

Моделирование воздействия внешнего неоднородного электрического поля на массообмен в конических капиллярах

И. Н. Карпович

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

Выполнены расчеты потоков пара и пленочной жидкости под влиянием градиентов напряженности неоднородного электрического поля и давления в зависимости от радиуса и конусности капилляров для воды и этиленгликоля.

Ключевые слова: конический капилляр, жидкая пленка, неоднородное электрическое поле, массоперенос, пористое тело.

УДК 532.685:537.228

ВВЕДЕНИЕ

Перемещение жидкостей и газов внутри многих дисперсных природных и искусственных материалов происходит в пространстве сообщающихся пор. Тепло- и массообмен в капиллярно-пористых системах определяет кинетику многих технологических процессов. При этом важное место занимает межфазный перенос массы в пористых материалах, который сопровождается явлениями смачивания, растекания, сорбции и перемещения границы раздела фаз, обусловленными действием поверхностных сил. Для исследования механизма массообмена в пористой среде используют капиллярные модели различной сложности, которые позволяют получить надежные значения параметров тепло- и массообмена.

В теоретических исследованиях [1–4] неоднородное электрическое поле (НЭП) рассматривается как эффективный метод управления тепло-массопереносными процессами при взаимодействии различных поверхностей с жидкостями и газами. Особая роль отводится внешним полям высокой напряженности и неоднородности, в частности, полю коронного разряда (ПКР), способного заметно интенсифицировать процессы массообмена в дисперсных системах. Основные выводы развитой теории находятся в согласии с экспериментальными исследованиями влияния ПКР на испарение жидкостей из кварцевых капилляров, которые являются моделью пористых структур. Так, в работе [5] показано, что применение ПКР позволяет повысить скорость испарения воды из капилляров в 3–5 раз. Это объясняется тем, что внутри капилляра, помещенного в ПКР, неоднородность поля способствует добавлению к диффузионному потоку молекул пара электроконвективного потока. Вне капилляра разрядное поле действует как осушитель, понижая давление пара над устьем капилляра. Этот

эффект может быть вызван как экранированием капилляра в зоне коронного разряда избыточным пространственным зарядом большой плотности, так и сорбцией молекул пара на ядрах (ионах), возникающих в коронном разряде. Конвективное действие поля ведет к интенсивному перемешиванию парогазовой смеси, что улучшает отвод пара от устья капилляра.

Влияние ПКР на процесс испарения полярных жидкостей проявляется особенно заметно при высоких значениях относительного давления пара ($p/p_s \geq 0,80$). В этих условиях на стенках капилляра за отступающим мениском жидкости образуется полимолекулярная пленка. Если градиент напряженности поля совпадает с потоком испарения, под воздействием силового поля [3, 6] эффективная толщина смачивающей пленки увеличивается за счет подпитки ее из основного столбика капиллярной жидкости. Вытягиваемая толстая пленка в сильно неоднородном поле становится неравновесной. Это может быть вызвано адсорбцией ионов на поверхности капиллярной жидкости в ПКР, которая способна существенно изменять свойства поверхности раздела фаз [4]. Возникающие флуктуации толщины пленки приводят к ее смыканию и образованию перемычек, которые защемляют пузырьки паровоздушной смеси. После образования пузырьков наблюдается их продвижение в глубь капилляра, заполненного жидкостью, то есть жидкость по смачивающей пленке, которая покрывает участок капилляра между менисками пузырька, перемещается в область большей неоднородности поля ближе к устью капилляра. Таким образом, эффект диспергирования жидкого столбика с последующей электромиграцией полярной жидкости по стенкам капилляра к поверхности испарения обеспечивает высокую степень интенсификации процесса испарения.

В сложной и разнообразной геометрии порового пространства реальных капиллярно-пористых материалов преобладающую часть занимают конические и тупиковые поры [7]. Заслуживают внимания явления массообмена в условиях, когда поры заполнены жидкостью частично. Такие процессы имеют место, например, при увлажнении и осушении почвы, изготовлении и эксплуатации керамических изделий, пористых электродов, элементов тепловых труб, строительных материалов и конструкций. Механизм явлений, определяющих закономерности массообмена, с учетом как основных особенностей пористой среды, так и внешних воздействий, которые, в частности, могут создаваться силовым полем, изучен недостаточно. Поэтому цель настоящей работы – расчет потоков пара и пленочной жидкости под влиянием градиента напряженности внешнего НЭП и градиентов расклинивающего и капиллярного давлений в коническом капилляре.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Для анализа массопереноса рассмотрим модель элемента порового пространства в виде конического капилляра, частично заполненного жидкостью (рис. 1а). Мениски смачивающей жидкости имеют различную кривизну и разделены пузырьком воздуха. Поверхность капилляра на участке переноса между менисками покрыта смачивающими пленками, толщина которых $h(x)$ зависит от координаты x : $h_1 = h(0)$ и $h_2 = h(l)$, где $l \gg r$ – длина пузырька. НЭП высокой неоднородности может создаваться системой электродов «игла–пластина» (рис. 1б). Вычисления двухфазных потоков под действием внешнего НЭП проведем с учетом условия локального равновесия, которое обеспечивается равенством химических потенциалов молекул в пленке и паре в каждом сечении капилляра [8]:

$$P = \frac{RT}{v} \ln \frac{p}{p_s}, \quad (1)$$

где P – давление в пленке жидкости; T , p_s , $p = p(x)$ – температура, давление насыщенного пара и давление пара соответственно; R – газовая постоянная; v – молярный объем жидкости.

Как известно, кинетика переноса массы в дисперсных материалах определяется градиентами соответствующих потенциалов переноса. Уравнение Онзагера для плотности потока жидкости и пара во влагонасыщенном теле при наличии постоянного НЭП в изотермических условиях при отсутствии электроосмоса может иметь вид:

$$\vec{J} = -\lambda_m \nabla U - \lambda_e \nabla E, \quad (2)$$

где U – влагосодержание материала; E – напряженность электрического поля; λ_m , λ_e – коэффициенты изотермической и электровлагодиффузионной массопроводности соответственно.

Если поры заполнены жидкостью частично, перенос вещества происходит в виде пара и жидкости. Движущей силой диффузионного переноса пара является градиент парциального давления пара ∇p . Вязкое течение в пленке происходит под действием градиента капиллярного и расклинивающего давления ∇P . Используя уравнение Фика для диффузионного потока и уравнение гидродинамики тонких пленок [9] для пленочного потока, получим плотность потока массы в коническом капилляре без наложения поля:

$$\vec{J}_m = \vec{J}_1 + \vec{J}_2 = -\frac{Dvc}{RT} \nabla p - \frac{2\rho_1 h^3}{3\eta r} \nabla P, \quad (3)$$

где D – коэффициент диффузии пара; c – концентрация молекул пара; ρ_1 – плотность жидкости; η – ее вязкость.

Для описания электроконвективных явлений используют приведенную ниже систему уравнений (4), предложенную в монографии [3]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \vec{v}}{\partial \tau} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} &= \vec{g} - \frac{\nabla p}{\rho_1} - \frac{\eta}{\rho_1} \nabla^2 \vec{v} + \\ &+ \frac{\rho_e \vec{E}}{\rho_1} - \frac{\varepsilon_0 E^2}{2\rho_1} \cdot \nabla \varepsilon_1 + \frac{1}{2\rho_1} \varepsilon_0 \nabla \left(E^2 \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \rho_1} \right); \\ \nabla \vec{v} &= 0; \\ \nabla \vec{A} &= \frac{\rho_a}{\varepsilon_0 \varepsilon}; \\ \nabla \vec{i} + \frac{\partial \rho_e}{\partial \tau} &= 0; \\ \vec{i} &= \rho_e b \vec{E} + \rho_e \vec{v} - D \nabla \rho_e; \\ \nabla \times \vec{A} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где \vec{v} – средняя скорость движения жидкости; τ – время; g – ускорение свободного падения тела; ρ_e – объемная плотность заряда; ε_0 – диэлектрическая постоянная; ε_1 – диэлектрическая проницаемость жидкости; \vec{i} – плотность тока; b – коэффициент подвижности ионов в жидкости (газе).

Уравнение Навье-Стокса системы (4), кроме обычных факторов (давление, гравитация, вязкость), содержит и плотность электрических сил:

$$\vec{f}_e = \rho_e \vec{E} - 0,5 \varepsilon_0 E^2 \nabla \varepsilon_1 + 0,5 \varepsilon_0 \nabla \left(E^2 \rho_1 \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial \rho_1} \right), \quad (5)$$

посредством которых электрическое поле воздействует на гидродинамику жидкостей. При

неполном насыщении (капилляр заполнен жидкостью частично) наложение НЭП вызывает электродиффузию пара в свободной от жидкости части капилляра и электромиграцию жидкости в пленке, которая покрывает стенки капилляра между менисками капиллярной жидкости. Плотность потока массы, вызванного действием НЭП, учитывая [2, 3], можно записать:

$$\vec{J}_e = \vec{J}_3 + \vec{J}_4 = \frac{Dp_e c}{kT} \nabla E + \frac{2\rho_1 h^3 \vec{f}_e}{3\eta r}, \quad (6)$$

где p_e – дипольный момент молекулы; k – постоянная Больцмана.

Дифференцирование соотношения (1) по координате x позволяет найти зависимость ∇P от ∇p и подставить в (3) вместо ∇P его значение, выраженное через ∇p .

Тогда плотность общего потока массы в коническом капилляре при наличии внешнего НЭП в выбранной системе координат (рис. 1) запишется в виде:

$$\vec{J} = -\frac{Dvc}{RT} \nabla p - \frac{2\rho_1 RT h^3}{3\eta vr} \frac{\nabla p}{p} + \frac{Dp_e c}{kT} \nabla E + \frac{2\rho_1 h^3 \vec{f}_e}{3\eta r} = \vec{J}_1 + \vec{J}_2 + \vec{J}_3 + \vec{J}_4. \quad (7)$$

В дальнейших расчетах и рассуждениях будем использовать модули векторных величин. Давление в пленке складывается из капиллярного $P_k = -\sigma/r$, обусловленного ее кривизной, и расклинивающего Π , обусловленного действием поверхностных сил [8]. Толщину жидкой пленки определяем на основании экспериментальных изотерм расклинивающего давления $\Pi(h)$, полученных в работе [10] для пленок воды и этиленгликоля на поверхности цилиндрических кварцевых капилляров. Применяя аппроксимацию [11] $\Pi(h) = A/h^3$ ($A = \text{const}$), удовлетворительно описывающую известные экспериментальные данные, для давления в пленке получим:

$$P = -\frac{\sigma}{r} - \Pi = -\frac{\sigma}{r} - \frac{A}{h^3}. \quad (8)$$

Задавая радиус капилляра

$$r(x) = r_1 + \alpha x, \quad (9)$$

где $\alpha = (r_2 - r_1)/l$ – конусность капилляра, можно выразить $h(x)$ через $P(x)$. Замена $P(x)$ на $p(x)$ позволит найти решение уравнения (7) в виде $p=p(x)$.

Краевые условия уравнения (7) с учетом [12] имеют вид:

$$\begin{aligned} p_1 &= p(0) = p_s \exp(-2\sigma v / (r_1 RT)), \\ p_2 &= p(l) = p_s \exp(-2\sigma v / (r_2 RT)). \end{aligned} \quad (10)$$

При использовании условия локального равновесия, как было показано в работе [9], посто-

янной остается только сумма слагаемых в уравнении (7), в то время как величина каждого из них меняется по длине капилляра. Продифференцированное по координате x уравнение (7) решалось на ПК методом итераций. Для этого проводилась квазилинеаризация уравнения согласно [13] и находилось численное решение краевой задачи, то есть распределение $p = p(x)$. Точность решения контролировалась путем проверки условия

$$|(J_{n+1} - J_n) / J_n| < \delta, \quad (11)$$

где n – номер итерации и $\delta = 0,01$ – заданная относительная погрешность.

Из-за различной кривизны менисков ($r_1 < r_2$), ограничивающих пузырек паровоздушной смеси в капилляре, градиент давления пара будет положительным ($p_1 < p_2$). Поэтому первый и второй члены уравнения (5) отрицательны: первый определяет диффузионный поток молекул пара, а второй – обратный поток жидкости в пленке под действием градиента давления, обусловленного конусностью капилляра. Третье слагаемое, которое соответствует электродиффузионному потоку дипольных молекул пара, и четвертое, характеризующее электромиграцию жидкости под действием НЭП, при $\nabla E > 0$ будут положительными.

В проведенных вычислениях использованы табличные значения физических констант, которые отвечали заданной температуре. На участке l зависимость $E(x)$ принималась линейной, то есть $\nabla E = \text{const}$. При линейной зависимости диэлектрической проницаемости ϵ_1 от плотности диэлектрика ρ_1 в изотермических условиях выражение (5) преобразуется к виду $\vec{f}_e = \rho_e \vec{E} + 0,5\epsilon_0(\epsilon_1 - 1)\nabla E^2$. В связи с отсутствием корректных значений объемной плотности заряда ρ_e в капиллярной жидкости расчеты выполнены при $\rho_e = 0$. Учитывая эти условия, определялись как отдельные составляющие плотности потока, так и общий поток массы J .

Расчеты выполнены для двух полярных жидкостей с различной летучестью и вязкостью: воды и этиленгликоля. Зависимости J и отдельных составляющих потока от радиуса и конусности капилляров получены для значений ∇E от $3 \cdot 10^7$ до $3 \cdot 10^8$ В/м² при среднем значении $E = 10^6$ В/м.

Для воды принято (при $T = 293$ К): $D = 0,252 \cdot 10^{-4}$ м²/с; $p_e = 6,2 \cdot 10^{-30}$ Кл·м; $c = 17,29 \cdot 10^{-3}$ кг/м³; $\rho_1 = 998$ кг/м³; $\eta = 10^{-3}$ Н·с/м²; $\nu = 18,06 \cdot 10^{-3}$ м³/кмоль; $\epsilon_1 = 78,3$; $\sigma = 72,75 \cdot 10^{-3}$ Н/м; $p_s = 2,38 \cdot 10^3$ Н/м².

Для этиленгликоля: $D = 0,52 \cdot 10^{-5}$; $p_e = 7,4 \cdot 10^{-30}$; $c = 3,5 \cdot 10^{-3}$; $\rho_1 = 1113$; $\eta = 19 \cdot 10^{-3}$; $\nu = 55,77 \cdot 10^{-3}$; $\epsilon_1 = 38,7$; $\sigma = 46,1 \cdot 10^{-3}$; $p_s = 0,068 \cdot 10^3$.

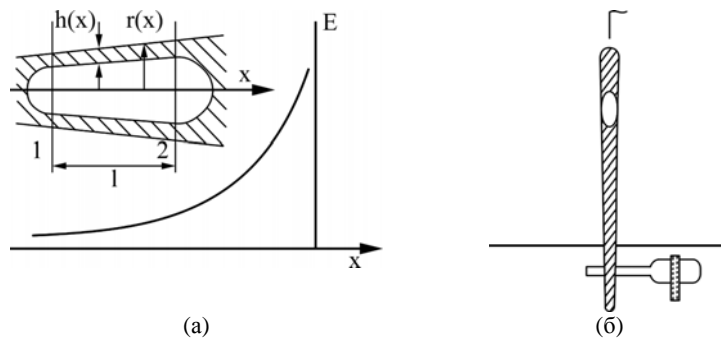


Рис. 1. Расчетная схема элемента порового пространства (а) и схема расположения капилляра (б) в неоднородном электрическом поле.

Отношение l/r менялось от 10 (для больших r) до 1000 (для малых r). В этих условиях, как было показано авторами [14], в капиллярах радиусов $r > 1$ мкм могут оставаться устойчивыми толстые (100–300 нм) метастабильные пленки жидкости. При увеличении длины пузырьков толстые пленки становятся неустойчивыми, что приводит к резкому снижению скорости массопереноса в НЭП.

При неполном насыщении капиллярно-пористых тел основным механизмом массопереноса является перемещение жидкости в пленках, которые покрывают стенки капилляров. В цилиндрических капиллярах радиусами 1–100 мкм пленочное течение может осуществляться под влиянием градиента силового поля [10], причем вклад потока пара в общий поток массы здесь не превышает 1%. В конических капиллярах, как известно, соотношение потоков выглядит по-другому: даже при отсутствии внешних воздействий имеет место поток J_2 жидкости в пленках, обусловленный разностью капиллярных давлений менисков с различными радиусами. Вклад потока J_2 в общий поток массы с увеличением конусности капилляров α возрастает, и при достаточно больших значениях α становится доминирующим [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Принимая поток J_2 основным (уравнение 7), влияние НЭП на массообмен в капиллярах с различной конусностью можно оценить отношением абсолютных величин $J/|J_2|$. На рис. 2 показаны зависимости этого отношения от конусности капилляра, рассчитанные для $x = l/2$. Величина каждого из слагаемых (отдельных потоков) в уравнении (7) меняется по длине капилляра. Постоянным остается только суммарный поток J .

Поток J_2 всегда направлен в узкую часть капилляра, то есть для избранной нами конфигурации внешнего поля $J_2 < 0$. С увеличением конусности α абсолютная величина потока J_2 возрастает. При $J/|J_2| = -1$ основным механизмом переноса является поток в пленках под дей-

ствием капиллярных сил. Например, для воды при $r_1 = 1$ мкм и $\alpha \geq 10^{-5}$ можно считать $J \approx J_2$ (рис. 2).

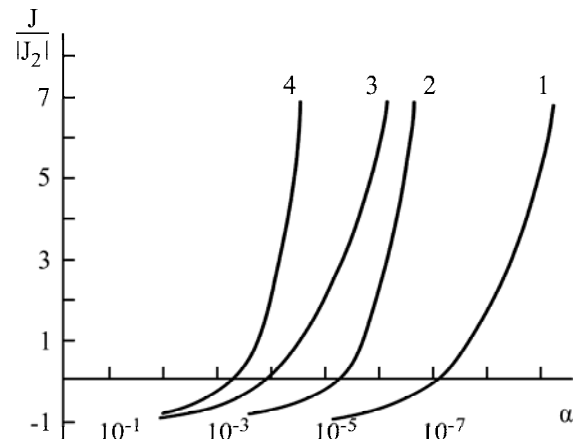


Рис. 2. Зависимости $J/|J_2|$ от конусности капилляров α для воды (1,3) и этиленгликоля (2,4): 1 – $r_1 = 1$ мкм, $l = 0,5$ мм; 2 – $r_1 = 10$ мкм, $l = 1$ мм; 3 – $r_1 = 40$ мкм, $l = 1$ мм; 4 – $r_1 = 50$ мкм, $l = 1$ мм; $E = 10^6$ В/м; $\nabla E = 10^8$ В/м².

С уменьшением конусности абсолютное значение потока J_2 стремится к нулю, следовательно, $J/|J_2| \rightarrow \infty$. В этих условиях вклад электромиграционного потока в пленках J_4 , вызванного действием НЭП, становится подавляющим – он в несколько раз превышает пленочный поток J_2 под действием градиента капиллярных сил. Отсюда, в частности, следует, что существенного ускорения массопереноса можно достичь как раз для таких жидкостей, когда градиент капиллярного давления мал (плохое смачивание, низкое межфазное натяжение, большие радиусы пор). Полем можно удерживать и перемещать в капилляре несмачивающую его жидкость при условии, что отрицательные значения второго слагаемого компенсируются положительными значениями четвертого слагаемого в уравнении (7). В то же время, меняя знак поля, можно препятствовать вхождению смачивающей жидкости в капилляры или ускорять этот процесс. Таким образом, применение НЭП создает возможность управления скоростью капиллярного массообмена в нужном для практики направлении.

Из рис. 2 видно, что с уменьшением радиуса капилляров более весомое значение приобретает конусность. Если при $r_1 = 40$ мкм для воды влияние конусности проявляется при $\alpha \geq 10^{-3}$, то при $r_1 = 1$ мкм – уже при $\alpha \geq 10^{-6}$. Это объясняется увеличением вклада потока J_2 в пленках в общий поток J при уменьшении среднего радиуса капилляров [15]. При других одинаковых условиях влияние поля более заметно на перемещение пленок воды, полярность которой ($\varepsilon_1 = 78,3$) по сравнению с этиленгликолем ($\varepsilon_1 = 38,7$) выше.

Расчеты показали, что для некоторого значения конусности $\alpha = \alpha_*$ суммарный поток массы $J = 0$, то есть поток пара J_1 , электродиффузионный поток J_3 и электромиграционный поток J_4 уравниваются обратным пленочным потоком J_2 . Такие циркуляционные потоки реализуются не в полностью насыщенных жидкостью пористых средах [16]. Поток массы под действием градиента капиллярного давления уравнивается потоком, вызванным действием силового (в данном случае гравитационного) поля. Локальная конусность капилляра α_* , которая соответствует условию $J = 0$, зависит от градиента напряженности поля и радиуса капилляра. Составленная программа позволяет найти ее значение.

В реальных пористых телах капилляры имеют переменный радиус. Поэтому пузырек воздуха, который перемещается в противоположном к градиенту напряженности направлении, может задержаться в месте расширения поры, если значения r , α и EVE таковы, что выполняется условие $J = 0$. Это означает, что количество влажного воздуха или пара, а следовательно, и влагосодержание пористого тела могут не меняться, несмотря на наличие градиента силового поля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные численные расчеты не позволили выявить влияние взаимодействия потоков пара и жидкости в капилляре. Учет влияния неаддитивности потоков, а также капиллярного антидавления [17], вызванного гистерезисом краевого угла (отличием наступающего и отступающего краевых углов менисков), позволит уточнить найденные решения. Тем не менее полученные результаты, в частности, зависимость обратного потока жидкости в пленках под действием градиента капиллярного давления от конусности капилляра, находятся в соответствии с данными работы [18], где исследовался механизм массообмена в коническом капилляре, погруженном в жидкость. Значения суммарного потока J в капиллярах с достаточно малой конусностью, рассчитанные по уравнению (7),

согласуются с экспериментальными данными [9], полученными при перемещении под действием НЭП смачивающих пленок воды в цилиндрических капиллярах.

В дальнейших исследованиях межфазного массообмена необходимо учитывать фактор электризации, объемную и поверхностную проводимость капиллярной жидкости, а также изменение свойств твердой поверхности в электрическом поле [4, 19]. Интересно оценить роль капиллярных волн на поверхности мениска и флуктуаций толщины смачивающей пленки [20, 21], способствующих ее неустойчивости. В связи с этим заслуживает внимания исследование явлений генерации и интенсивного развития автоколебаний столбиков капиллярной жидкости в высокоградиентном НЭП.

Таким образом, неоднородное электрическое поле способно оказывать заметное влияние на массоперенос в пористой среде при неполном насыщении ее жидкостью, что может стать основой для развития новых технологий. Применение НЭП для управления массообменом наиболее эффективно, когда обычные процессы протекают медленно, а также при использовании жидкостей с достаточно высокой диэлектрической проницаемостью. Полученные результаты могут найти применение при разработке методики и режимов увлажнения, высушивания, капиллярного вытеснения жидкостей и растворов из пористого материала, экстракции веществ из полидисперсных капиллярно-пористых систем. В то же время рассчитанные параметры массопереноса могут быть использованы для решения задач тепло- и массообмена в неоднородной среде или уточнения полученных ранее решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гросу Ф.П., Болога М.К., Болога Ал.М. *ЭОМ*. 2013, **49**(1), 20–29.
2. Панасюк А.Л., Панченко М.С., Старов В.М., Чураев Н.В. *Инженерно-физический журнал*. 1978, **35**(1), 93–100.
3. Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. *Электроконвекция и теплообмен*. Кишинев: Штиинца, 1977. 320 с.
4. Жакин А.И. *Успехи физических наук*. 2013, **183**(2), 153–177.
5. Карпович И.Н., Чураев Н.В., Панченко М.С. *Инженерно-физический журнал*. 1981, **41**(6), 1049–1056.
6. Тамм И.Е. *Основы теории электричества*. М.: Наука, 1989. 616 с.
7. Аксельруд Г.А., Альтшулер М.А. *Введение в капиллярно-химическую технологию*. М.: Химия, 1983. 264 с.
8. Дерягин Б.В., Чураев Н.В. *Докл. АН СССР*. 1972, **207**(3), 572–575.

9. Дерягин Б.В., Нерпин С.В., Чураев Н.В. *Коллоидный журнал*. 1964, **26**(3), 301–306.
10. Карпович И.Н., Чураев Н.В., Панченко М.С. *Коллоидный журнал*. 1984, **46**(1), 114–118.
11. Чураев Н.В. Свойства смачивающих пленок жидкостей. В кн. *Поверхностные силы в тонких пленках и устойчивость коллоидов*. М.: Наука, 1974. 81–89.
12. Киселева О.А., Старов В.М., Чураев Н.В. *Коллоидный журнал*. 1977, **39**(6), 1164–1167.
13. Беллман Р., Калаба Р. *Квазилинеаризация и нелинейные краевые задачи*. М.: Мир, 1968. 186 с.
14. Викторина М.М., Дерягин Б.В., Ершова И.Г., Чураев Н.В. *Докл. АН СССР*. 1971, **200**(6), 1306–1309.
15. Дерягин Б.В., Чураев Н.В. *Смачивающие пленки*. М.: Наука, 1984. 160 с.
16. Глобус А.М. *ДАН СССР*. 1965, **160**(1), 81–84.
17. Зорин З.М., Соболев В.Д., Чураев Н.В. *Коллоидный журнал*. 2001, **63**(2), 200–207.
18. Мигун Н.П., Шнип А.И. *Инженерно-физический журнал*. 2002, **75**(6), 145–150.
19. Болога М.К., Гросу Ф.П. *ЭОМ*. 2012, **48**(5), 93–103.
20. Карпович И.Н., Панченко М.С. *Инженерно-физический журнал*. 2006, **79**(5), 20–26.
21. Алиев И.Н., Мильвидский А.Р., Наумов И.А. *Инженерно-физический журнал*. 2002, **75**(5), 86–87.

Поступила 16.12.14

После доработки 14.09.15

Summary

Calculations have been made of the flows of vapor and a liquid film under the influence of the tension gradients of the inhomogeneous electric field and pressure depending on the radius and taper of the capillary for water and ethylene glycol.

Keywords: tapered capillary, liquid film, non-uniform electric field, mass transfer, porous body.