

Исследование характеристик тонких слоев жидкости в неоднородном электрическом поле

И. Н. Карпович

*Национальный университет водного хозяйства и природопользования,
ул. Соборная, 11, г. Ровно, UA – 33028, Украина, e-mail: karpivan@ukr.net*

На основании данных по скорости перемещения столбика льда в цилиндрических капиллярах под влиянием неоднородного электрического поля получены оценки вязкости тонкой прослойки жидкости между льдом и поверхностью кварца.

Ключевые слова: адгезия, жидкая прослойка, капилляр, неоднородное электрическое поле.

УДК 532.685:537.228

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие пористых материалов с влагой часто происходит под влиянием электрических полей природного и промышленного происхождения. Массообмен как в пористой среде, так и на поверхности твердого тела определяет кинетику многих технологических процессов. Неоднородное электрическое поле (НЭП) может существенно влиять на динамику массообмена в капиллярно-пористых телах за счет силового воздействия на микрообъем жидкого диэлектрика и дипольные молекулы пара. В частности, применение электрических полей является действенным методом интенсификации процесса конденсации паров как диэлектрических, так и электропроводящих жидкостей, включая воду, что открывает возможность повышения эффективности работы электрогидродинамических генераторов за счет использования атмосферной влаги. Особенно заметно влияние электрического поля на жидкую и газовую фазы при повышении его напряженности и неоднородности: в таких условиях неоднородное поле вызывает интенсивное диспергирование жидкой пленки и изменение ее толщины [1, 2].

Подтверждением этого являются результаты модельных исследований массообмена в капиллярах, заполненных жидкостью не полностью. Установлено [3], что в области больших градиентов электрического поля смачивающая пленка, которая покрывает стенки капилляров, становится неравновесной. Возникающие флуктуации ее толщины приводят к смыканию жидкости. При этом наблюдается электромиграция неравновесных пленок и столбиков капиллярной жидкости в область большей неоднородности поля. Таким образом, могут быть созданы условия, обеспечивающие подтягивание жидкости к поверхности дисперсного материала, что позволяет применять НЭП для разработки и совершенствования мето-

дов удаления влаги, не связанных с ее преобразованием в пар.

Для описания нестационарных процессов тепломассопереноса, как известно, служат системы дифференциальных уравнений с учетом основных закономерностей термодинамики необратимых процессов. Практические расчеты сопряжены здесь с большими трудностями, обусловленными нелинейностью дифференциальных уравнений, а также отсутствием надежных данных по тепловлажностным характеристикам и фазовым переходам. Поэтому для исследования особенностей механизма массообмена в пористой среде выбирают капиллярные модели различной сложности.

Постоянные и переменные неоднородные электрические поля могут существенно влиять на массообмен в капиллярах, являющихся моделью поровых структур [4,5]. Силовые поля наиболее эффективны в случае использования жидкостей с достаточно высокой диэлектрической проницаемостью и когда обычные процессы массообмена протекают медленно. Полученные результаты показывают, что с помощью градиентных полей можно ускорять увлажнение, капиллярную пропитку или сушку дисперсных материалов, существенно снижая длительность указанных операций. Это способствует снижению энергетических затрат и повышению эффективности различных технологических процессов.

В работе [6] на основании данных по скорости течения в НЭП пленок жидкости на поверхности капилляров различных радиусов получены изотермы расклинивающего давления смачивающих пленок, а также зависимости толщины пленок от температуры. Заслуживает внимания исследование в НЭП основных характеристик тонких прослоек жидкости, которые при определенных условиях разъединяют поверхность капилляра и столбик замороженной капиллярной жидкости.

Состояние и характеристики влажных пористых тел (строительные материалы, грунты, адсорбенты) при отрицательных значениях температуры в значительной степени определяются фазовым составом и свойствами раствора, который заполняет поры. Использование отдельных кварцевых или стеклянных капилляров как модели порового пространства позволяет вести непосредственные оптические наблюдения за процессами теплового расширения или кристаллизации поровой жидкости и плавлением образующегося льда.

В соответствии с исследованиями [7] сильное сцепление льда со стенками кварцевых капилляров, которое наблюдается при температуре ниже -20°C , может увеличивать прочность пористого материала. Это согласуется с известными фактами повышения прочности промерзших бетонов и глин. При температуре, превышающей -20°C , происходит ослабление адгезии льда к поверхности твердой фазы. При дальнейшем повышении температуры возможно образование тонкой жидкой прослойки между поверхностью льда и стенками капилляров. Полимолекулярные жидкие пленки появляются, как было показано рядом авторов, при $t \geq -5^{\circ}\text{C}$. В частности, по данным [8], при этой температуре толщина жидких пленок составляет около трех слоев молекул.

В растворах, близких по составу к поровой влаге бетонов, сцепление льда со стенками кварцевого капилляра полностью теряется при температуре, превышающей $-5 \dots -7^{\circ}\text{C}$. Можно считать, что при этой температуре образуется сплошная жидкая прослойка между поверхностями кварца и льда. Возникновение жидкофазной прослойки вызывает появление нормальной к поверхности кварца составляющей давления, обусловленного расклинивающим действием жидкой пленки [9]. При повышении температуры толщина жидкого слоя растет, следовательно, расклинивающее давление может уменьшаться.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования электромиграции тонких прослоек жидкости между льдом и поверхностью кварца капилляр длиной 4–5 см с замороженным столбиком жидкости длиной 0,5–3,5 мм помещался в неоднородном электрическом поле (рис. 1а). НЭП создавалось с помощью игольчатого электрода с радиусом закругления острия $R = 0,1$ мм, на который подавалось постоянное напряжение U от высоковольтного источника, и плоского металлического электрода в форме круга диаметром 6 см, заземленного через микроамперметр. Значение U в разных опытах могло изменяться от 0 до 10 кВ, а межэлектродное расстояние – от 2 до 5 см. Способ калибровки, поз-

воляющий рассчитать распределение значений $2E\nabla E = \nabla(E^2)$ (E – напряженность электрического поля и ∇E – градиент напряженности НЭП) как функцию расстояния от электродов, подробно описан ранее [10]. На рис. 1б в качестве примера показано распределение значений E по продольной оси исследуемого капилляра для $U = 6$ кВ, $R = 0,1$ мм и межэлектродного расстояния 3 см. За начало отсчета принято положение верхнего конца столбика льда.

Теплоинерционный съемный блок со встроенными электродами и капилляром помещали в специальную камеру, оборудованную электронной системой термостабилизации. Капилляр проходил через отверстие диаметром 2 мм в плоском электроде и закреплялся в держателе, который с помощью микровинта, приводимого во вращение от электродвигателя, мог перемещаться таким образом, чтобы смещающийся столбик льда все время находился на одном и том же расстоянии от электродов (рис. 1б). Это позволяло поддерживать постоянное значение $\nabla(E^2)$ в ходе измерений.

Модельными объектами служили цилиндрические кварцевые капилляры, изготовленные по методике, разработанной в Институте физической химии РАН [11]. Капилляры, полученные быстрым растягиванием разогретого участка трубки из кварца высокой чистоты (более 99,99% SiO_2), имели высокую химическую стойкость и гладкую ювенильную поверхность. Радиус капилляров измерялся оптическим методом. Их конусность не превышала 10^{-5} .

Сначала столбик жидкости вводили в капилляр и концы последнего запаивали. После этого его помещали в морозильную камеру (при температуре -26°C) не менее чем на 24 часа. При таких условиях чистая вода (бидистиллат) замерзает полностью, поскольку, как известно, объемная вода не может быть в равновесии со льдом при температуре ниже -22°C .

Съемный блок с закрепленным капилляром, содержащим столбик льда, выводился на определенный температурный режим. Затем концы капилляра вскрывали, и блок переносили в камеру-термостат. Включалось НЭП и начинались наблюдения за перемещением столбика льда, которое происходило в результате втягивания жидкости в зону большей напряженности поля, при постепенном повышении температуры. Смещение верхнего конца столбика относительно неподвижного капилляра фиксировалось с точностью 5 мкм (с помощью катетометра КМ-6) через окно в камере при боковом освещении канала капилляра. Перемещения столбика льда без наложения НЭП не происходило, что свидетельствует о цилиндричности капилляра на

участке измерений. После окончания опыта по известной методике [12] определялся радиус капилляра.

Значение $\nabla(E^2)$ изменяли путем регулирования напряжения на высоковольтном электроде. Для каждого значения $\nabla(E^2)$ измеряли скорость перемещения столбика V , которая при фиксированной температуре оставалась постоянной.

Смещение столбика льда происходит вследствие перемещения жидкой прослойки, которая играет роль «смазки». Для определения реологических свойств прослойки используем модель вязкопластического тела. Запишем уравнение для напряжения сдвига в виде [13]:

$$\tau = \theta + \eta(dv/dx), \quad (1)$$

где θ – предельное напряжение сдвига; η – пластическая вязкость; dv/dx – градиент скорости.

Напряжение τ приложено к прослойке толщиной h со стороны цилиндра льда. При отсутствии других сил $\tau = \text{const}$ и не зависит от x - координаты по нормали к поверхности капилляра. Приняв θ и η постоянными, получим

$$dv/dx = \text{const} = V/h, \quad (2)$$

где $V = dz/dt$ – скорость движения столбика льда.

При равномерном движении ($V = \text{const}$) сила, которая действует на ледяной цилиндр, уравновешивается силой, приложенной к его боковой поверхности. Из условия равенства этих сил, учитывая соотношения (1) и (2), имеем

$$V = \frac{h}{\eta} \left(\frac{r}{2} \nabla P - \theta \right), \quad (3)$$

где ∇P – градиент давления; r – радиус капилляра.

Для перемещения жидкой пленки, которая служит транспортным средством для столбика льда, может быть использовано неоднородное электрическое поле. Как известно, в НЭП на единицу объема жидкого диэлектрика действует пондеромоторная сила, которая вызывает втягивание жидкости в область большей напряженности электрического поля [14]. Тогда скорость перемещения столбика льда можно найти из уравнения

$$V = \frac{h}{\eta} \left(\frac{r\varepsilon_0(\varepsilon-1)}{4} \nabla E^2 - \theta \right), \quad (4)$$

где ε_0 и ε – диэлектрическая проницаемость вакуума и жидкости соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 1 показаны некоторые из экспериментально полученных зависимостей смещения столбика льда z от времени t для воды в капилля-

ре $r = 47,4$ мкм при температуре $-0,6^\circ\text{C}$ под влиянием НЭП. Как видно из рисунка, перемещение столбика происходит с постоянной скоростью V , значения которой растут с увеличением градиента напряженности поля. Изменение знака $\nabla(E^2)$ при изменении расположения электродов вызывала лишь изменение направления движения столбика.

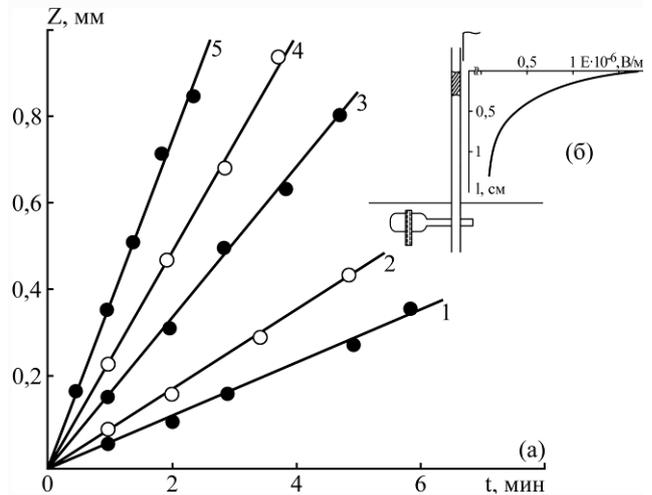


Рис. 1. Зависимость смещения столбика льда длиной $l = 2,9$ мм от времени в капилляре $r = 47,4$ мкм при различных значениях градиента квадрата напряженности НЭП $\nabla(E^2) \cdot 10^{-14}$, $\text{В}^2/\text{м}^3$: 1 – 5; 2 – 7; 3 – 9; 4 – 10; 5 – 12 (а) и схема расположения капилляра в НЭП (б).

На рис. 2 представлены зависимости $V(\nabla E^2)$, рассчитанные на основе экспериментальных данных, полученных при температуре столбика льда $-0,6^\circ\text{C}$. Используя соотношение (4), можно найти предельное напряжение сдвига жидкой прослойки θ и оценить значение отношения h/η . Для линейного участка кривой оно составляет $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/(\text{Н} \cdot \text{с})$. Определение значений толщины прослойки h и ее пластической вязкости η в отдельности требует дополнительных исследований. Однако с учетом данных работы [15] ($h = 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}$) получим $\eta = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Рассчитанные на основании экспериментальных данных значения вязкости незамороженного слоя жидкости заметно превышают значения вязкости объемной воды при той же температуре. Эта особенность отмечалась многими авторами как одна из причин, замедляющая перемещение льда и незамерзшей влаги в пористых телах. Повышение температуры приводит как к увеличению толщины жидких прослоек, так и к снижению их вязкости.

Нелинейность начального участка кривой на рис. 2 подтверждает выводы авторов работы [7] о том, что незамороженные слои воды отличаются от ньютоновских жидкостей. Используя точку пересечения продолжения линейной части графика с осью абсцисс, можно найти предельное

напряжение сдвига. Рассчитанное из уравнения (4) при температуре $-0,6^{\circ}\text{C}$ предельное напряжение сдвига θ составляет 5 Н/м^2 .

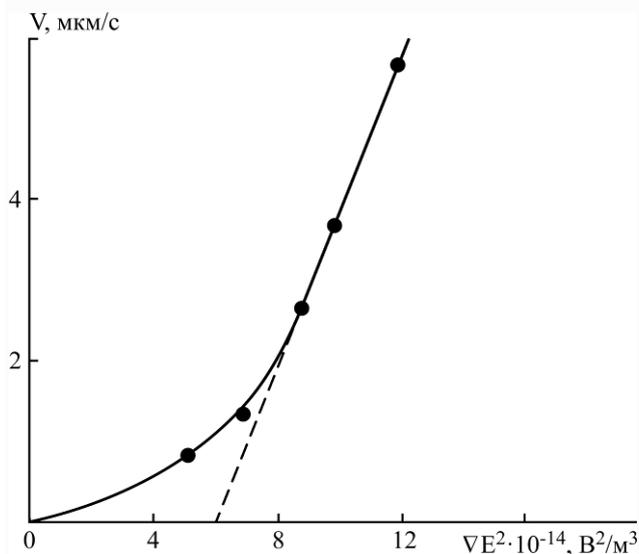


Рис. 2. Зависимость скорости сдвига столбика льда длиной $l = 2,9 \text{ мм}$ от градиента квадрата напряженности НЭП ∇E^2 в капилляре $r = 47,4 \text{ мкм}$ при температуре $-0,6^{\circ}\text{C}$.

Приведенные результаты согласуются со значениями θ , полученными в работе [16] для тонких граничных слоев воды в глинах и керамике при исследовании аномалий электроосмоса и фильтрации. Авторами [17] установлено, что образование жидкой прослойки между льдом и поверхностью капилляра наблюдается не только для бидистиллированной воды, но и в случае растворов электролитов. Более того, если для чистой воды адгезия льда к поверхности кварцевых капилляров резко уменьшается при температуре $-3,5^{\circ}\text{C}$, то для поровой влаги бетонов это происходит при $-4...-6^{\circ}\text{C}$.

В выполненных расчетах использованы усредненные значения E и ∇E в связи с отсутствием реальных значений этих величин внутри кварцевых капилляров. Для уточнения решений необходимо также исследовать влияние НЭП на краевой угол смачивания. Интересно оценить роль электризации диэлектрической жидкости и электрической зарядки поверхности капилляра [18, 19], которые могут оказывать влияние на свойства жидкой пленки.

Таким образом, разработанная методика позволяет проводить исследования граничного слоя при различных температурах. Использование тонких капилляров дает возможность получить более обширную и убедительную информацию о свойствах жидких слоев, поскольку здесь значительно проще геометрия поверхности скольжения.

Автор выражает благодарность профессору Ровенского государственного гуманитарного универ-

ситета М.С. Панченко за содержательные советы и помощь при организации и проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болога М.К., Гросу Ф.П., Поликарпов А.А., Моторин О.В. Конденсация парогазовой смеси в электрическом поле. *ЭОМ*. 2009, (2), 57–60.
2. Ланин В.Л. Растекание расплавов по поверхности твердых тел при взаимодействии с электрическими и магнитными полями. *ЭОМ*. 2010, (4), 13–17.
3. Карпович И.Н., Панченко М.С. Пульсирующее движение жидкости в капиллярах под влиянием силового поля. *Инженерно-физический журнал*. 2006, **79**(5), 20–26.
4. Мосиевич А.С., Полищук Н.В., Панченко И.М., Панченко М.С., Панасюк А.Л., Карпович И.Н. Течение жидкости в длинных капиллярных трубках в электрическом поле. *ЭОМ*. 2006, (6), 44–49.
5. Polishchuk N.V., Panchenko I.M., Panchenko M.S., Karpovich I.N. Influence of Electric Fields on Water Displacement in Capillary Tubes. *Surf Eng Appl Elect*. 2003, (4), 27–35.
6. Карпович И.Н., Чураев Н.В., Панченко М.С. Течение смачивающих пленок полярных жидкостей в неоднородном электрическом поле. *Коллоидный журнал*. 1984, **46**(1), 114–118.
7. Киселева О.А., Кладько С.Н., Соболев В.Д., Чураев Н.В. Кристаллизация и плавление водных растворов в капиллярах как модели пористого тела. *Коллоидный журнал*. 1975, **37**(1), 49–56.
8. Ананян А.А. Нетермоактивная вода в тонкопористых горных породах. *ДАН СССР*. 1970, **195**(4), 821–822.
9. Дерягин Б.В., Чураев Н.В. Течение незамерзающих прослоек воды и морозное разрушение пористых тел. *Коллоидный журнал*. 1980, **42**(5), 842–852.
10. Карпович И.Н., Чураев Н.В., Панченко М.С. Влияние неоднородного электрического поля на испарение воды из капилляров. *Коллоидный журнал*. 1980, **42**(4), 634–638.
11. Соболев В.Д., Чураев Н.В., Велард Н.Г., Зорин З.М. Динамические краевые углы воды в ультратонких порах. *Коллоидный журнал*. 2001, **63**(1), 127–131.
12. Зорин З.М., Соболев В.Д., Чураев Н.В. Измерение капиллярного давления и вязкости жидкостей в кварцевых микрокапиллярах. *ДАН СССР*. 1970, **193**(3), 630–633.
13. Ребиндер П.А. *Физико-химическая механика*. М.: Знание, 1958. 372 с.
14. Тамм И.Е. *Основы теории электричества*. М.: Наука, 1989. 616 с.
15. Бардасов С.А., Соболев В.Д., Чураев Н.В. Зависимости толщин незамерзающих прослоек воды от внешнего давления. *Коллоидный журнал*. 1992, **54**(2), 28–35.

16. Бондаренко Н.Ф., Нерпин С.В. *Поверхностные силы в тонких пленках и дисперсных системах*. М.: Наука, 1972. С. 281–287.
17. Киселева О.А., Кладько С.Н., Соболев В.Д., Чураев Н.В. Исследование адгезии льда к поверхности кварцевых капилляров. *Коллоидный журнал*. 1975, **37**(6), 1220–1222.
18. Гросу Ф.П., Болога М.К., Блощицын В.В., Стишков Ю.К., Кожевников И.В. Зарядообразование в жидких диэлектриках под влиянием электростатического поля. *ЭОМ*. 2007, (5), 16–38.
19. Болога М.К., Гросу Ф.П., Поликарпов А.А., Моторин О.В. Конденсация парогазовой смеси в усло-

виях коронного разряда. *ЭОМ*. 2011, **47**(4), 118–122.

Поступила 28.11.13

После доработки 30.12.13

Summary

The data on the speed of movement of a column of ice in cylindrical capillaries under the influence of the inhomogeneous electric field has been used as the base for the estimations of viscosity of a thin layer of liquid between the ice and the surface of quartz.

Keywords: adhesion, liquid layer, capillary, inhomogeneous electric field.