

сравнение невозможно, так как для такой конфигурации в литературе пробивные характеристики отсутствуют. Таким образом, наличие электролитного электрода не оказывает влияния на величину пробивного напряжения. По-видимому, на пробой газового промежутка с электролитным электродом воздействуют лишь процессы ионизации в нем, а эмиссионные свойства электролитов не имеют существенного значения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прокопович Л.И. Механические эффекты при коронном разряде между острием и плоскостью // ЖТФ. 1996. Т. 36. Вып. 4. С. 643–645.
2. Ратников Э.А. Механическая сила, возбужденная на коронирующем электроде // Известия вузов. Физика. 1968. № 2. С. 128–132.
3. Ратников Э.А. Влияние температуры коронирующего электрода на электрические и механические параметры коронного разряда. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Минск, 1969.
4. Paluch M. Elektryczny potencjal powierzchniowy i napiecie powierzchniowy roztworow wodnych niektorych alifatycznych okeymow // Roczn. chem. 1968. Vol. 42. N 10. P. 1697–1703.
5. Jarvis N., Scheiman M. Surface Potentiale of Aqueous Electrolyte solutions // J. Phys. Chem. 1968. Vol. 72. N 1. P. 74–78.
6. Брискман В.А., Шайдуров Г.Ф. Параметрическое возбуждение неустойчивости жидкости в магнитном и электрическом полях // Магнитная гидродинамика. 1969. № 3. С. 15–19.
7. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. М., 1960.

Поступила 14.02.2001

Summary

The disruptive discharge of air gap between metallic and electrolytic electrodes have been studied. The dependence of sparking voltage and height of solution lifting from electroconductivity and polarity at changing of voltage from 3 to 20 kV.

И.М. Панченко, М.С. Панченко

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ПРОЦЕСС ПЕРЕНОСА ТЕПЛА ВО ВЛАЖНОМ МАКРОПОРИСТОМ ТЕЛЕ

*Ровенский государственный гуманитарный университет,
ул. Остафова, 39, г. Ровно, 33028, Украина*

Научно-технический прогресс в разных областях техники неразрывно связан с ростом удельных мощностей и предъявляет все более высокие требования к работе самой разнообразной аппаратуры и оборудования. Это способствует внедрению более современных методов интенсификации теплообмена и создания надежно управляемых потоков теплоносителей. Наличие в аппаратуре и оборудовании электрических полей (ЭП) высокой напряженности E предполагает расширение и углубление исследования тепло- и массообмена в ЭП [1]. В настоящее время управление взаимосвязанными и взаимообусловленными потоками тепла и массы во влажных телах в условиях действия внешних ЭП – актуальная, но вместе с тем сложная задача, решение которой носит характер, далеко не удовлетворяющий требованиям технологии и современной организации производственных процессов.

Во влажном капиллярно-пористом теле вместе с кондуктивным переносом энергии в виде тепла через скелет пористого тела и внутривещное вещество происходит перенос теплосодержания

и за счет внутреннего массопереноса этого вещества, на который в значительной степени влияет силовое воздействие ЭП [2]. Поэтому теплообмен и теплопроводность во влажных телах, на которые наложены разнообразные ЭП, должны рассматриваться в неразрывной связи с массообменом. Следовательно, задача определения термических коэффициентов влажных тел, находящихся во внешних ЭП, приобретает решающее значение.

При наличии тепло- и массообмена во влажном теле основной закон теплопроводности имеет вид [3]

$$j_T = -\lambda \nabla T + \sum_i h_i j_i, \quad (1)$$

где j_T – плотность потока тепла; λ – истинный коэффициент теплопроводности твердого скелета сухого пористого тела; j_i – поток влаги в виде пара, жидкости или других субстанций; h_i – удельное теплосодержание того или иного потока внутри тела; ∇T – градиент температуры.

Экспериментально определяемый коэффициент теплопроводности влажного тела по формуле

$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{j_T}{\nabla T} \quad (2)$$

дает не истинный, а эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$. В случае аддитивности он должен представляться выражением

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda + \lambda_l + \lambda_k + \lambda_g + \lambda_n + \lambda_{\text{жс}}, \quad (3)$$

где λ – коэффициент молекулярной (атомной) теплопроводности твердого скелета пористого тела, λ_l – коэффициент лучистой теплопроводности между стенками пор, λ_k – коэффициент конвективной теплопроводности газовой среды в порах, λ_g , λ_n , $\lambda_{\text{жс}}$ – соответственно коэффициенты теплопроводности через внутривоздушный воздух, пар и влагу в виде жидкости (адсорбционные, смачивающие пленки, капиллярная влага).

Как известно [3], когда диаметр пор меньше $5 \cdot 10^{-5}$ м конвективным и лучистым теплообменом при перепаде температур между стенками пор $\Delta T \approx 10$ К практически можно пренебречь. Следовательно, в сухом капиллярно-пористом теле (радиусы капилляров меньше 10^{-5} м) при умеренных перепадах температуры передача тепла конвекцией и излучением ничтожно мала по сравнению с истинной теплопроводностью.

В микрокапиллярах коэффициент теплопроводности воздуха прямо пропорционален давлению газа и радиусу капилляра, поэтому он не является постоянной величиной. Механизм переноса тепла и массы в микрокапиллярах определяется молекулярным (кнудсеновским течением). Но количество молекул воздуха в увлажненных микрокапиллярах очень мало по сравнению с количеством молекул пара над пленкой адсорбционно-связанной влаги. Их отношение составляет примерно 10^{-5} [2, 3]. Следовательно, передача тепла в микрокапиллярах влажных капиллярно-пористых тел в основном происходит путем молекулярной (атомной) теплопроводности через скелет тела и внутривоздушное связанное вещество (жидкость и пар). Но в не полностью насыщенных влагой макрокапиллярах количество молекул воздуха уже превышает число молекул пара, находящихся в динамическом равновесии со смачивающими пленками воды и менисками влаги капиллярного состояния.

Существует немало работ, например, [3–6], посвященных исследованию зависимости коэффициента теплопроводности от влагосодержания U при данной пористости дисперсных тел. Во всех работах отмечается, что $\lambda_{\text{эф}}$ в основном значительно увеличивается при уменьшении коэффициента пористости дисперсных тел и росте их влажности при заданной пористости.

В неоднородном электрическом поле (НЭП) при наличии термических и влажностных полей перенос влаги обусловлен действием не только сил диффузии (∇U), термодиффузии (∇T), но и влиянием пондеромоторных сил, обусловленных НЭП, на отдельные молекулы водяного пара и воздуха ($\sim \nabla E$), адсорбционные и смачивающие пленки, на разобщенные столбики влаги капиллярной конденсации в микропорах и столбики влаги капиллярного состояния в макропорах ($\sim E \nabla E$) [7] и электроосмотических сил ($nL_{\pm}qE$), где n – гидратационное число иона с зарядом q ; L_{\pm} – феноменологический коэффициент, включающий в себя и коэффициент диффузии гидратированных ионов. Последний вид электровлагопереноса характерен лишь для постоянного ЭП.

В общем случае поток влаги во влагонасыщенном теле будет в соответствии с уравнением Онсагера определяться соотношением

$$J = -\lambda_m \nabla U - \lambda_T \nabla T + \lambda_E \nabla E + \lambda_{\phi} \nabla \phi. \quad (4)$$

Таким образом, на величину $\lambda_{\text{эф}}$ влажного пористого тела должны влиять градиенты влагосодержания U , температуры T , напряженности E и потенциала ϕ ЭП. Поэтому в выражение (3) в случае действия во влажном пористом теле НЭП, как дополнительные составляющие должны входить термогради-

ентный коэффициент теплопроводности λ_m , обусловленный термодиффузией влаги, коэффициент электровлагодиффузионной теплопроводности $\lambda_{\text{всм}}$ и коэффициент электроосмотической теплопроводности $\lambda_{\text{эот}}$. Тогда при условии аддитивности и в случае воздействия ЭП на влажное тело, в котором присутствуют микро- и макропоры, $\lambda_{\text{эф}}$ должен представляться выражением

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda + \lambda_l + \lambda_k + \lambda_g + \lambda_n + \lambda_{\text{жс}} + \lambda_m + \lambda_{\text{всм}} + \lambda_{\text{эот}} . \quad (5)$$

В результате во влажных телах, пребывающих под воздействием внешнего ЭП, отношение эффективного коэффициента теплопроводности к истинному $\left(\frac{\lambda_{\text{эф}}}{\lambda}\right)_{\text{ЭП}}$ должно быть больше на величину

$$K_{\lambda_{\text{ЭП}}} = \frac{\lambda_{\text{эф}} - \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} . \quad (6)$$

Эту безразмерную величину можно, следуя [3], назвать критерием теплопроводности влажных тел в ЭП.

Направленное перемещение жидкости во влагонасыщенном пористом теле под действием приложенной разности потенциалов (электроосмос) изучено достаточно полно. Согласно уравнению Гельмгольца-Смолуховского линейная скорость движения жидкости относительно пористой мембраны

$$U_0 = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\xi}{\eta} E , \quad (7)$$

то есть она прямо пропорционально зависит от напряженности ЭП.

При неполном влагонасыщении пористого тела на влагоперенос в постоянном, а тем более в переменном невысокой частоты, ЭП в основном влияет НЭП. Это воздействие распространяется на отдельные дипольные молекулы водяного пара и воздуха, на удельные объемы дискретных и сплошных водных пленок на поверхности микро- и макрокапилляров и столбики объемного капиллярного конденсата в микрокапиллярах или жидкости капиллярного состояния в макрокапиллярах. В первом случае скорость перемещения молекул прямо пропорциональна ∇E , в остальных – $E \nabla E$ [7, 8].

Таким образом, на процесс теплопереноса в достаточно влажном микропористом теле несомненно должны влиять постоянные однородные и неоднородные ЭП. В переменных ЭП невысокой частоты такое влияние может оказывать только НЭП [9]. В грубодисперсных телах (диаметр макропор больше 10^{-5} м) должна проявляться дополнительная интенсификация взаимосвязанного тепломасопереноса за счет явления тепловой конвекции, электроконвекции водяного пара и газов воздуха [1]. В таких телах “чистая” теплопроводность при значительных перепадах температуры ($\Delta T > 10$ К) между стенками капилляра возрастает за счет лучистого теплообмена.

Насколько нам известно, до настоящего времени исследования, где определялся бы эффективный коэффициент теплопроводности во влажном материале в условиях воздействия на него ЭП, в том числе высокой напряженности, не проводились. Это и послужило поводом для экспериментальных работ такого рода. Из существующих методов экспериментальных исследований $\lambda_{\text{эф}}$ выбран универсальный метод Н.Н.Бабьева [3]. В нашей модификации он представляется дальнейшим развитием методов определения термовлагокоэффициентов из одного и того же опыта в условиях воздействия ЭП.

Основной частью установки служит фторопластовый цилиндр (длина 150 мм, диаметр 25 мм), подвешенный своими концами к коромыслу аналитических весов АДВ-200. Расстояние между точками подвеса, равное 140 мм, в точности равно расстоянию между призмами коромысла весов. Часть цилиндра (115 мм по длине) залита парафином (эталонным материалом), а остальная часть (35 мм) заполняется исследуемым материалом. Парафин обеспечивает влагоизоляцию одного конца слоя исследуемого материала. Второй слой материала (торец цилиндра) закрывается диском из медной фольги толщиной 0,1 мм и диаметром 50 мм. Медный диск также обеспечивает хорошую влагоизоляцию. Вместе с тем он является электродом и выравнивает температуру по сечению цилиндра, предотвращая проникновение инфракрасных лучей в торец цилиндра, который нагревается лучистым потоком от лампы инфракрасного излучения. Вторым электродом служит тонкая медная проволока, пропущенная по оси цилиндра через парафин. Она заканчивается на границе между парафином и образцом. Температура измеряется термомпарами в специальных точках: 1) в плоскости соприкосновения медного диска и исследуемого материала, т.е. на внутренней поверхности диска T_1 ; 2) в середине слоя исследуемого материала T_m ; 3) в плоскости соприкосновения материала и парафина T_2 ; 4) в парафине на расстоянии 20 мм от второго торца цилиндра T_0 . Для защиты цилиндра

от влияния потоков воздуха он помещался в специальный термостат. Опыт ставился таким образом: свободный от парафина конец цилиндра заполнялся образцом пористого тела с известным влагосодержанием, а затем закрывался диском, места соединения дополнительно покрывались специальным термостойким и гидрофобным лаком. После уравнивания цилиндра включался источник постоянного напряжения и лампа инфракрасного излучения и одновременно регистрировалось время по электронному секундомеру. Затем с помощью показания термопар регистрировалась разность температур $(T_1 - T_0)$ и $(T_2 - T_0)$.

Имея эти данные, можно определить термические коэффициенты по соответствующим расчетным формулам. Эти расчетные формулы выводятся из решения следующей задачи теплопроводности [3]: ограниченный стержень длиной R (исследуемый материал) одним концом соприкасается с полуграниченным стержнем (парафин), второй конец ограниченного стержня нагревается постоянным лучистым потоком ($q = const$). Теплоотдача с боковой поверхности стержней отсутствует. Из постановки задачи следует: 1) температура в удаленной точке T_0 не должна изменяться в течение опыта (моделирование полуграниченного стержня); 2) теплоотдача с открытого конца стержня по сравнению с поглощаемым лучистым потоком может быть принята ничтожно малой. В частности, λ_{ϕ} вычислялся по формуле

$$\lambda_{\phi} = \lambda_{\phi} \left(\frac{1-h}{1+h} \right) \sqrt{\frac{a}{a_0}}, \quad (8)$$

где индекс “э” относится к эталону (парафину); a и a_0 – коэффициент температуропроводности в английской и американской литературе они называются коэффициентами диффузии тепла (thermal diffusivity), а немецкой литературе – коэффициентами температуропроводности (temperaturleitzaal); h – вспомогательная величина, определяется по формуле

$$h = \frac{\operatorname{ierfc} \frac{1}{2\sqrt{Fo}} - 0,5642 \frac{N_1}{N_2}}{\operatorname{ierfc} \frac{1}{2\sqrt{Fo}} - \frac{N_1}{N_2} \operatorname{ierfc} \frac{1}{\sqrt{Fo}}}, \quad (9)$$

где N_1/N_2 – отношение показаний гальванометра для термопар 1 и 2 в промежутке времени τ_1 ; Fo – критерий Фурье для данного промежутка времени τ_1 и

$$\operatorname{ierfc} x = \int_x^{\infty} \operatorname{erfc} \xi d\xi = \frac{1}{\pi} e^{-x^2} - x \operatorname{erfc} x. \quad (10)$$

Полученные термические коэффициенты образца относились к средней температуре тела T_m и к среднему градиенту ЭП. Обычно на все замеры уходила 10 – 15 минут, включая регистрацию показаний аналитических весов в различное время и распределение температуры в слое материала в конце опыта. Так как распределение температуры близко к линейному, то достаточно отметить только перепад температур $\Delta T = T_2 - T_1$.

Следует отметить, что измерение температуры в материале проводилось термопарами с соблюдением рекомендаций, приведенных в [9]: термопары были укороченными, малого диаметра, во время наложения ЭП отключались от гальванометра, измерение температуры материала проводилось при отключенном ЭП.

В качестве объекта исследования использовался кварцевый песок ($\rho = 1670 \text{ кг/м}^3$) с эффективным размером почти сферических зерен $R \approx 0,25 \text{ мм}$. Для удаления возможных органических примесей песок прокаливался в электрической тигельной печи при 773 К в течении трех часов. Затем песок промывался дистиллированной водой. Перед опытами он сушился в сушильном шкафу при 393 К на протяжении 10 часов до постоянного веса. Определение адсорбционно связанной влаги в образце осуществлялось на сорбционных вакуумных весах [8]. Величины влагосодержаний макрокапиллярной (межзерновой) влаги стыкового, канатного и капиллярного состояний определялись по методу термограмм сушки [2]. Механическим встряхиванием достигалось максимальное уплотнение и можно считать, что укладка частиц была гексагональная. Поровое пространство приобретает очень сложное очертание. При этом каждая частица соприкасается с двенадцатью соседними частицами. Пористость такой системы составляет 25,95%.

Элементарные поры имеют двоякую форму: тетраэдрическую и ромбоэдрическую; число последних в два раза превышает число первых. Радиус наиболее узких проходов равен $0,155 R$. Радиусы шаров, вписанных в тетраэдрическую и ромбоэдрическую поры, то есть поперечники последних в наиболее широкой части, равны: для поры тетраэдрической – $0,288 R$, для поры ромбо-

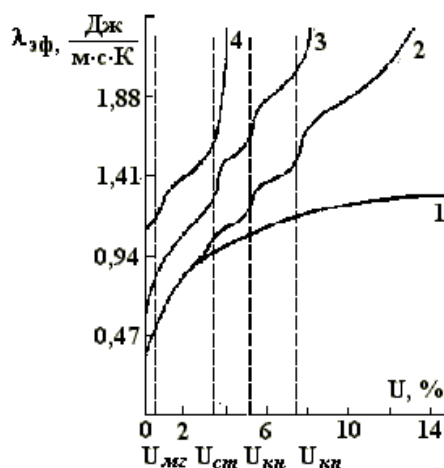
эдрической – 0,414 R. Доля объема, который приходится на поры тетраэдрические, равна 7,37%, а на поры ромбоэдрические – 18,58%.

Такая дисперсная система представляет собой тело, пронизанное капиллярными трубками с кривой осью, которая совпадает с ходом поверхности сферических частиц. Капилляры представляются в сечении треугольными; площадь их поперечного сечения испытывает правильные чередующиеся изменения от некоторого максимума до минимума.

Согласно [10], слой такого песка можно считать грубопористой системой с однородным составом макрокапилляров. Такая пористая система является наиболее простой моделью реальных капиллярно-пористых тел, используя которую можно производить расчеты термовлажностных коэффициентов и сравнивать их с экспериментальными.

Погрешность определения в НЭП с градиентами напряженности $0 \leq \nabla E \leq 5 \cdot 10^9$ В/м² составляла 3%. В наихудшем случае (в перед пробойной области значений E) погрешность экспериментов не превышала 15% для доверительной вероятности 0,95 при коэффициенте Стьюдента 4,3, что полностью соответствует практике теплофизических измерений.

Из рисунка видно, что коэффициент $\lambda_{эф}$ увеличивается с ростом влагосодержания кварцевого песка. Пунктирными линиями отмечено различное состояние влаги в макрокапиллярах: МГ – максимальное гигроскопическое, СТ – стыковое, КН – канатное и КП – капиллярное. Кривая 1 зависимости $\lambda_{эф}(U)$ аналогична кривым без поля для кварцевого песка разных фракций [2, 3]. При малых влагосодержаниях, то есть в области адсорбционно связанной влаги, коэффициент $\lambda_{эф}$ увеличивается достаточно медленно, что свидетельствует о незначительной интенсификации теплопереноса за счет молекулярной теплопроводности пленки адсорбированной влаги и паровой фазы над ней. Это связано с тем, что подвижность адсорбированных молекул мала вследствие большой энергии связи их с адсорбционными центрами песка, а концентрация молекул водяной пары незначительная. В связи с малостью толщины полимолекулярной пленки (10^{-9} м) интенсивность термокапиллярного потока в ней также незначительна. При отсутствии в частицах песка микрокапилляров капиллярная конденсация водяного пара в нем не осуществляется и поэтому влагосодержание полимолекулярно связанной влаги составляет $U_{мг}$. Концентрация водяного пара при $U > U_{мг}$ в межзеренном пространстве уже будет значительной, ибо его давление практически будет равно давлению насыщенного пара над свободной поверхностью воды при данной температуре. Понятно, что макропоры межзеренного пространства будут заполнены паро-воздушной смесью, давление которой будет равно атмосферному. Концентрация молекул газов воздуха уже значительно превышает концентрацию молекул воды. Это приводит к дальнейшему возрастанию теплопереноса за счет молекулярной теплопроводности парогазовой среды и молярной термодиффузии газовой смеси против градиента температуры, а водяного пара в направлении градиента температуры. Это вызывает циркуляцию парогазовой фазы в закрытой системе макропор. Последнее стимулирует значительный отток теплоты от нагретой поверхности.



Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{эф}$ от влагосодержания U кварцевого песка при средней температуре 305 K и градиентах электрического поля ∇E , В/см²; 1 – 0; 2 – $1,3 \cdot 10^5$; 3 – $8 \cdot 10^7$; 4 – $5 \cdot 10^9$.

Таким образом, в области $U_{мг} < U < U_{ст}$, коэффициент $\lambda_{эф}$ резко увеличивается (почти в два раза), что свидетельствует о значительной интенсификации теплопереноса за счет теплопроводности парогазовой смеси, термодиффузии и молярных потоков при циркуляции парогазовой смеси по

системе закрытых макропор. С дальнейшим увеличением влагосодержания возникают и утолщаются вокруг точек контакта частиц скопления заземленной жидкости, которые имеют вид двояковогнутой линзы (жидкостная манжета или стыковая жидкость). Их тепловое сопротивление меньше, чем у песка и они являются дополнительными тепловыми мостиками между соседними частицами и вместе с тем увеличивают площадь теплового контакта между ними. Но объем парогазовой смеси в порах уменьшается. К тому же подвижность молекул в разобщенных жидкостных манжетах меньшая, чем в парогазовой среде, поэтому интенсивность роста $\lambda_{\text{эф}}$ замедляется. С переходом от стыкового в канатное состояние, когда пленки влаги значительно утолщаются и непрерывно покрывают все частицы, происходит дальнейшее увеличение $\lambda_{\text{эф}}$, поскольку осуществляется термокапиллярный перенос воды в пленках вдоль всей внутренней поверхности образца. Одновременно происходит дальнейшее падение темпа роста величины $\lambda_{\text{эф}}$, так как продолжает уменьшаться объем парогазовой фазы (состояние заземленной паровоздушной смеси). С переходом в область капиллярного состояния (отдельные разобщенные пузырьками столбики жидкости) $\lambda_{\text{эф}}$ растет вследствие молярного термоградиентного движения жидкости в смачивающих пленках в направлении потока тепла. Содействует переносу тепла и проталкивание нагретых столбиков жидкости к холодному концу образца при расширении пузырьков с ростом их температуры. Но поскольку объем заземленного между столбиками жидкости воздуха резко уменьшается, то темп роста $\lambda_{\text{эф}}$ также существенно уменьшается, а величина $\lambda_{\text{эф}}$ при слиянии столбиков приближается в области $U > 14\%$, увеличивается более чем в 2 раза по сравнению с теплопроводностью свободного объема воды. Следовательно, проявляются и другие механизмы теплопроводности. В частности, в макропорах находится не дистиллированная вода, а электролит вследствие привнесения из окружающей среды ионов, а главное, растворения поверхностного слоя кварца [11]. Поэтому возникает дополнительный перенос тепла в растворе (термодиффузия растворенных веществ в классическом понимании Максвелла-Чепмана). Эта относительная термодиффузия вызвана взаимодействием растворенных частиц с молекулами растворителя. Исходя из феноменологических представлений Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц [12] получили выражение для плотности потока тепла

$$q = \left[k_T \left(\frac{\partial \mu}{\partial c} \right)_{p,T} - T \left(\frac{\partial \mu}{\partial T} \right)_{p,c} + \mu \right] i - \chi \nabla T, \quad (11)$$

где

$$i = -\rho D \left(\nabla c + \frac{k_T}{T} \nabla T \right) \quad (13)$$

диффузионный поток растворенного вещества. В закрытых капиллярах при наличии температурного градиента может иметь место циркуляция жидкости по той же схеме, как и в случае теплового скольжения газа. Вблизи стенок жидкость движется в сторону горячего конца, а в центре – в обратную сторону, отводя нагретую жидкость к холодному концу [2, 3].

Наложение НЭП со сравнительно незначительным градиентом $\nabla E = 1,3 \cdot 10^5 \text{ В/м}^2$ (кривая 2) заметным образом начинает проявляться лишь при подходе к влагосодержанию стыкового состояния и в момент образования достаточно толстых водных манжет наблюдается определенный перелом в ходе кривой зависимости $\lambda_{\text{эф}}(U)$. Это объясняется уменьшением термического сопротивления влажной дисперсной системы за счет перемещения влаги в пределах жидкостной манжеты под действием пондеромоторных сил в сторону возрастающих значений E^2 ЭП, то есть по потоку тепла. Содействует некоторому увеличению теплопотока и электродиффузия молекул водяной пары в направлении ∇E . С переходом в область канатного состояния влаги подобное диэлектропленочное движение возникает по всей поверхности макропор и поэтому возникает очередной, более четкий скачок величины $\lambda_{\text{эф}}$. Следующий скачок величины $\lambda_{\text{эф}}$ осуществляется при переходе в капиллярное состояние влаги, когда в пондеромоторное движение в направлении противоположном ∇T приходят объемные, разобщенные столбики жидкости, перенося с собой теплосодержание системы.

Увеличение U свыше $U_{\text{кп}}$ приводит к постепенному слиянию разобщенных столбиков жидкости, а следовательно, к замыканию водными каналами электродов. В результате возникает электроосмотический перенос влаги. При дальнейшем увеличении U все большее количество водных каналов подключается к электродам и все большее количество тепла переносится при электроосмотическом движении влаги. Поэтому $\lambda_{\text{эф}}$ почти линейно возрастает с увеличением $U > U_{\text{кп}}$. Выделяющееся джоулево тепло в процессе электроосмоса, в связи с малостью величины тока ($0 < I < 10 \text{ мкА}$), заметным образом не влияло на разность температур в образце, что проверялось специальными опытами. При достижении $I = 10 \text{ мкА}$ автоматическая защита маломощного источника высокого

напряжения “Разряд-1” отключала наложенное ЭП. Эта процедура отмечена окончанием кривых $\lambda_{\rightarrow\phi}(U)$. Таким образом, сингулярные точки на кривой $\lambda_{\rightarrow\phi}(U)$ при наложении НЭП достаточно надежно отмечают влагосодержания, соответствующие различным состояниям влаги в макропорах грубодисперсного тела.

Дальнейшее увеличение напряжения на образце при $U \geq 0\%$ приводит к возрастанию ∇E , а следовательно к интенсификации электровлагопереноса, переходящего в паровой фазе в электроконвекцию, и как видно из рисунка кривые $\lambda_{\rightarrow\phi}(U)$ размещаются все выше. Величине $\nabla E = 5 \cdot 10^9$ В/м² отвечает перед пробойное напряжение, когда даже в сухом образце в макропорах возникают частичные разряды, существенно интенсифицирующие теплоперенос в пористом теле. Это обусловлено возникновением световых и ударных микроволн, ионизирующих и турбулизирующих паровоздушную смесь в макропорах. В результате парогазовая фаза приходит в интенсивное молярное движение и легче проталкивается через макропоры в направлении потока тепла. Наличие в макропорах свободных зарядов вызывает действующие на единицу заряженного объема парогазовой смеси кулоновские силы, на несколько порядков превышающие пондеромоторные, оказывающие силовое воздействие на единичный объем незаряженного диэлектрика.

Таким образом, приведенные теоретический анализ и экспериментальные данные несомненно свидетельствуют о существенной интенсификации теплопереноса во влажном макропористом теле при наложении внешних электрических полей. Практическим подтверждением этого является успешная работа электрогидродинамических тепловых труб [1], а также интенсификация процесса сушки при воздействии полей [2, 7, 9].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Болога М.К., Смирнов Г.Ф., Дидковский А.Б., Климов С.М.* Теплообмен при кипении и конденсации в электрическом поле. Кишинев, 1987.
2. *Лыков А.В.* Теория сушки. М., 1968.
3. *Лыков А.В.* Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М., 1954.
4. *Чудновский А.Ф.* Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М., 1962.
5. *Кобранова В.Н.* Физические свойства горных пород. М., 1962.
6. *Филиппов П.И., Тимофеев А.М.* Методы определения теплофизических свойств твердых тел. Новосибирск, 1977.
7. *Панченко М.С.* Повышение эффективности процесса сушки при использовании неоднородных электрических и магнитных полей // *Электронная обработка материалов.* 1980. № 3. С. 42–47.
8. *Панченко І.М.* Вплив електричних полів на вологообмінні процеси в металонаповнених гнучколанцюгових полімерах: Дис. канд. фіз.-мат. наук. Рівне, 1998.
9. *Мустьяца В.Т.* Тепло- и массообмен во влажных материалах в электрических полях высокой частоты: Автореф. дис. доктора техн. наук. Кишинев, 1985.
10. *Лыков А.В.* Тепломассообмен (Справочник). М., 1971.
11. *Соболев В.Д., Сергеева И.П., Чураев Н.В.* Экспериментальные исследования электрокинетических явлений в тонких капиллярах: Тезисы докладов на VII конференции по поверхностным силам. М., 1980.
12. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. М., 1986.

Поступила 23.10.2000

Summary

On an example of quartz sand – model macroporous solid by experimental way is shown, that constant inhomogeneous electrical fields essentially intensity the process of transposition of heat in a broad interval of moisturecontents, including hygroscopic and humid condition. Experimental dependence of effective thermal conductivity coefficient from moisturecontents $\lambda_{\rightarrow\phi}(U)$ of sand obtained with the help of upgraded classical installation created by Babiev with average temperature on a sample 305 K is determined by a porous structure of a sample, form of connection and condition of an absorbed moisture. The different magnitudes $\lambda_{\rightarrow\phi}$ for characteristic moisturecontents of sand are explained proceeding from possible mechanisms of movement of an absorbed moisture in conditions of a joint operation of an absorbed moisture in conditions of a joint operation of gradients moisture, temperature and electrical fields.