влияют только на распределение сил по объему тела, но не влияют ни на величину равнодействующей всех сил, ни на их момент. Когда тело погружено в диэлектрик, то стрикционные силы влияют на равнодействующую. Если жидкость не находится в равновесии, то неучет электрострикции приведет к значительной ошибке [11]. Система натяжений в ЭП сводится к тяге $0,5(\epsilon + (\partial\epsilon/\partial\rho_v)_T \rho_v)E^2$ в область большей плотности энергии поля.

Для заряженной жидкости объемная пондеромоторная сила поля определяется четвертым слагаемым. Вода, даже бидистиллированная, является электролитом. При включении ЭП происходит электролитическая поляризация, то есть катионы преобладают над анионами возле катода, и наоборот. Это происходит за счет электропроводности. Если жидкость контактирует только с положительным электродом, то она приобретает объемный положительный заряд вследствие нейтрализации анионов.

В [15] показано, что в водном электролите, помещенном между двумя электродами, при прохождении постоянного электрического тока возникает отклонение от электронейтральности и, как следствие, происходит специфическое неоднородное распределение γ и E . Причинами токовой неустойчивости являются разные неоднородности (газовые пузырьки, пылинки, абсорбированные компоненты), различие скоростей компонентов, изменение температуры. Попутно в жидкости возникают объемные заряд и сила, определяемая пятым слагаемым.

Шестое слагаемое в (11) определяет изменение ускорения жидкости за счет давления на поверхность мениска ветра коронного разряда (КР) или низкотемпературной плазмы искрового разряда (ИР) в паровоздушной среде при расстоянии $\delta = h_e - l$ между мениском и коронирующим электродом. Знак минус указывает на то, что плазма разрядов обоих видов уменьшает скорость движения жидкости в капилляре, хотя одновременно их сильные поля за счет предыдущих составляющих (11) существенно ускоряют движение жидкости.

Седьмое слагаемое отражает тот факт, что при насыщении поверхностного слоя, включая мениск, ионами одного знака, например при КР, они, взаимно отталкиваясь, оказывают давление в направлении устья капилляра. Оно противоположно силам межмолекулярного взаимодействия в поверхностном слое жидкости и поэтому стремится разорвать ее столбик. Это аналогично тому, когда сильно вытянутая заряженная проводящая капля испытывает деформацию вплоть до разрыва на две или более частей (капелек), находясь в сильном внешнем ЭП [16]. Разрыв столбика капиллярной жидкости в тонком кварцевом капилляре под действием сильного ЭП наблюдался в [17].

Восьмой член свидетельствует о том, что если растущий столбик жидкости в канале диэлектрической капиллярной трубки уподобить струе, то под воздействием сильного ЭП, направленного вдоль ее при определенном критическом значении $E_{кр}$, происходит изменение условий разрушения на капли. В [18] струя жидкости между двумя горизонтальными плоскими электродами (первичное ЭП – однородно) рассматривалась как проводящий выступ с зарядом $q_{кр}$ в форме половины вытянутого эллипсоида вращения, соединенного с одним из электродов. Размер большой полуоси эллипсоида – l ; малая полуось в рассматриваемом случае равна r_k . Расстояние между электродами велико по сравнению с размерами проводящего выступа l , то есть $h_e \gg l$, что, в принципе, соответствует предлагаемой модели исследования. Напряженность ЭП, при которой происходит разрушение струи в [18], представлена в виде

$$E_{кр} \geq \frac{2q_{кр}}{l^2} \left(\ln \frac{2l}{r_k} - 1 \right). \quad (12)$$

Критический заряд $q_{кр} = (16 \pi \sigma r_k^3)^{0,5}$ сосредоточен на вершине струи перед ее распадом.

В газовом разряде жидкость и внутренняя поверхность широкого капилляра насыщаются ионами знака коронирующего электрода. Поэтому они являют собой одноименно заряженные тела. Адсорбированные на диэлектрической поверхности канала, а также имплантированные в приповерхностные слои ионы создают в капилляре ЭП напряженность, а следовательно, и ∇E которого могут на порядок и больше превосходить параметры первичного поля [19]. Это аналогично явлению высоковольтной поляризации влажной дисперсной системы. Взаимодействие между одноименно заряженными твердой стенкой капилляра и жидкостью вызывает механические силы сжатия, направленные к оси цилиндра [20]. Это приводит к выдавливанию воды из капиллярной трубки, что также изменяет скорость течения жидкости. При чем последняя стремится оторваться от стенки, что эквивалентно уменьшению толщины граничного слоя и его повышенной вязкости по сравнению с объемной жидкостью. Она проскальзывает по поверхности, как и в случае гидрофобных поверхностей, по-

сколькx силы отталкивания направлены противоположно силам притяжения между молекулами воды и адсорбционными центрами твердой фазы. Объемная механическая сила сжатия в (11) представлена предпоследним слагаемым.

Изменение в T полярных жидкостях очень влияет на ϵ , что существенно изменяет величину второго члена. На величину пондеромоторной силы влияет и последний член, отражающий тот факт, что даже в однородной по составу среде, но с ∇T вдоль нее возникает электротермогидродинамическая сила, направленная противоположно градиенту температуры [14]. Следовательно, она будет ускорять движение жидкости к холодному концу капилляра.

С изменением T изменяются величины ρ_v , σ , η и $\cos\theta$. В [21] рассмотрено влияние T на процесс течения электролита в тонких цилиндрических капиллярах при наличии диффузного электрического слоя, обусловленного специфической адсорбцией ионов на твердой поверхности и вызывающего торможение пристенных слоев при течении жидкости (электровязкость). Течение рассчитано для лиофобных поверхностей с целью выявления аномальности, связанной только с эффектом электровязкости. Влияние дополнительного насыщения ионами диффузного слоя и твердой поверхности не учитывалось.

Насыщение воды ионами одного знака, так же как и температура, разрушает первичную структуру объемной жидкости и граничного слоя за счет гидратации ионов, что изменяет ее вязкость [21, 22], а также подавляет двойной электрический слой. Возможен вариант, когда плоскость скольжения сливается с поверхностью твердой фазы. Это указывает на уменьшение толщины как граничного слоя, так и двойного электрического слоя. Следовательно, уменьшается тормозящее действие обоих слоев на движение объемной жидкости с увеличением как концентрации ионов, так и ее T . При этом на внутренней поверхности капилляра межфазная адгезия уменьшается, а следовательно, уменьшится межфазное поверхностное натяжение; изменится и краевой угол смачивания [23].

Следовательно, зарядение жидкости и твердой фазы ионами одного знака приводит к уменьшению и структурной вязкости, и электровязкости граничных слоев жидкости. Это ведет к изменению режима течения жидкости в капилляре. Так как граничные слои лежат в пределах двойного электрического слоя, их наличие или отсутствие в капиллярах и дисперсных системах должно сказываться не только на гидродинамике течения, но и на электрокинетике. По мнению авторов [23], фактор влияния зарядов поверхности и жидкости необходимо учитывать при всех исследованиях граничных взаимодействий в системе диэлектрик–жидкая среда.

Несмотря на кажущуюся простоту явления капиллярного впитывания, многие экспериментальные результаты пока не удается объяснить в рамках единой теории, учитывающей как гидродинамические, так и физико-химические эффекты. Действительно, при изучении поведения краевых углов и формы менисков нужно учитывать влияние таких факторов, как их существенные зависимости от скорости движения мениска [24]. Заметное влияние оказывает также состояние поверхности капилляра: толщина адсорбционной пленки, шероховатость, гетерогенность поверхности, химический состав поверхностей раздела и изменение его в процессе контакта фаз, а также воздействия на них доразрядных и разрядных ЭП и многих других факторов, в частности наиболее мощного из них – T .

В [1, 2, 21] указывается, что одним из основных факторов, позволяющих оказывать значительное воздействие на интенсивность влагопереноса в КПП, является его температура, причем скорость процесса пропорциональна T^m . Значение m зависит от вида КПП, его структуры и влагосодержания и колеблется в диапазоне 6–20. При этом с ростом температуры от 293 до 373 К поверхностное натяжение воды почти линейно уменьшается, а краевой угол смачивания для системы вода–кварц слабо зависит от температуры [25]. Однако, как отмечается в [26], в этих опытах измерения наступающего краевого угла по поднятию мениска в щели и отступающего по его опусканию велись на поверхности кварца, уже смоченной водой, так как углы находились как средние из ряда повторных измерений. Это означало, что углы определялись не в равновесии с α -пленкой, образованной в результате адсорбции пара перед наступающим мениском, а при контакте мениска с остатками более толстой метастабильной β -пленки, образующейся за отступающим мениском. В [27] показано, что краевые углы воды на стекле, измеренные методом сидячей капли, существенным образом зависят от T . Так, при повышении T от 293 до 353 К краевые углы линейно возрастали от 20 до 40°. При этом положительный прирост краевого угла с T был тем выше, чем больше гидрофильная поверхность стекла. Такой эффект можно связать с большей температурной чувствительностью толстых α -пленок. Это обусловлено тем, что тепловое разрушение особой структуры воды α -пленок затрагивает прежде всего наиболее отдаленные от поверхности слои, где силы структурного дальнего действия ослаблены. Доказательства сильной температурной чувствительности краевых углов, образуемых объемной во-

дой с тонкими равновесными α -пленками в тонких кварцевых капиллярах, получены в [28]. При повышении температуры 293 до 343 К наступающие на α -пленку углы возрастали от $(10-15)^\circ$ до $(55-60)^\circ$. Этот рост объясняется падением толщины α -пленок до монослоя при указанном повышении температуры, что подтверждается независимыми эллипсометрическими измерениями [26].

В [29, 30] получены формулы, описывающие зависимость σ как от величины, так и от направления доразрядных ЭП; уже в таких сравнительно слабых полях изменяются условия равновесия фаз. При изменении в ЭП межфазных поверхностных натяжений будет изменяться и $\cos\theta$, но характер этой зависимости пока неизвестен. Видимо, можно предполагать, что эти изменения приобретают характер катастроф при воздействии разрядных ЭП, когда реализуются сильнонеравновесные процессы и гетерогенная система оказывается в крайне неравновесном состоянии [6]. Дальнейшее протекание процессов носит бифуркационный характер. Но, как показывает практика таких экспериментов, нестационарные процессы вскрывают новые, ранее неизвестные явления и выявляют особые стороны стационарного массопереноса.

Действительно, в случае течения жидкости в капилляре достаточно малого радиуса, согласно [31], инерционными членами в уравнении Навье–Стокса можно пренебречь. Однако для случая нестационарных процессов подобное допущение будет справедливо лишь при выполнении условий [32]: $r_k \ll h_t$, $\nu < 10^5-10^6 \text{ c}^{-1}$. При этом

$$h_t = 2 \left(\frac{\pi \eta \lambda}{\rho c} \right)^{-0.5}. \quad (13)$$

Это обусловлено тем, что при действии сил любой природы, в том числе магнитогидродинамических и электрогидродинамических, на водные растворы электролитов необходимо учитывать, что текучесть жидкости может проявляться при воздействии сил или давлений в течение времени не менее $10^{-5}-10^{-6} \text{ c}$, а при действии гармонических сил – при частотах 10^5-10^6 c^{-1} . Как правило, $r_k \gg h_t$, а частота колебаний объемных зарядов при КР или ИР ниже указанных значений. Нужно также учесть физико-химические процессы, которые сопровождают движение жидкости в капилляре, как, например, электрокинетические эффекты, а также изменение химических и физических свойств воды и твердой фазы в разрядных полях [6]. В результате выравнивается профиль скоростей, и ламинарное течение в капиллярной трубке может перейти в турбулентное, что увеличивает теплообмен между жидкой и твердой фазами.

Силовое воздействие, в том числе ЭП, на поверхность жидкости и струи приводит к их неустойчивости [33, 34], обусловленной возникновением на той или иной поверхности капиллярных волн. Эти колебания приводят к деформации поверхности струи, в том числе мениска жидкости, что вызывает колебания столбика, а при определенной частоте ведут к значительному росту амплитуды колебаний. Последнее вызывает распад конца струи на капли и другие образования. Этому способствуют также звуковые явления, которые сопровождают КР или ИР. Звук, особенно ультразвук, существенно влияет на динамику и кинетику капиллярных явлений [6, 33, 34]. Аэродинамическое воздействие электрического ветра (ЭВ) на мениск, кроме уменьшения скорости его движения, способствует колебаниям столбика и его дроблению на капли [6, 17, 18].

НЭП также воздействует на парогазовую фазу над мениском. Это вызывает объемные силы, создающие дополнительный поток паровоздушной среды в область больших значений E [3]:

$$j_{\text{пр}} = \frac{Dp_0 C \nabla E}{kT} + \frac{\varepsilon_0 (\varepsilon_{\text{пр}} - 1) \nabla E^2}{kT} \cdot \frac{\rho_{\text{пр}} r_k^2}{8\eta_{\text{пр}}} + \rho_{\text{ги}} E + \rho_{\text{пр}} \overline{V_{\text{ЭВ}}}. \quad (14)$$

В (14) первый член представляет собой электродиффузионный поток дипольных молекул и атомов парогазовой среды, второй – электроконвективный, третий – поток газовых ионов под действием ЭП, четвертый – отраженный поток ЭВ вдоль стенок трубки. Основной поток ЭВ внедряется в капиллярную трубку вдоль центральной силовой линии ЭП, продавливая мениск в центральной части и увеличивая его кривизну [6]. Средняя скорость ЭВ для системы электродов игла–плоскость пропорциональна напряжению и квадратному корню из тока КР [35]. Поток (14) создает отсасывающий эффект, содействуя дополнительному увеличению скорости движения воды к устью трубки.

При неравномерном нагревании КПТ, содержащего влагу, движение жидкости происходит по направлению потока тепла. Это движение вызывается изменением капиллярного потенциала с T , ибо σ увеличивается с уменьшением T . При этом перепад капиллярного потенциала прямо пропорционален перепаду T , а скорость движения жидкости равна [1, 2]:

$$\overline{v}_{\text{mk}} = -\frac{r_k \cos \theta}{8\eta} \frac{d\sigma}{dT} \nabla T, \quad (15)$$

то есть прямо пропорциональна ∇T и r_k . Поэтому уравнение (10) для капиллярной трубки можно представить в виде

$$\overline{v} = \frac{r_k^2 \rho_B}{8\eta_B} \left(\frac{2\sigma \cos \theta}{r_k \rho_B} \cdot \frac{1}{l} + \frac{f}{\rho_B} \right) + \overline{v}_{\text{mk}}. \quad (16)$$

Отсюда следует, что возрастание T и ∇T , E и ∇E ЭП, а также внедрение ионов [36] существенно изменяют физические свойства жидкости и твердой фазы, впрочем, как и парогазовой фазы, поскольку в разрядном поле она становится ионизированной со значительным содержанием озона, который является сильным окислителем. Это в значительной мере влияет на большинство параметров (16). Следовательно, не только ∇T , но и увеличение T должно сказываться на скорости перемещения воды в капиллярной трубке.

Таким образом, совместное действие доразрядных, и особенно разрядных НЭП, T и ∇T , несомненно, должно влиять на характер поведения зависимости $\overline{v}(l)$, то есть на впитываемый поток жидкости в макрокапилляр и конвективный перенос в нем тепла.

Калибровка и условия подготовки капилляров к опытам, как и проведение самих опытов, практически не отличались от [37]. Для придания трубке по всей длине необходимой постоянной T (выше комнатной) до начала опыта ее помещали в цилиндрическую печь (трубку с внутренним диаметром 10 мм с кварцевого стекла) с равномерной намоткой из нихромовой проволоки. Для создания по длине капиллярной трубки равномерного ∇T использовалась аналогичная печь с плотностью намотки, определенным образом спадающей в направлении к устью капилляра. При этом более нагретый конец приобретал T впитываемой жидкости, а противоположный имел комнатную или заданную температуру. В ходе опытов T контролировали тонкими медь-константановыми термопарами, равномерно расположенными по длине капиллярной трубки на внешней поверхности.

На рис. 1 представлены зависимости величины потока жидкости от длины столбика воды в капиллярной трубке при разных постоянных напряжениях на электродах и фиксированных температурах трубки и жидкости. Расположение графиков показывает, что НЭП существенно увеличивает поток жидкости при обеих температурах, за исключением впитывания при очень большой скорости (первый период нестационарного впитывания – период релаксации ко второй стадии, квазистационарному этапу процесса). К тому же в начале капиллярной трубки E , E^2 и ∇E^2 имеют небольшие значения. С увеличением длины столбика происходит нарастание этих величин, а следовательно, и величины электрогидродинамического потока.

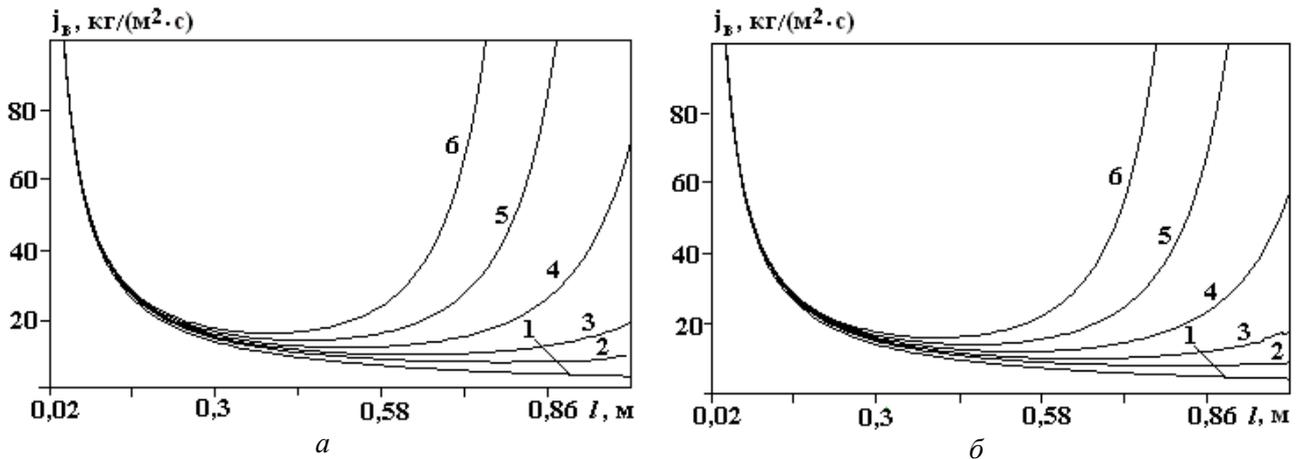


Рис. 1. Зависимость плотности потока воды j_B от длины столбика l в кварцевой капиллярной трубке радиусом $0,35 \cdot 10^{-3}$ м при 293 К (а) и 353 К (б) в неоднородном электрическом поле при разности потенциалов на электродах, кВ: 1 – 0; 2 – 20; 3 – 25; 4 – 30; 5 – 35; 6 – 40

С увеличением T влияние поля на величину потока снижается за счет причин, указанных выше, а также вследствие уменьшения различных видов поляризации фаз, интенсификации хаотического движения как отдельных молекул воды, так и их ассоциатов, а также гидратированных ионов. Это уменьшает величину объемных и поверхностных пондеромоторных сил в выражении (11), а значит, и

направленное движение макрообъемов воды, а точнее, водного электролита. Поэтому средняя скорость движения жидкости под влиянием НЭП, определяемая уравнением (10), с ростом T уменьшается, а с ней уменьшается и величина плотности потока. Относительно небольшое уменьшение потока жидкости обусловлено тем, что в выражении (11) с ростом T величины ϵ и $\nabla\epsilon$ уменьшаются, но зато происходит увеличение значений E , E^2 и ∇E^2 в жидкости. В зависимости от соотношения этих изменений влияние ЭП с ростом T должно изменяться, но слабо. Без наложения ЭП величина потока (6) при 353 К изменяется незначительно. Хотя, согласно соотношению Френкеля–Эйринга, происходит экспоненциальное уменьшение вязкости в знаменателе (9), но, видимо, оно компенсируется линейно уменьшающимися величинами σ и ρ , а также $\cos\theta$.

Интенсификация впитывания в НЭП особенно значительна на заключительной, третьей стадии, когда естественный процесс впитывания протекает очень медленно, поскольку градиент капиллярного давления в уравнении Пуазейля стремится к нулю. При этом относительная величина потока под воздействием НЭП возрастает на несколько порядков.

Как видно из рис. 1, для третьего периода кривые $j_b(l)$ в НЭП устремляются вверх. Это происходит тем стремительно и раньше, чем более высокое напряжение приложено к электродам. Следовательно, при подходе воды к игольчатому электроду кривые потоков впитывания $j_b(l)$ загибаются вверх на тем меньшей длине капиллярной трубки, чем более высокий потенциал имеет этот электрод. Это обусловлено непостоянством силы f , которая стремительно нарастает по мере приближения жидкости к острию игольчатого электрода, поскольку быстро возрастают все члены в (11) за счет роста действующих величин E , ∇E , ∇E^2 , ρ_e , γ , ι при уменьшении δ . Возрастание этих величин приводит также к изменению значения $\nabla\epsilon$, то есть к усилению роли в массопереносе второго члена в (11).

Увеличение скорости впитывания под действием поля тем сильнее, чем больше l , то есть чем ближе мениск жидкости подходит к электроду – игле. На близких расстояниях от игольчатого электрода величины E , E^2 и ∇E^2 возрастают настолько, что возникают сначала КР, а затем и ИР между острием и приближающимся мениском жидкости. Этому сопутствует появление налагающихся на предыдущие новых конкурирующих специфических эффектов, обусловленных действием на поверхность мениска давления КВ и плазмы ИР [6]. В этих условиях электрогидродинамическое взаимодействие между приближающимся столбиком водного электролита и игольчатым электродом следует рассматривать в системе электродов острие–криволинейная поверхность жидкого электролита, когда по сравнению с первоначальной системой электродов игла–плоскость значительно резче нарастают вышеуказанные электрические параметры. Здесь употреблен термин “криволинейная поверхность” (вместо сферической поверхности), поскольку благодаря внешним силовым воздействиям форма мениска испытывает деформации, а столбик жидкости при своем продвижении осуществляет нерегулярные пульсации с нарастающими к устью амплитудами и частотами [37, 38].

Величину такого значительного взаимодействия можно подтвердить тем, что даже в широких сосудах с плоской горизонтальной поверхностью водного электролита и металлическим электродом над ним, несмотря на противодействие молекулярных сил и силы тяжести, с ростом напряжения происходит сначала прогиб, а затем подъем конусообразного столбика жидкости в вертикальном направлении [39, 40]. Следовательно, на близких расстояниях от игольчатого электрода развиваются настолько большие пондеромоторные силы, что жидкость в горизонтальной капиллярной трубке набирает значительное ускорение и с приобретенной скоростью выбрасывается из ее устья.

Таким образом, НЭП могут существенно влиять на массоперенос в пористой среде при неполном насыщении жидкостью. Полученные результаты можно использовать при разработке методики и режимов увлажнения, осушивания, капиллярного вытеснения жидкостей и растворов с пористого материала, экстракции веществ из полидисперсных пористых систем. В [41] указывается на практическое использование электроосмотического массопереноса для ускорения как сушки, так и пропитки жидкими диэлектриками микропористой электрической изоляции.

Неоднородность T по длине впитываемого столбика жидкости за счет теплообмена со стенками капилляра приводит, согласно уравнениям (2) и (16), к возрастанию скорости впитывания, а следовательно, и к увеличению плотности потока воды. Из рис. 2 видно, что поток увеличивается при возрастании ∇T . Это увеличение не столь значительно вследствие малости наложенных ∇T . Но замечательно то, что в соответствии с последним членом в выражении (11) возрастает величина потока жидкости в НЭП, и тем больше, чем больше величины ∇T и U . Наличие ∇T вдоль канала капилляра, согласно (4), стимулирует перенос тепла не только за счет кондуктивного переноса по твердой фазе, но и вследствие конвективной составляющей впитываемого потока жидкости. Теплопроводностью жидкой фазы пренебрегаем, поскольку коэффициент теплопроводности воды, хотя и возрастает с

температурой от 0,585 Вт/(м·К) при 293 К до 0,660 Вт/(м·К) при 353 К, но все же остается почти в два раза меньшим в сравнении с коэффициентом теплопроводности плавленого кварца.

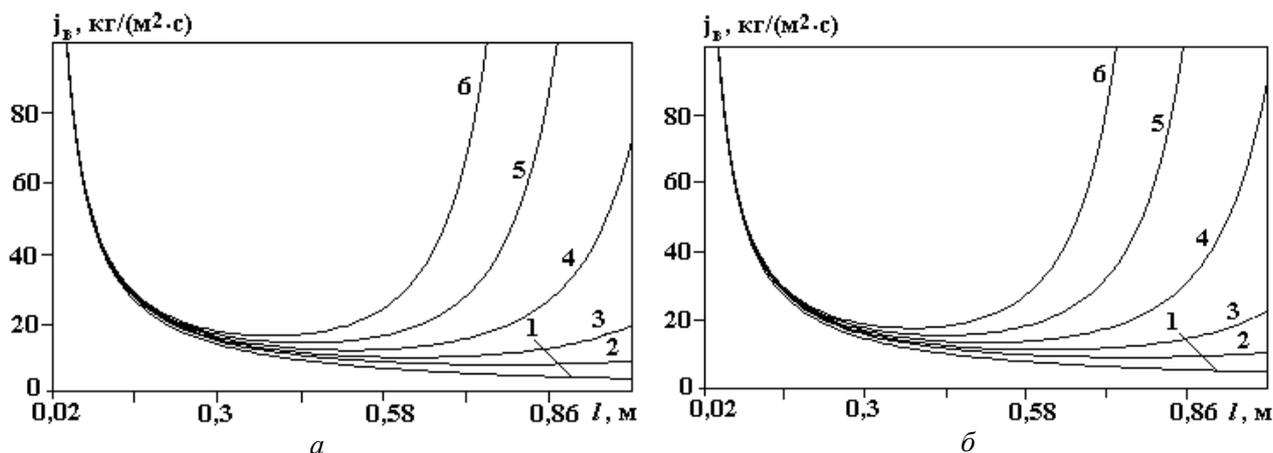


Рис. 2. Зависимость плотности потока воды j_w от длины столбика l в кварцевой капиллярной трубке радиусом $0,35 \cdot 10^{-3}$ м при впитывании воды с $T = 353$ К и градиентах температуры ∇T 30 (а) и 60 К/м (б) вдоль трубки в неоднородном электрическом поле при разности потенциалов на электродах, кВ: 1 – 0; 2 – 20; 3 – 25; 4 – 30; 5 – 35; 6 – 40

Для оценки вклада обоих видов переноса тепла при движении жидкости в широком горизонтальном капилляре производились расчеты зависимости отношения $J_T / \lambda_T \nabla T$ от длины столбика жидкости, впитываемой в капилляр. Это дает возможность сравнить тепловой поток, обусловленный истинной теплопроводностью в твердом теле из плавленого кварца и переносом тепла за счет влагопереноса в цилиндрическом капилляре без поля и при воздействии НЭП. Величины J_w и λ_T заимствованы из справочной литературы.

Как видно из рис. 3 на начальной высокоскоростной стадии впитывания тепловой поток, переносимый движущейся жидкостью, на много порядков превышает теплоток в твердой фазе. Это обусловлено тем, что градиент лапласового давления очень большой. Он вызывает при входе в широкий капилляр интенсивный поток горячей воды, а с ним и конвективный перенос большого количества тепла. На этой стадии впитывания влияние НЭП не проявляется, поскольку ускорение, приобретенное столбиком жидкости очень малой длины за счет возникшего лапласового давления, намного больше ускорения, сообщаемого еще слабыми пондеромоторными силами НЭП. С увеличением длины столбика стремительно уменьшается градиент лапласового давления и все в большей мере проявляется интенсифицирующее влияние последних членов в (11) и (16).

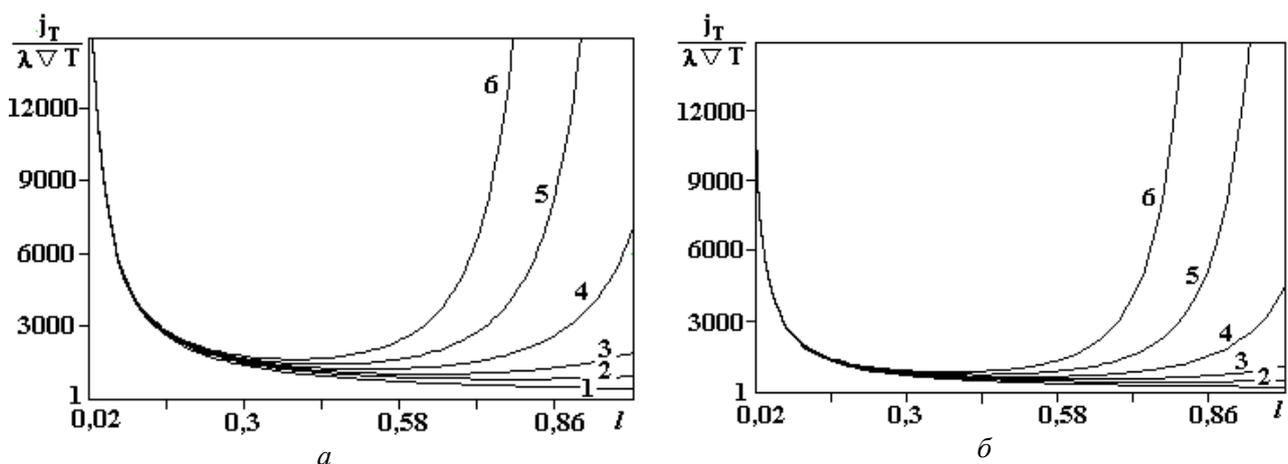


Рис. 3. Зависимость отношения плотности конвективного потока тепла j_T , к кондуктивному потоку $\lambda \nabla T$ в кварце от длины столбика l при впитывании воды, температура которой равна 353 К, в неравномерно нагретую кварцевую капиллярную трубку радиусом $0,35 \cdot 10^{-3}$ м при градиентах температуры ∇T 30 (а) и 60 К/м (б) в неоднородном электрическом поле при разности потенциалов на электродах, кВ: 1 – 0; 2 – 20; 3 – 25; 4 – 30; 5 – 35; 6 – 40

С повышением напряжения на электродах, при фиксированном ∇T , перенос тепла потоком жидкости возрастает, поскольку увеличивается скорость ее движения. Чем больше напряжение, тем при меньшей длине столбика начинается отход кривой зависимости $J_T/\lambda_T \nabla T(l)$ в НЭП от аналогичной кривой без поля. Наибольшее возрастание электроконвективного потока тепла под воздействием НЭП наблюдается на заключительном этапе впитывания, когда тепловой поток достигает и даже превышает начальную величину. С увеличением ∇T влияние поля при том же напряжении на электродах и при той же T жидкости несколько уменьшается. Это, видимо, обусловлено тем, что с ростом ∇T кондуктивный поток тепла возрастает быстрее, чем конвективный. Относительно влияния НЭП на теплоперенос в твердой фазе, где отсутствуют подвижные макрообъемы, можно утверждать, что доразрядные НЭП с их относительно невысокими значениями E , E^2 , ∇E и ∇E^2 не способны изменить механизм атомной (молекулярной) теплопроводности. Но разрядные ЭП, которые вследствие электронно-ионной бомбардировки существенно модифицируют химическую природу и физическую структуру поверхности канала капиллярной трубки, могут заметно изменить коэффициент теплопроводности слоев, прилегающих к этой поверхности. Но эти изменения все же будут многократно меньшими по сравнению с электроконвективным теплопереносом.

Таким образом, впитывание нагретой жидкости капиллярной трубкой с неоднородным распределением T по ее длине, присутствие ЭП той или иной напряженности и степени неоднородности существенно интенсифицируют конвективный теплоперенос за счет возникновения разных видов потоков под воздействием различных электрогидродинамических сил. Они значительно ускоряют влагоперенос в широких макрокапиллярах, расположенных в пористом теле горизонтально или под малыми углами к горизонту. Это предоставляет значительные возможности для целенаправленного управления массо- и теплопереносом в реальных дисперсных системах при фильтрации, пропитке, увлажнении, сушке, а также при пористом охлаждении или нагревании разных объектов.

Обозначения

a – постоянная, зависящая от свойств жидкости и поверхности капилляра; a_m – коэффициент диффузии массы (влаги), $\text{м}^2/\text{с}$; a_m^3 – коэффициент электродиффузии влаги, $\text{м}^2/(\text{с}\cdot\text{В})$; a_m^T – термоградиентный коэффициент, $\text{кг}_\text{в}/(\text{кг}_{\text{с.т}}\cdot\text{К})$; C – концентрация дипольных молекул парогазовой среды, $\text{кг}/\text{м}^3$; c – скорость распространения звука в неограниченной жидкости, $\text{м}/\text{с}$; D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; E – напряженность поля, $\text{В}/\text{м}$; e – заряд электрона, Кл; ∇E – градиент НЭП, $\text{В}/\text{м}^2$; f – плотность пондеромоторных сил НЭП, $\text{Н}/\text{м}^3$; g – ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$; h – высота поднятия воды в широком капилляре, м; h_e – расстояние между электродами, м; h_s – толщина приповерхностного слоя жидкости, насыщенного ионами коронного разряда, м; h_t – расстояние, на которое распространяется тормозящее действие поверхности стенок капилляра, м; I_i – удельное теплосодержание данного потока в КПП, $\text{Дж}/\text{кг}_\text{в}$; I_b – удельное теплосодержание потока воды в капилляре, $\text{Дж}/\text{кг}_\text{в}$; J – плотность потока влаги в КПП, $\text{кг}_\text{в}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$; j – плотность потока воды в отдельном капилляре, $\text{кг}_\text{в}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$; j_i – поток массы в КПП в виде столбика жидкости, пленок, пара, $\text{кг}_\text{в}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$; J_T – плотность теплового потока в КПП, $\text{Вт}/\text{м}^2$; j_b – плотность потока воды в отдельном капилляре, $\text{кг}_\text{в}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$; $j_{\text{пт}}$ – плотность парогазового потока, $\text{кг}_{\text{пт}}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$; j_t – плотность теплового потока в отдельном капилляре, $\text{Вт}/\text{м}^2$; k – постоянная Больцмана, $\text{Дж}/\text{К}$; l – длина столбика жидкости в капиллярной трубке, м; p_s – электрический момент молекул, Кл·м; Δp – давление ветра коронного разряда или плазмы искрового разряда в капилляре, Па; q – величина заряда, Кл; r_0 – радиус микрокапилляра, м; r_k – радиус капиллярной трубки, м; t – время, с; T – температура, К; U – разность потенциалов между электродами, В; \bar{v} – средняя скорость движения жидкости в широком капилляре, м/с; $\mathfrak{G}(r)$ – скорость движения воды, зависящая от текущего радиуса капилляра, м/с; $\overline{V_{ЭВ}}$ – средняя скорость электрического ветра, м/с; W – влагосодержание, $\text{кг}_\text{в}/\text{кг}_{\text{ст}}$; z – валентность ионов; α – угол наклона трубки к горизонту, градус; γ – удельная электропроводность электролита, $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$; δ – расстояние между коронирующим электродом и мениском, м; ε_0 – электрическая постоянная, ф/м; ε_1 – диэлектрическая проницаемость жидкости; ε_2 – диэлектрическая проницаемость влажного воздуха; $\nabla \varepsilon$ – градиент диэлектрической проницаемости на границе вода–воздух, м^{-1} ; $\varepsilon_{\text{пт}}$ – диэлектрическая проницаемость парогазовой среды; η – вязкость воды, $\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$; $\eta_{\text{пт}}$ – вязкость парогазовой среды, $\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$; θ – краевой угол смачивания, градус; \vec{t} – вектор плотности электрического тока, $\text{А}/\text{м}^2$; λ – длина звуковой волны в жидкости, м; λ_T – коэффициент теплопроводности материала стенок капилляра, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $\lambda_{\text{тс}}$ – коэффициент теплопроводности ске-

лета твердой фазы КПТ, Вт/(м·К); $\lambda_{эф}$ – эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); ν – частота действия внешних сил, с⁻¹; $\pi_э$ – удельная электрическая поляризация, кг_в/м²; ρ_0 – плотность скелета абсолютно сухого пористого тела, кг_{с.т}/м³; $\rho_в$ – плотность воды, кг_в/м³; $\rho_е$ – плотность объемного заряда жидкости, Кл/м³; $\rho_{пг}$ – плотность парогазовой среды, кг_{пг}/м³; $\rho_{ги}$ – объемная плотность заряда газовых ионов, Кл/м³; σ – поверхностное натяжение воды, Н/м; σ_p^e – плотность связанных зарядов мениска, Кл/м²; $\varphi_0 = \kappa T/e$ – специфический потенциал опыта, В; Φ_T – термокапиллярная влагонепроводимость, кг_в/(м·с·К); $\Phi_э$ – электрокапиллярная влагонепроводимость, кг_в/(м·с·В); Φ_w – капиллярная влагонепроводимость, кг_{с.т}/(м·с); χ – толщина двойного электрического слоя, м; ψ – угол между нормалью к поверхности и вектором градиента поля, градус. Индексы: 0 – фиксированное значение величины; в – влага, вода; ги – газовый ион; пг – парогазовый; тс – твердый скелет; ст – сухое тело; т – тормозящий; э – электрический; е – электроды; i – вид потока; m – масса; s – слой.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лыков А.В.* Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М., 1954.
2. *Лыков А.В.* Теория сушки. М., 1968.
3. *Панасюк А.Л., Панченко М.С., Старов В.М., Чураев Н.В.* Влияние неоднородного электрического и магнитного полей на внутренний массоперенос в капиллярно-пористых телах // ИФЖ. 1978. Т. 35. № 1. С. 93–100.
4. *Карпович И.Н., Чураев Н.В., Панченко М.С.* Течение смачивающих пленок полярных жидкостей в неоднородном электрическом поле // Коллоидный журнал. 1984. Т. 46. № 1. С. 114–117.
5. *Лыков А.В.* Тепломассообмен. Справочник. М., 1971.
6. *Полищук Н.В., Панченко И.М., Панченко М.С., Карпович И.М.* Эффекты воздействия и последствий электрических полей на поднятие воды в макрокапиллярах // Электронная обработка материалов. 2002. № 4. С. 54–67.
7. *Карпович И.Н., Чураев Н.В., Панченко М.С., Панасюк А.Л.* Ускорение капиллярной пропитки внешним неоднородным электрическим полем // Коллоидный журнал. 1982. Т. 44. № 6. С. 1044–1050.
8. *Могилевский Б.М., Глобус А.М.* Перенос массы и заряда через капилляр при воздействии твердой фазы на жидкость (II. Потоки и проводимости) // Журнал физической химии. 1971. Т. 45. № 10. С. 2425–2429.
9. *Порхаев А.П.* Кинетика впитывания жидкостей элементарными капиллярами // Коллоидный журнал. 1949. Т. 11. № 5. С. 346–353.
10. *Рабинович А.И., Анциферов В.Н.* Влияние пространственной ориентации на кинетику капиллярного впитывания в пористые материалы // ИФЖ. 1993. Т. 64. № 1. С. 5–11.
11. *Тамм И.Е.* Основы теории электричества. М., 1976.
12. *Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А.* Электроконвекция и теплообмен. Кишинев, 1977.
13. *Остроумов Г.А.* Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. М., 1979.
14. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. М., 1982.
15. *Остроумов Г.А.* Распределение механических сил в неподвижном электролите при произвольной конфигурации электродов // Электронная обработка материалов. 1975. № 2. С. 37–40.
16. *Григорьев А.И., Григорьева И.Д., Мухина Е.И., Ширяева С.О.* Закономерности электрогидродинамического распада шаровой молнии и данные натурных наблюдений // Электронная обработка материалов. 1991. № 6. С. 31–41.
17. *Карпович И.Н., Чураев Н.В., Панченко М.С.* Влияние поля коронного разряда на испарение жидкостей из капилляров // ИФЖ. 1981. Т. 41. № 6. С. 1049–1056.
18. *Коекин В.К.* Воздействие электрического поля на струю жидкости // Электронная обработка материалов. 1990. № 4. С. 43–45.
19. *Денисов А.А., Нагорный В.С.* Электрогидро- и электрогазодинамические устройства автоматики. Л., 1979.
20. *Григорьев А.И., Ширяева С.О., Егорова Е.В.* О некоторых особенностях нелинейного резонансного взаимодействия мод заряженной струи // Электронная обработка материалов. 2005. № 1. С. 42–49.
21. *Гречаный О.А., Шелиманов В.А.* Влияние электровязкости на температурную зависимость интенсивности переноса жидкости в цилиндрических капиллярах // Теплофизика и теплотехника. 1972. № 22. С. 78–81.
22. *Хисаси Уэдаира.* Микровязкость воды в водных растворах электролитов // Журнал физической химии. 1971. Т. 45. № 10. С. 2550–2552.

23. 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.
24. Старов В.М., Чураев Н.В., Хворостянов А.Г. О форме движущегося мениска в плоском капилляре // Коллоидный журнал. 1977. Т. 39. № 5. С. 1001–1004.
25. Воляк Л.Д., Степанов В.Г., Тарлаков Ю.В. Исследование смачивания кварца водой в зависимости от температуры // Журнал физической химии. 1972. Т. 46. № 6. С. 1620–1625; Т. 49. № 11. С. 2931–2933.
26. Дерягин Б.В., Чураев Н.В. Смачивающие пленки. М., 1984.
27. Whalen J.W., Kuo – Yann L. Adhesive wettability of modified surfacts of sodalime glass // J. Colloid and Interface Sci. 1977. Vol. 59. N. 3. P. 483–490.
28. Березкин В.В., Ершов А.П., Есипова Н.Е. и др. Исследование пропитки гидрофобных капилляров растворами ПАВ под действием внешнего давления // Коллоидный журнал. 1979. Т. 41. № 5. С. 849–855.
29. Йоффе И.В. О влиянии внешних полей на термодинамические свойства растворов и поверхностное натяжение // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1969. Т. 57. Вып. 2. С. 529–533.
30. Бродская Е.Н., Русанов А.И. О влиянии произвольно направленного электрического поля на поверхностное натяжение жидкостей // Коллоидный журнал. 1983. Т. 45. № 4. С. 636–642.
31. Бондаренко Н.Ф., Гак Е.З., Комаров Г.П. Кинетические явления в электролитах в капиллярно – пористых системах под действием магнитогидродинамического давления // Журнал технической физики. 1972. Т.42. Вып. 2. С. 442–446.
32. Лэмб Г. Динамическая теория звука. М., 1960.
33. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М., 1964.
34. Майер В.В. Простые опыты со струями и звуком. М., 1985.
35. Верещагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З., Пашин М.М. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. М., 1974.
36. Шевкунов С.В. Влияние внедренных протонов на структуру микрокристаллов льда // Коллоидный журнал. 2003. Т. 65. № 2. С. 274–283.
37. Полищук Н.В., Панченко И.М., Панченко М.С. Влияние электрических полей на перемещение воды в капиллярных трубках // Электронная обработка материалов. 2003. № 3. С. 27–36.
38. Ершов А.П., Зорин З.М., Соболев В.Д., Чураев Н.В. Капиллярное течение растворов катионного полиэлектролита // Коллоидный журнал. 2003. Т. 65. № 4. С. 474–479.
39. Дураджи В.Н. Об электрическом импульсном разряде между металлическим и электролитным электродами // Электронная обработка материалов. 2001. № 3. С. 22 – 26.
40. Морозов В.В., Ширяева С.О., Григорьев А.И. О роли неустойчивости поверхности жидкости по отношению к собственному заряду в формировании электрического тока при электролитном нагреве электрода // Электронная обработка материалов. 2003. № 3. С. 15 – 19.
41. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. М., 1982.

Поступила 30.05.05

Summary

Research of influence of non-uniform electric field on heat-transfer is lead at absorption hot water at the presence of a gradient of temperature along a horizontal cylindrical tube. It is shown, in a case of opposite directed gradients of temperature and intensity of electric field (EF) essentially increases electrical-convection a stream of heat in a tube. The intensification of transport by water of heat occurs as a result of occurrence of additional electrohydrodynamical streams of water under action ponderomotive forces electric field.