

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ВЛАГО- И ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ СУШКЕ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ТЕЛ В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

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

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

По сравнению с другими технологическими применениями электричества электронно-ионная технология (ЭИТ) обладает рядом преимуществ, связанных с непосредственным воздействием электрического поля (ЭП) на сырье без промежуточных трансформаций энергии, с принципиальной возможностью воздействия на любые виды материалов [1]. На сушку влажных дисперсных материалов, как широко распространенного технологического процесса, расходуется около 25% вырабатываемой в мире тепловой энергии. Установлено [2], что воздействие доразрядных ЭП заметно интенсифицирует сушку капиллярно-пористых тел (КПТ). При этом воздействие неоднородных электрических полей (НЭП) на процессы тепло- и массопереноса отличается высокой эффективностью и простотой регулирования [2, 3].

В доразрядном НЭП во влажное тело вводится незначительное количество энергии и поэтому его интенсифицирующее воздействие слабое. Следовательно, необходимо вводить большие потоки энергии в сушимые КПТ с помощью разрядных НЭП, для создания которых требуется по сравнению с дорогостоящей СВЧ-сушкой очень простое аппаратное оформление – источник высокого напряжения и электроды, как правило, острое – плоскость, между которыми размещается сушимый материал. На него при атмосферном давлении воздействует либо низкотемпературная плазма коронного разряда (КР), либо высокотемпературная плазма искрового разряда (ИР).

Классическим методом исследования процесса сушки в связи с различием состояний и форм связи влаги является метод термограмм сушки (ТС) М.Ф. Казанского [4]. С помощью ТС определяют количество влаги физико-механической и физико-химической формы связи. К первой относятся три вида капиллярной влаги, два из которых представляют воду, различную по особым состояниям (капиллярная и стыковая) в грубых порах (макрокапиллярах с  $r > 10^{-7}$  м) тела, а третий – капиллярную влагу микропор (микрокапилляры с  $r < 10^{-7}$  м). Влага физико-химической связи может состоять из осмотической воды и двух видов адсорбированной влаги – полимолекулярных и мономолекулярных слоев.

Цель данной работы – исследование термограмм и кривых сушки силикагеля КСК–2 в условиях воздействия на его поверхность и пористый объем как доразрядных, так и разрядных НЭП.

Предположим, что во влажном КПТ существует градиент числового значения напряженности  $E$  ЭП ( $\nabla E$ ). Тогда при наличии градиентов полей влагосодержания  $W$  ( $\nabla W$ ), температуры  $T$  ( $\nabla T$ ) и  $\nabla E$  поток влаги внутри КПТ, направленный к поверхности испарения, определится уравнением [4]:

$$J_m = -a_m \rho_0 \nabla W - a_m^T \rho_0 \delta \nabla T + a_m^s \rho_0 \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) E \nabla A,$$

где  $a_m$ ,  $a_m^T$ ,  $a_m^s$  – коэффициенты диффузии, термодиффузии и электродиффузии влаги; соответственно  $\rho_0$  – плотность сухого материала;  $\delta$  – термоградиентный коэффициент;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость влажного КПТ. При использовании метода ТС принимается, что образец КПТ очень тонкий, а поэтому  $\nabla W$  и  $\nabla T$  практически равны нулю. Следовательно, в этих условиях внутренний массоперенос определяется последним членом, то есть НЭП. Естественно, чем больше  $E$  и  $\nabla E$ , тем больше  $j_m$ . Перенос влаги от поверхности испарения во внеш-

ную среду осуществляется за счет разности давлений пара в образце и среде. При этом давление пара в порах образца определяет энергию связи влаги со скелетом твердого тела.

Силикагель КСК-2 – модельное КПП, типичный представитель эталонного ряда однородно-крупнопористых промышленных сорбентов состава  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Его сорбционные свойства по воде представлены в [5]. Образец с диаметром зерен  $0,5 \cdot 10^{-3}$  м, слоем толщиной  $2,5 \cdot 10^{-3}$  м засыпался в квадратную фторопластовую кювету со стороной  $4 \cdot 10^{-2}$  м на нижний электрод, представляющий собой заземленную тонкую металлическую пластинку. Под ней размещались внутренний электронагреватель, который компенсировал разность температур  $\Delta T(\tau)$  между окружающей средой  $T_c$  и испаряющейся жидкостью  $T_{ж}(\tau)$  в случае определения удельной теплоты испарения влаги (энергограмм сушки) [6]. Под пластинкой также находилась группа спаев дифференциальной термопары, а другая находилась в воздухе над влажным образцом. Сущность метода ТС состоит в одновременной записи на диаграммной ленте электронного самописца и исследовании: температурной кривой  $\Delta T(\tau)$ , которая дает значение разности между постоянной температурой окружающего воздуха  $T_c = \text{const}$ , и температурой влажного тела, подвергаемого сушке  $T_{ж}(\tau)$ ; кривой убыли массы  $m(\tau)$ , отражающей уменьшение влагосодержания  $W$  сушеного образца с течением времени  $\tau$ . Критические точки (точки перегиба) термограммы  $\Delta T(\tau)$  проектируют на кривую сушки  $W(\tau)$ . Анализируя затем совместно полученные графические зависимости, получают границы и количество различных форм связи влаги.

Таким образом, метод ТС основан на закономерностях хода кинетических кривых  $\Delta T(\tau)$  и  $W(\tau)$  сушки: используется факт существенной зависимости последовательности во времени испарения влаги от интенсивности ее связи с твердой фазой КПП.

Схема и конструкция использованной установки, методика работы на ней и подготовка образцов к опыту в основном такие же, как и в [6], но при отключенном блоке автоматического регулирования тока в нагревателе калориметрической кюветы. Для создания НЭП в кювете использовалась следующая система электродов. В качестве одного из них была пластинка. Роль второго электрода исполняли пять тонких металлических игл, соединенных между собой, которые располагались над образцом таким образом, что острия их могли находиться на расстоянии  $0,3 - 2 \cdot 10^{-2}$  м от поверхности обводненного образца. Верхняя группа спаев дифференциальной термопары находилась достаточно далеко, чтобы исключить влияние на нее НЭП. В качестве измерительного устройства термоЭДС при индикации влияния ЭП использовался прибор ПП-63. Такое число игл выбиралось, исходя из известных экспериментальных данных, свидетельствующих о том, что при большем количестве их ЭП становится близким к однородному. Переменное промышленной частоты ЭП реализовывалось за счет высоковольтного трансформатора АИИ-70. Постоянная разность потенциалов до 25 кВ создавалась с использованием источника «Разряд-1». Это маломощные, с плавно регулируемым напряжением источники, снабженные защитой от возникновения дугового разряда с целью избежать плавления или подгорания твердой фазы КПП.

За сутки перед опытом силикагель засыпался в кювету и увлажнялся с избытком дистиллированной водой до полной влагоемкости (набухания), так что над слоем образца образовывалась пленка воды толщиной  $2 \cdot 10^{-3}$  м. В зависимости от расстояния и разности потенциалов  $U$  между электродами изменялись и значения тока  $i$  КР и ИР, а следовательно, и вводимая средняя мощность  $P_s = iU/S$ , где  $S$  – площадь поверхности воды, покрывающей образец.

На рисунке представлены термограммы  $\Delta T(\tau)$  и кривые сушки  $W(\tau)$ , полученные без полей и в условиях воздействия доразрядного НЭП, а также разрядных НЭП в виде КР и ИР. Доразрядное ЭП понимается в том смысле, что не происходит тот или иной самостоятельный разряд (КР или ИР). При несамостоятельном разряде в НЭП протекают токи ( $i = 0 - 1 \cdot 10^{-7}$  А).

То, что мы называем влагой, естественно, является электролитом вследствие того, что слой дистиллированной воды очень быстро становится проводящим (насыщается ионами за счет абсорбции ионов воздуха, растворения твердого скелета образца и металла пластинки, электролиза воды, электрохимических процессов и других неконтролируемых процессов). Изменение полярности постоянного доразрядного НЭП практически не влияет на термограммы и кривые сушки. В постоянном и переменном доразрядных НЭП с максимально возможным градиентом напряжения  $\nabla E \sim 10^{12}$  В/м<sup>2</sup> возле острия в начале процесса, когда еще, собственно, не происходит сушка силикагеля, а идет процесс испарения избытка свободной воды, расхождение кривых  $\Delta T(\tau)$  и  $W(\tau)$  в полях и без них незначительно, то есть влияние таких полей мало. Это связано с тем, что на поверхности воды градиент незначительно отличается от нуля, поскольку избыточный слой воды для высоких напряженностей является проводящим (электропроводность  $\sigma \sim E^2$ ), и линии напряженности входят в него почти перпендикулярно. Но в пределах пограничного слоя, который является основным сопротивлением внеш-

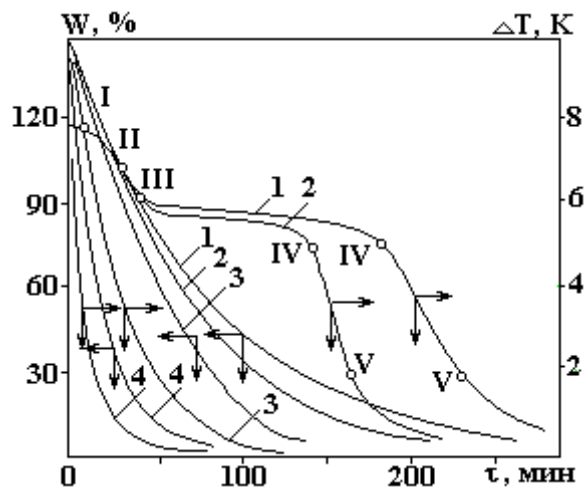
нему теплообмену, ЭП можно считать неоднородным. Если принять в пограничном слое линейную зависимость диэлектрической проницаемости  $\epsilon_n$  водяных паров от плотности, то согласно известному соотношению электрогидродинамики объемная сила

$$f = 0,5\epsilon_0(\epsilon_n - 1) \nabla E^2, \quad (1)$$

вызывающая электроконвекцию, будет отлична от нуля. При визуальном наблюдении обнаружено начало неустойчивости поверхности жидкости. Видимо, в этом случае происходят деформации поверхности за счет эффекта втягивания жидкости в межэлектродное пространство к каждой игле при воздействии силы

$$f_1 = 0,5\epsilon_0(\epsilon_{ж} - \epsilon_n)E_n E_{ж}, \quad (2)$$

где  $\epsilon_{ж}$  – диэлектрическая проницаемость жидкости;  $E_n$  – напряженность ЭП в паровой фазе в непосредственной близости к поверхности жидкости в пограничном слое;  $E_{ж}$  – напряженность ЭП в жидкости возле поверхности раздела жидкой и паровой фаз. Под каждым игольчатым электродом на поверхности жидкости будут концентрироваться ионы противоположного знака, что обуславливает кулоновское взаимодействие жидкости в данном месте с тем или иным игольчатым электродом. Этому препятствуют гравитационные силы и силы поверхностного натяжения. Здесь, видимо, начинает развиваться неустойчивость Тонкса–Френкеля, которая зависит от отношения величин электрических сил к гравитационным и поверхностным силам на свободной поверхности. Это приводит к возникновению спектра капиллярных волн на поверхности тонкого слоя идеально проводящей несжимаемой жидкости.



Кривые сушки и термограммы сушки силикагеля КСК-2 при температуре 303 K (кривые 1– 4).  
1 – без поля; 2 – в доразрядном НЭП; 3 – в ЭП КР; 4 – в ЭП ИР

Осуществляется также воздействие пондеромоторной силы на каждую молекулу воды в паровой фазе

$$f_e = p_e \nabla E \cos \alpha, \quad (3)$$

где  $p_e$  – дипольный момент молекулы воды;  $\alpha$  – угол между осью диполя и вектором  $E$ . Под действием силы (3) молекулы пара за пределами пограничного слоя приобретают дополнительную скорость  $V$  [2] в направлении возрастающих значений  $\nabla E$

$$V = D_v f_e / \kappa T, \quad (4)$$

где  $D_v$  – коэффициент диффузии молекул водяного пара;  $\kappa$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура паровоздушной среды. К диффузионному потоку  $j_v$  молекул пара от поверхности жидкости добавится электроконвективный поток

$$j_{e1} = Vc, \quad (5)$$

где  $c$  – концентрация молекул пара. Тогда

$$j_1 = j_v + j_{e1} = -D_v \frac{dc}{dx} \left[ 1 + \frac{p_e c \Delta E}{\kappa T (-dc/dx)} \right], \quad (6)$$

где  $x$  – координата точки паровоздушной среды. Понятно, что влияние поля должно наиболее заметно проявляться при малых градиентах давления пара. Но при испарении воды со свободной поверхности  $j_v \gg j_{e1}$  и, естественно, возле пограничного слоя, где к тому же мал и  $\nabla E$ , не происходит суще-

ственного увеличения потока пара. В результате указанных факторов воздействия градиентного доразрядного ЭП, вводимая мощность которого была крайне незначительная и составляла  $0,1 \text{ Вт/м}^2$ , не происходила заметная интенсификация испарения жидкости, и поэтому начальный горизонтальный участок термограммы не смещался. Кривая сушки в пределах испарения свободной жидкости оставалась такой же, как и без поля. Изменения  $\Delta T$  также не происходило. Таким образом, НЭП несамостоятельного разряда неспособно заметным образом интенсифицировать испарение свободной воды. Это явление было обнаружено и в [7].

По окончании испарения покрывающей пленки воды открываются макропоры межзернового пространства образца (точки перегиба I ТС), и скорость испарения лимитируется массопереносом внутри макропор. Величина  $\Delta T$  уменьшается, поскольку снижается интенсивность испарения. Это обусловлено уменьшением площади испарения, к тому же мениски воды капиллярного состояния опускаются внутрь образца, что удлиняет путь диффузии молекулам водяного пара. При этом градиент давления пара возле поверхности образца заметно уменьшается, и создаются условия для интенсификации испарения за счет доразрядных НЭП, поскольку поток  $j_v$  уменьшается, а  $j_{e1}$  увеличивается вследствие того, что уже отсутствует экранирующая проводящая пленка избыточной влаги, и силовые линии поля входят в зерна силикагеля не под прямыми углами. Следовательно, как в зернах, так и в макрокапиллярах  $\nabla E \neq 0$ . При этом на каждый единичный объем поляризованного столбика капиллярной жидкости будет действовать сила

$$f_3 = 0,5\varepsilon_0(\varepsilon_{ж} - 1) \nabla E^2. \quad (7)$$

Соприкасающиеся с нижним электродом столбика проводящей жидкости в макрокапиллярах подвергаются контактной зарядке, в результате чего приобретают избыточный заряд знака этого электрода. Тогда пондеромоторная сила, действующая на каждую единицу объема воды, содержащей величину свободных зарядов  $\rho_e$ , будет равна

$$f_4 = \rho_e E. \quad (8)$$

Если столбик жидкости находится между электродами, то происходит его биполярная зарядка во внешнем ЭП. На поверхности менисков индуцируются свободные заряды величиной  $q_m$ , противоположные по знаку ближайшему электроду. Каждый такой столбик длиной  $l$  превращается в макродиполь с дипольным моментом  $p_c = q_m l$ . Между ним и ближайшим игольчатым электродом действует сила притяжения  $F = p_c \nabla E$ , а на каждую единицу объема:

$$f_5 = q_m \nabla E \cos^2 \theta / \pi r^2, \quad (9)$$

где  $r$  – радиус капилляра;  $\theta$  – краевой угол смачивания жидкостью стенок капилляра.

В результате действия пондеромоторных сил (7) – (9) столбика жидкости подтягиваются к устьям капилляров (поверхности КПП), увеличивая скорость внутреннего переноса влаги в зону активного испарения. В отдельном цилиндрическом макрокапилляре скорость движения столбика воды под воздействием НЭП может быть определена в виде

$$v_{\dot{e}} = \frac{r^2 \rho}{8\eta} \left[ \frac{0,5\varepsilon_0(\varepsilon_{ж} - 1) \nabla E^2}{\rho} + \frac{\rho_a}{\rho} E + \frac{q_i \nabla E \cos^2 \theta}{\rho \pi r^2} - g \sin \beta \right], \quad (10)$$

где  $\rho$  – плотность воды;  $\eta$  – вязкость;  $\rho_e$  – объемная плотность свободных зарядов;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\beta$  – угол наклона макрокапилляра к горизонту.

В [8] установлено, что в доразрядном НЭП с  $10^8 < \nabla E < 10^{12} \text{ В/м}^2$  при испарении воды из широких капилляров с  $d > 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , в которых отсутствуют капиллярные эффекты, при крайне незначительном заглублении мениска ( $10^{-4} \text{ м}$ ), скорость испарения снижается на 10 – 20% при низком  $\nabla E$ . При высоком  $\nabla E$  влияние поля не обнаружено. Это объясняется двояким воздействием градиента поля. С одной стороны, градиент поля интенсифицирует отвод молекул поля из пограничного слоя. С другой – ориентирующее действие градиента на молекулы поверхностного слоя жидкости замедляет испарение. В условиях наших экспериментов диаметры макрокапилляров обеспечивали капиллярные явления. При этом скорость испарения в НЭП несколько повышалась, так как кривая сушки, хотя и незначительно, опускалась вниз, а ТС, в пределах влагосодержаний капиллярного состояния воды, шла несколько круче. Увеличение скорости испарения воды из кварцевого капилляра диаметром  $3 \cdot 10^{-5} \text{ м}$  в условиях наложения доразрядных НЭП и неоднородных магнитных полей, наблюдалось в

[9]. В этом же капилляре отмечено движение отдельных столбиков воды длиной  $\sim 13 \cdot 10^{-6}$  м, под воздействием указанных полей при относительной влажности паровоздушной среды  $\varphi \cong 100\%$  и температуре  $T = 293$  К. В ЭП скорость движения составляла  $20 \cdot 10^{-6}$  м/с, а в магнитном поле –  $12 \cdot 10^{-6}$  м/с. Повышение уровня воды в кварцевых макрокапиллярах диаметрами как большими, так и меньшими  $2 \cdot 10^{-3}$  м, в доразрядных НЭП наблюдали в [10].

Таким образом, результаты экспериментов подтверждают теоретические представления о механизме влияния НЭП на процесс переноса влаги в одиночных капиллярах. В отдельных вертикальных макрокапиллярах, благодаря противодействию гравитационного поля, изменение скоростей впитывания или испарения небольшое,  $\sim 3 - 5\%$ . В КПП за счет неоднородной поляризации весьма большой удельной поверхности их, которая создает свое внутреннее НЭП, и эффекта перколяционной влагонепроводности, изменение скоростей этих процессов может быть весьма ощутимым и достигать  $15 - 20\%$ .

По окончании испарения воды капиллярного состояния продолжается ее испарение из макропленок стыковой влаги (точки II ТС), которая непрерывно покрывает зерна силикагеля. Это свободная влага, то есть не связанная со стенками капилляров адсорбционными силами. Но происходит дальнейшее падение упругости пара на поверхности образца, поскольку диффузионный транспорт молекул воды, испаряющихся из нижних частей пленок, требует большего времени. Оно экспоненциально возрастает с толщиной КПП. Поэтому происходит дальнейшее уменьшение скорости сушки. Кривые  $W(\tau)$  и  $\Delta T(\tau)$  постепенно опускаются, что свидетельствует о замедлении процесса сушки и повышении температуры образца. Наложение НЭП ускоряет диффузионный процесс в пространстве макропор согласно (6). Более радикальный путь уменьшения диффузионного пути состоит в подтягивании пленки к поверхности тела с помощью НЭП. Согласно [11] скорость потока диэлектрической жидкости в пленке

$$v_{пл}^э = \frac{h^3 \varepsilon_0 (\varepsilon_{ж} - 1) \nabla E^2}{3\pi\eta r}, \quad (11)$$

где  $h$  – толщина пленки;  $\eta$  – вязкость жидкости. Однако на пленку также действует и гравитационное поле, под действием которого она стекает вниз. Для этого случая Гиббс [12] вывел уравнение для средней скорости течения жидкости

$$v_{пл}^г = \frac{\rho g h^2}{8\eta} \sin \beta. \quad (12)$$

С учетом того, что после испарения влаги капиллярного состояния в пленке концентрируются свободные заряды, а также уравнения (8), (11) и (12), можно определить результирующую скорость движения жидкости в пленке под действием НЭП и гравитационного поля

$$v_{пл}^{эг} = \frac{2h^3 \varepsilon_0 (\varepsilon_{ж} - 1) \nabla E}{3\pi\eta r} E + \frac{\rho_{\varepsilon} r^2}{8\eta} E - \frac{\rho g h^2}{8\eta} \sin \beta, \quad (13)$$

Как видно из этого уравнения, скорость потока в толстой пленке зависит не только от градиента ЭП, но и от его напряженности  $E$ .

В результате действия НЭП кривые сушки и ТС несколько опускаются по сравнению с теми же кривыми без поля, что свидетельствует о некотором ускорении процесса сушки и уменьшении температуры образца.

С дальнейшим уменьшением  $W$  образца открываются микропоры зерен, и испарение влаги идет с поверхности углубляющихся менисков (точки III – IV ТС). Поскольку давление пара в порах резко падает, то градиент концентрации молекул пара в уравнении (6) значительно уменьшается, что приводит к относительному росту влияния внешнего НЭП на диффузионный процесс. Согласно (10), столбики микрокапиллярной влаги также будут подтягиваться к поверхности зерен. К тому же в нем исключается гравитационный член, поскольку форма менисков всецело определяется действием поверхностных сил. Казалось бы, что должно резко возрасти влияние НЭП. Но это не так, поскольку радиусы микрокапилляров на несколько порядков меньше в сравнении с макрокапиллярами. Поэтому картина расположения кривых  $W(\tau)$  и  $\Delta T(\tau)$  в поле заметно изменяется. Обе они располагаются еще ниже под кривыми без поля.

За отступающими менисками образуются тонкие полимолекулярные пленки. С переходом в область полимолекулярной влаги (точки IV – V термограмм) уравнение (13) продолжает работать, за исключением гравитационного члена, поскольку интенсивность гравитационных сил на несколько

порядков меньше адсорбционных. Также следует принять во внимание дополнительный член  $\rho h^2 \nabla \Pi(h) / 3\eta$ , учитывающий поток массы жидкости под влиянием градиента, расклинивающего давления  $\nabla \Pi(h)$ . Следовательно, создаются условия для еще большего действия НЭП на кинетику сушки, но опять-таки, очень малые радиусы микрокапилляров и малые толщины полимолекулярных пленок, существенное падение  $\epsilon_{ж}$  и возрастание  $\eta$  становятся препятствием как для электродиффузионного, так и для пленочного электрогидродинамического переноса. Термограммы без поля и в поле резко устремляются вниз, незначительно расходясь, что свидетельствует об интенсификации прогресса образца. Кривые сушки, наоборот, замедляют свой ход, что указывает на существенное уменьшение внутреннего массопереноса.

Поверхностный поток влаги в НЭП при толщине адсорбционной пленки, соизмеримой с монослоем, можно найти в виде [2]

$$j_s = -\frac{D_s n}{\kappa T} (\nabla U_s(x) - p_e \nabla E), \quad (14)$$

где  $D_s$  – коэффициент поверхностной диффузии адсорбированных молекул;  $n$  – поверхностная концентрация молекул;  $\nabla U_s(x)$  – градиент потенциальной энергии молекул в поле адсорбционных центров;  $x$  – координата данной точки. Причины интенсификации объемного потока в НЭП связаны с воздействием на молекулы пара при их перемещении от одной стенки микрокапилляра к другой (кнудсеновская диффузия). К этому моменту уже отсутствует жидкая фаза капиллярной конденсации и полимолекулярная пленка. Свободный для перемещения молекул водяного пара объем существенно возрастает (растет участок влагопереноса), и, естественно, время воздействия силы (3) на диффундирующие молекулы значительно увеличивается. И все же чрезвычайно медленная скорость испарения мономолекулярной влаги приводит к тому, что образец быстро прогревается ( $\Delta T(\tau) \rightarrow 0$ ), а кривая сушки медленно приближается к конечному влагосодержанию  $W_{\text{кон}}$ , соответствующему данным  $T$  и  $\phi$  воздуха в термостате. Здесь наблюдается более заметный, относительно предыдущих этапов, рост влияния НЭП на кинетические кривые. Если представить результаты опыта в координатах  $\Delta T(W)$ , то никакого сдвига кривой в поле не наблюдается, то есть примененное доразрядное НЭП влияет только на кинетику процесса и совсем не влияет на энергию и формы связи влаги. Ее содержание существенно влияет на теплообмен, который уменьшается с уменьшением  $W$ , так как при этом  $\Delta T \rightarrow 0$ .

Возникновение самостоятельного газового разряда, так называемого “темного КР”, образующегося при токе  $3 - 5 \cdot 10^{-6}$  А, сопровождается немедленным увеличением скорости испарения. При этом возле каждого острия возникает зона ионизации, за пределами которой образуется электрический ветер (ЭВ), достигающий поверхности воды. При этом вводимая мощность составляет  $1 \text{ Вт/м}^2$ . Основным, интенсифицирующим сушку фактором, является ЭВ [7], благодаря которому покрывающий образец слой жидкости приходит в волнообразное движение. Вследствие внутреннего трения образуются турбулентные потоки внутри жидкости, тем самым способствуя увеличению кинетической энергии отдельных молекул. В результате растет число молекул, вылетающих из жидкости, что ускоряет парообразование. Отраженные потоки ЭВ способствуют удалению массы пара от поверхности высушиваемого КПП. Кроме того, молекулы воды, содержащиеся в воздухе, разлагаются в ЭП ионизатора [13], и начальная влажность сушильного агента снижается. Насыщение поверхностного слоя воды, покрывающей образец ионами объемного заряда и молекулами озона, существенно снижает поверхностное натяжение [14]. Это приводит к уменьшению работы выхода молекул в пограничный слой, который, кроме того, разрыхляется электронно-ионной бомбардировкой. В результате уменьшается диффузионное сопротивление пограничного слоя. Часть молекул водяного пара конденсируется на ионах объемного заряда, образуя заряженные микрокапельки. При этом уменьшается концентрация молекул пара в пограничном слое. За счет воздействия ЭВ с поверхности жидкости электрогазодинамическими потоками в пограничный слой и за его пределы выносятся отдельные капельки. Этому способствует и электронно-ионная бомбардировка поверхности жидкости. Заряд отдельной капельки пропорционален ее площади [7, 15] и средней плотности поверхностного заряда. В результате возникают кулоновские силы, способствующие интенсивному рассеиванию, скопившемуся над поверхностью воды пара. С другой стороны, прохождение электрического тока КР способствует уменьшению парциального давления пара в окружающем воздухе [16]. Образование одного иона  $\text{H}_2\text{O}^+$  вследствие электронного удара ведет согласно кластерной теории к диссоциации пяти молекул водяного пара.

Следует отметить очень большие коэффициенты распыления (от 500 до 1000), определяемые как число молекул воды, покидающих раствор в расчете на один попадающий в раствор ион [17], по-

скольким ионам, бомбардирующим поверхность раствора, имеют за счет катодного падения потенциала значения энергии, сравнимые с удельной теплотой испарения воды. Но затраты энергии на неравно-весный процесс переноса заведомо должны быть больше термодинамической теплоты испарения. Столь высокие коэффициенты переноса в [17] объясняются переносом крупных кластеров, сформировавшихся в приповерхностном слое, а состояние в этом слое воды иное, чем в исходной воде. Оно отличается прежде всего разорванной сеткой водородных связей, что уменьшает затраты энергии на перевод воды в газовую фазу. В этой же работе отмечается, что в зону плазмы могут переноситься как растворитель, так и растворенное вещество, что инициирует изменение как состава плазмы, так и окислительно-восстановительные реакции в системе.

В [18] проведено сравнение воздействия на процессы испарения при одинаковых скоростях ЭВ и потоков воздуха из сопла. Оказалось, что плотность потока испаряемой влаги в первом случае выше в два–восемь раз. Из этого следует, что электрогазодинамический поток отличается от газодинамического значительной энергоемкостью, обусловленной столкновением электронов с молекулами воздуха. При этом в зависимости от силы тока и полярности электродов 10 – 25% общей энергии КР, подведенной в пограничный слой, приходится на механический унос водяного пара и капельной влаги. Следовательно, ускоряющие факторы и в первую очередь значительная энергоемкость, строгая направленность, локальный характер действия плазмы КР на поверхность жидкости и пограничный слой делают КР исключительно удобным методом энергоподвода и средством ускорения сушки сильно обводненных КПП за счет интенсификации внешнего тепло- и массообмена.

Из кривых рис. 1 видно, что при сушке с использованием КР общая продолжительность процесса уменьшается почти в 3 раза, а энергетические затраты в среднем на 10%. Наиболее значимая интенсификация процесса наблюдается при испарении свободной жидкости и влаги макрокапилляров. На этих участках скорость испарения увеличивается примерно в 7 раз. Такой же степени интенсификации сушки можно достигнуть при увеличении температуры сушильного агента на несколько десятков градусов. Но это вызывает значительное увеличение расхода теплоты, и вместе с тем жесткий режим гигротермической обработки способствует развитию необратимых структурных изменений коллоидных КПП.

Опыты [2] по определению удельных теплот испарения влаги из силикагеля КСМ–5 в зависимости от  $W$  показывают, что в ЭП КР наблюдается уменьшение тепловых затрат на единицу массы испаряемой влаги не только свободной, но и удерживаемой как капиллярными, так и адсорбционными силами связи соответственно от 9 до 3%. Это приводит к смещению критических точек  $\Pi - V$  ТС относительно оси  $W$ , отмечающих смену форм связи влаги. Последнее позволяет сделать вывод, что с помощью ЭП КР можно управлять не только параметрами внешнего и внутреннего тепло- и массопереноса, но и энергиями и формами связи влаги. Подтверждением служит также резкое сужение петли сорбционного гистерезиса, падение равновесных влагосодержаний КСК–2 и других образцов КПП при снятии изотерм сорбции в КР [2]. В [13] при сушке ионизированным воздухом без подвода тепла к высушиваемой бумаге найдено, что удельный расход электроэнергии составил 0,63 – 1,11 кВт·ч/кг влаги. Последний показатель экономически весьма рентабелен, поскольку он в 3–1,5 раза меньше нынешних затрат при тепловой сушке. Применение ионизированного воздуха как сушильного агента ускоряет сушку бумаги на 44 – 160% в зависимости от степени ионизации воздуха, типа короны, заряда корпуса сушилки и высушиваемого материала. При этом ЭП находилось за пределами пространства испарения и действовало только на сушильный агент. Качество бумаги, высушиваемой таким образом, улучшается, поскольку сушка ведется при комнатной температуре, то есть на несколько десятков градусов меньшей, чем в обычных условиях производства. Аналогичные результаты получены при сушке яблочного пюре в тлеющем разряде [19]. Причем вкусовые качества готового продукта оказались выше полученного при обыкновенной сушке. Применение ионизированного воздуха для созревания сыров позволило не только интенсифицировать процесс, но и повысить их пищевые показатели и улучшить санитарно–гигиенические условия производства [20].

Заметим также, что в несколько большей мере ускоряет процесс сушки при одинаковых остальных параметрах переменный КР промышленной частоты. Он требует минимальных затрат энергии. Причины этого объяснены в работах [7, 8, 18, 21]. Если в первом периоде, когда удаляется избыток свободной воды, а затем влага макрокапилляров из зернистого слоя силикагеля, интенсификация сушки достигает наибольшей величины, то во втором периоде сушки интенсифицирующее действие КР уменьшается по мере уменьшения влагосодержания образца в связи с углублением фронта испарения в микропоры зерен. Степень проникновения ЭВ в микропоры уменьшается пропорционально их эффективному диаметру, и одновременно увеличивается сопротивление внутреннему переносу молекул пара к поверхности зерен. Но зато возрастает в большей мере, чем в дораз-

рядном НЭП, неоднородная поляризация высушенной части твердого скелета КПП. Это эквивалентно внедрению НЭП в микропоры КПП, но с напряженностью в  $\epsilon$  меньшей, чем в паровоздушной среде. Вместе с поляризационными зарядами возникают и свободные. Неравномерное оседание и адсорбция ионов на поверхности зерен и макрокапилляров, а также частично в микропорах силикагеля сопровождается возникновением внутреннего НЭП с градиентом несколько кВ/м<sup>2</sup> и протеканием разрядного тока (частичные разряды). Это вызывает в образце электромиграцию жидкости и электродиффузию молекул пара в макрокапиллярах в зону испарения. Накопление ионов приводит также к запасанию энергии КПП в гигроскопической области влагосодержаний. Это вызывает отклонение системы от термодинамически равновесного и переходу в метастабильное состояние, что обуславливает изменение внутренней энергии связи влаги и уменьшение поверхностного натяжения влаги макрокапилляров. Последнее приводит к большему ускорению внутреннего массопереноса по механизму, описанному выше для доразрядного НЭП [11]. Снижение температуры поверхности образца при сушке в КР вызывает усиление потока тепла от окружающей среды, влияющего на основной поток влаги в КПП. Эти факторы интенсифицируют внутренний тепло- и массоперенос и изменяют положение кинетических кривых  $\nabla T(\tau)$  и  $W(\tau)$  в КР. Таким образом, по сравнению с другими технологическими применениями электричества ЭИТ обладает рядом преимуществ, связанных с непосредственным силовым воздействием ЭП на разные фазы КПП без промежуточных трансформаций энергии.

Дальнейшее увеличение тока (естественно, и межэлектродного напряжения, а также напряженности НЭП) до  $1 - 10 \cdot 10^{-5}$  А приводит к возникновению светлого (стримерного) КР, сопровождающегося ростом коэффициента интенсификации испарения со свободной поверхности жидкости до значений 10 – 12. При этом вводимая удельная мощность увеличивается почти на два порядка. При разности потенциалов 8 кВ ток КР изменялся в процессе отдельного опыта от 0,4 до 0,1 мА. При таких условиях погрешность воспроизводимости опытов была не хуже 3%.

Увеличение мощности еще на порядок переводит КР в ИР. При этом несмотря на заметный джоулев нагрев обводненного образца (на 5 – 7 К) происходит некоторое замедление темпа роста коэффициента интенсификации. Это обусловлено исчезновением ЭВ для такого разряда.

Многообразные явления, наблюдаемые при ИР между металлическим и электролитным электродами при атмосферном давлении, исследованы в [21]. При измерении зависимости пробивного напряжения от расстояния фиксировалось изменение формы электролитного электрода. При небольших пробивных промежутках происходит поднятие электролита, которое уменьшает величину промежутка и вызывает сильное изменение ЭП. При увеличении пробивного промежутка до 3 мм происходит резкое увеличение пробивного напряжения до 8 кВ. Эта область характеризуется поднятием электролита. В пределах погрешности экспериментов авторами не обнаружена зависимость величины пробивного напряжения от электропроводности электролита и полярности металлического электрода. С ростом электропроводности происходит увеличение высоты поднятия электролита для обеих полярностей. Кроме того, существует зависимость поднятия электролита от рода раствора. При использовании в качестве электролитного электрода дистиллированной воды также отсутствует зависимость величины пробивного напряжения от полярности металлического электрода. Однако, при этом внешний вид разряда отличается от предыдущих. У поверхности воды он растекается и имеет вид фигур Лихтенберга. При пробое промежутка даже визуально наблюдается перебрасывание электролита на металлический электрод, причем более интенсивный в случае положительной полярности металлического электрода. Если в качестве электролитного электрода используется дистиллированная вода, то перенос воды для обеих полярностей отсутствует.

Таким образом, для системы, состоящей из электролитного и металлического электродов, картину развития ИР можно представить так [22]. В межэлектродном промежутке образуется сравнительно узкий токопроводящий канал с высокой температурой ионизации. За счет выделения джоулева тепла в нем происходит повышение давления, а у металлического электрода образуется светящееся облако паров электролита. В следующий момент канал разряда начинает расширяться со сверхзвуковой скоростью и вызывает распространение ударной волны. При этом плотность газа в канале очень мала, так как подавляющая часть массы движущегося газа из него вытеснена, вследствие чего при завершении разряда происходит втягивание раствора в искровой канал. В [23] высказано предположение, что на подъем поверхности электролита в ЭП влияет поверхностная плотность заряда, которая при наложении ЭП зависит от наличия зарядов, имеющихся в двойном слое при отсутствии внешнего поля, и зарядов, возникающих вследствие электрической индукции.

При возникновении ЭП ионы, находящиеся в межэлектродном пространстве, перемещаются к электродам соответствующей полярности, и в двойном слое происходит изменение рода проводимости. При этом ионы в растворе движутся со скоростью, на несколько порядков меньшей, чем в газе.



При достаточной напряженности поля процесс заканчивается электрическим пробоем межэлектродного пространства. Между электродами возникает обычный ИР – электрические импульсы, длительность которых не превышает  $10^{-3}$  с. Через образовавшийся в определенный момент практически безынерционный канал сквозной проводимости с ничтожно малым омическим сопротивлением система броском освобождает накопленную энергию. При этом в рассматриваемом межэлектродном пространстве имеет место только электронная проводимость, двойной электрический слой перестает существовать. Несущийся с большой скоростью пакет электронов, ударившись о поверхность анодного электролита и не встретив механического сопротивления (как при металлическом аноде), глубоко проникает в толщу электролита, нейтрализуя этим длинную цепочку ионов. От ударного воздействия электронного пакета сначала жидкость прогибается, а затем в данном месте резко поднимается. На подъем электролита влияют его плотность, вязкость и особенно силы поверхностного натяжения, зависящие от концентрации зарядов. Заряжение поверхности жидкости ионами одного знака приводит к уменьшению поверхностного натяжения. При достаточно высокой их концентрации возникает аperiодическая неустойчивость поверхности, и происходит сброс избыточного поверхностного заряда путем эмиссии высокодисперсных капелек.

Если катод – электролит на металле, необходимо помнить, что всякая поверхность твердого вещества (металлическая пластинка в кювете) даже после самой тщательной механической обработки имеет множество выступов и впадин, по размерам намного порядков превосходящих диаметр иона [23]. Поэтому ЭП на поверхности плоского электрода неравномерно. На ней есть точки, где напряженность поля может достичь значения  $10^{10}$  В/м, что уже достаточно для вырывания электронов из выступов металлической поверхности. Дальнейшее повышение напряжения увеличивает энергию отрывающихся электронов, в результате чего появляется стример, перемещающийся к аноду и ионизирующий на своем пути молекулы воды и газа. В месте выхода стримера, а чуть позже – электронного пакета поверхность жидкости вспучивается. Этому явлению способствуют также электрохимические и электролизные процессы с выделением на катоде водорода и других газов, обуславливающие появление пузырьков, которые всплывают и лопаются на поверхности, выбрасывая в том числе и водяной пар. Выходящие из жидкости электроны могут быть гидратированы, но при соударениях с молекулами газа теряют свою гидратную оболочку, и в канале ИР образуется водяной пар. Отметим, что в [24] для передпробивной стадии ИР под воздействием сильно неоднородного ЭП под верхним стержневым электродом наблюдался подъем водного электролита. При этом поверхность электролита принимала конусообразную форму, и электрический пробой разрядного промежутка осуществлялся между электролитным “острием” и металлическим электродом. В наших опытах наблюдался и подъем пленки воды по стенкам кюветы. Видимо, это явление аналогично наблюдаемому в [25]. Механизм процесса обусловлен, очевидно, сложным совместным действием пондеромоторных сил ЭП электродов, поверхностных свободного и связанного зарядов границы раздела жидкость – газ и неравномерно поляризованной диэлектрической стенки сосуда, а также действия поверхностного натяжения и гравитации (уравнение (13)). На ведущую роль свободных зарядов в этом виде электромассопереноса указывает его незначительность в переменном поле (1 – 2 мм).

Поверхностное натяжение влияет на форму образующегося электролитного “острия”, то есть на геометрию разрядного промежутка, а следовательно, на напряжение ЭП. Деформация свободной поверхности электролита в пределах нескольких миллиметров, в зависимости от напряжения под каждым острием, происходит в результате всех взаимосвязанных факторов и стимулирует образование хаотических волновых процессов во всем тонком слое покрывающей жидкости [26]. Это, кроме повышения температуры, увеличивает скорость испарения воды в тем большей мере, чем большая мощность вводится в электролит с ИР. Поэтому величина  $\Delta T$  в первом периоде существенно уменьшается по сравнению с сушкой в КР, а  $W$  образца также интенсивно уменьшается. В первом периоде при воздействии ИР испаряется не только влага капиллярного и стыкового состояний, но и, частично, влага микрокапилляров (влага капиллярной конденсации и полимолекулярная влага), что резко сокращает процесс сушки. Это происходит благодаря поднятию влаги этих видов к поверхности КПТ и концентрированию ее под игольчатыми электродами. Значительное поднятие воды в макрокапиллярах с последующей длительной задержкой (несколько суток) в новом положении обнаружено в [10]. Там же предложен и механизм этих явлений. Эффект последствия ЭП в воде относительно бактерицидных процессов отмечен [27]. Описанный эффект непосредственного воздействия ИР на жидкость и ее подъем по капиллярам в пористой среде должен быть экспериментально и теоретически изучен. В результате открывается возможность создания нового типа жидкостного фитиля, важнейшим достоинством которого является неограниченная высота подъема жидкости при использовании электрогидродинамического насоса ступенчатой формы. Следует также отметить большую практиче-

скую важность исследования влияния на эффективность электроконвекции и перекачки жидкости поляризации диэлектрических материалов в ЭП и сил поверхностного натяжения [25].

Из приведенных результатов следует, что ведущую роль для интенсификации внешнего теплообмена в НЭП при электроконвективной сушке играет ускорение процесса в первом периоде за счет КР и ИР. Здесь испаряется из сильно обводненных КПТ лишняя часть практически свободной влаги, прилипшей к поверхности, влага намокания, набухания, механически захваченная и иммобилизованная при образовании тела в водной среде, а также влага капиллярного и стыкового состояний в макропорах, поглощенная при непосредственном контакте КПТ с водой. С помощью КР, и в особенности ИР, при атмосферном давлении можно вводить любые мощности в свободную воду. Газовые разряды, пока не испарится свободная влага, не приводят к существенной для практики производственных процессов электроэрозии, деформации и дробления сушеного тела, как при гигроскопических влагосодержаниях. Вместе с тем явления электрической эрозии [28] могут быть совместимы с удалением влаги любых форм связи (химической, физико-химической и физико-механической), когда явление электрической эрозии может представлять интерес как средство модификации поверхности тела, моделирования и имитации ряда сложных физических и физико-химических процессов, например, связанных с взаимодействием высокотемпературной плазмы с поверхностью твердого тела, созданием особых состояний вещества, обеспечением быстротекающих агрегатных превращений, взрывного испарения, мгновенного плавления, локальных термических ударов. Это особенно актуально при разработке современных электрофизических методов обработки материалов (лазерным излучением, электронными и ионными лучами). Несмотря на различие физических принципов, по которым при этом осуществляется энергетическое воздействие на поверхность твердого тела, общими здесь являются высокотемпературные процессы, связанные с концентрацией большой энергии с локальными тепловыделениями, и ряд других, которые в сумме могут создать на поверхности твердого тела аналогичные физические ситуации.

В случае выключения внешнего ЭП запасенная в первом периоде электронно-ионной сушки энергия может использоваться и во втором периоде сушки. В частности, может применяться накопленная электрическая энергия (осевшие ионы на внешней и внутренней поверхности КПТ, создающие внутреннее НЭП с высоким  $\nabla E$  и частичными разрядами) и тепловая энергия (высокая температура тела) для десорбции адсорбированной влаги и гидрофобизации внутренней поверхности КПТ. Под действием высоких  $E$  ЭП в местах пониженной электрической прочности диэлектрических сред (воздушные включения между зернами адсорбента) возникают частичные разряды, которые представляют собой пробои газовых включений в виде микрозарядов [29, 30]. Частота их следования  $\sim 10^{-8}$  с. Их энергия расходуется частично на разогрев, а частично – на разрушение поверхностных слоев твердого диэлектрика.

Во втором периоде, когда нежелательны электро- и тепловая эрозии поверхности сушеного тела и высокие темпы сушки, приводящие к деформации тела, образованию трещин и вообще к модификации физических и химических свойств, целесообразно использовать доразрядное НЭП либо НЭП темнового КР, интенсифицирующие в основном внутренний массоперенос в КПТ.

Таким образом, ряд ускоряющих внешний и внутренний теплообмен факторов и в первую очередь громадная энергоемкость, строгая пространственная направленность и сконцентрированный только на влажных участках, а не на всей поверхности сушеного КПТ, то есть локальный характер действия плазмы КР и в особенности ИР (местоприложение ИР всегда строго локализовано, а такую минимальную площадь воздействия и степень концентрации энергии невозможно получить другими способами [30]), делают эти газовые разряды исключительно удобным методом энергоподвода и средством ускорения сушки сильно обводненных КПТ. При этом скорость сушки в первом периоде возрастает в десятки раз, во втором – в несколько раз при минимальных затратах энергии по сравнению с тепловой сушкой. Это достигается за счет электрического ветра, сопровождающего КР, и избирательного ввода в наиболее влажные участки локальных потоков большой плотности электрической энергии. Поэтому электронно-ионную сушку можно использовать как самостоятельный, экономически выгодный вид сушки [31].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сильные электрические поля в технологических процессах (Электронно-ионная технология). Сб. статей. Вып. 3 / Под ред. акад. В. И. Попкова. М., 1979.
2. Панченко М.С. Повышение эффективности процесса сушки при использовании неоднородных электрических и магнитных полей // Электронная обработка материалов. 1980. № 4. С. 42–47.
3. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Плазмоиды – мощный технологический фактор // Там же. 1972. № 5. С. 3–7.
4. Лыков А.В. Теория сушки. М., 1968.

5. Панченко М.С., Панасюк А.Л., Мосиевич А.С. и др. Интенсификация адсорбционно–десорбционных процессов силикагелей наложением электрических полей // Электронная обработка материалов. 1988. № 2. С. 32–37.
6. Дущенко В.П., Панченко М.С., Бельдид В.В. Определение удельных теплот испарения влаги из коллоидных материалов // Известия вузов. Пищевая технология. 1966. № 5. С. 145–149.
7. Болога М.К., Руденко В. М. Об интенсификации испарения жидкости под воздействием электрического поля // Электронная обработка материалов. 1975. № 3. С. 37–40.
8. Бабеня Л.А., Головейко А.Г., Новикова В.И. и др. Влияние электрических полей на кинетику фазовых переходов // Иженерно–физический журнал. 1986. Т. 50. № 5. С. 729–735.
9. Старов В.И., Чураев Н.В., Панченко М.С., Панасюк А.Л. Механизм интенсификации процессов сушки в неоднородных электрических и магнитных полях // Тез. докл. Всесоюзной научно–технической конференции “Интенсификация процессов сушки и использование для этих целей новой техники”. Калинин, 1977. С. 13–18.
10. Полищук Н.В., Панченко И. М., Панченко М.С. Эффекты воздействия и последействия электрических полей на поднятие воды в макрокапиллярах // Электронная обработка материалов. 2002. № 4. С. 54 – 67.
11. 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 // Инженерно – физический журнал. 1978. Т. 35. № 1. С. 93–100.
12. Адамсон А. Физическая химия поверхностей / Пер. с англ. И. Г. Абидора. М., 1979.
13. Пурмал М.Я. Сушка ионизированным воздухом без подвода тепла к высушиваемому материалу // Электронная обработка материалов. 1978. № 2. С. 45–47.
14. Ревзин И.С. Экспериментальное исследование влияния переменного электрического тока на поверхностное натяжение жидкостей // Там же. 1975. № 3. С. 28–30.
15. Мунгиев В.А. Влияние электромагнитных полей на эффект «зависания» капель жидкости над ее поверхностью // Журнал физической химии. 1979. Т. 53. № 10. С. 2653–2654.
16. Еремин Е.Н. Элементы газовой электрохимии. М., 1961.
17. Хлюстова А.В., Максимов А.И. Перенос компонентов раствора в зону плазмы в условиях тлеющего разряда атмосферного давления с электролитным катодом // Электронная обработка материалов. 2003. № 1. С. 44–47.
18. Бабеня Л.А., Головейко А.Г., Новикова В.И. Диагностика электрогазодинамических потоков слабого высоковольтного разряда // Иженерно–физический журнал. 1987. Т.53. № 6. С. 961–966.
19. Зафрин Э.Л., Болога М.К., Бантыш Л.А., Либерман Л. Ш. Использование тлеющего разряда для сублимационной сушки пищевых продуктов // Электронная обработка материалов. 1974. № 6. С. 74–76.
20. Наремский Н.К., Монтык П.М., Кирвас А.В. и др. Применение электронно–ионной обработки воздуха в камерах созревания твердых сыров // Там же. 1977. № 4. С. 76–77.
21. Лазаренко Б.Р., Дураджди В.Н., Факторович А.А., Брянцев И. В. Исследование пробоя между металлическим и электролитным электродами // Электронная обработка материалов. 1970. № 4. С. 18 – 21.
22. Дураджди В.И. Экспериментальное исследование канала искрового разряда между металлическим и электролитным электродами // Там же. 1971. № 2. С. 44–46.
23. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Механизм прохождения электрического тока через электролит // Там же. 1979. № 1. С. 5 – 11.
24. Дураджди В.Н. Об электрическом импульсном разряде между металлическим и электролитным электродами // Там же. 2001. № 3. С. 22–26.
25. Кравцов А.А., Рачев А.А. Перекачка слабопроводящих жидкостей силами постоянного электрического и гравитационного полей // Там же. 1978. № 5. С. 39–42.
26. Гросу Ф.П., Болога М.К. Электроконвективные явления и интенсификация теплообмена // Там же. 1977. № 5. С. 51–62.
27. Жук А.Е., Жук Е.Г. О природе явления последействия в воде, обработанной импульсными электрическими разрядами // Там же. 1975. № 4. С. 60–61.
28. Намитов К.К. Электроэрозионные явления. М., 1978.
29. Панченко М.С., Панченко И.М., Панасюк А.Л. и др. Повышение эффективности работы промышленных адсорберов путем продления срока эксплуатации адсорбентов в электрическом поле // Электронная обработка материалов. 1995. № 1. С. 39–42.

30. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Изыскание новых применений электричества // Там же. 1977. № 5. С. 5–19.

31. Лыков А.В. Прогноз развития науки о сушке капиллярно-пористых коллоидных тел // Инженерно-физический журнал. 1970. Т. 43. № 4. С. 609–616.

Поступила 23.02.04

### Summary

Termogrammes and drying curved lines of КСК-2 silicagel in strong non-uniform electric fields, including crown and spark discharge fields are shown. Equations of mass-transfer for convection molecular stream in gas phase and pull of liquid dielectric in non-uniform fields are presented. Equations of mass transfer in capillary – porous bodies are confirmed by the experiment. In accordance with theory is shown that for silicagel sample КСК-2 that have fixed size and through pores non-uniform field without discharge has an influence on inner mass and heat transfer. The field of crown and the more so spark discharge largely influences not only to inner, but to external heat and mass and mass transfer, that essentially reduces the time of drying.

Л.А. Кузьмичева, А.И. Максимов, Ю.В. Титова

## ИЗМЕНЕНИЕ КИСЛОТНОСТИ РАСТВОРОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В УСЛОВИЯХ ИНИЦИИРОВАНИЯ РЕАКЦИЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЗНАЧЕНИЕ pH

*Институт химии растворов РАН,  
ул. Академическая, 1, г. Иваново, 153045, Россия*

### Введение

Известно, что тлеющий разряд атмосферного давления с раствором электролита в качестве электродов инициирует окислительно-восстановительные процессы в жидкой фазе и в то же время вызывает изменение кислотности растворов [1 – 6]. Ранее нами проведены систематические исследования влияния тлеющего разряда на кислотность растворов хлоридов щелочных металлов в условиях, когда не наблюдалось интенсивных окислительных процессов в жидкой фазе. В качестве одной из возможных причин изменения pH раствора при этом рассматривались процессы переноса компонентов раствора в зону плазмы.

Целью настоящей работы было исследование влияния тлеющего разряда на кислотность растворов, в которых действие разряда инициирует химические превращения, влияющие на pH среды.

### Методика эксперимента

В качестве объектов исследований использованы растворы сульфата натрия, гидрофосфата натрия, а также калия железистосинеродистого (желтая кровяная соль). Выбор объектов обусловлен следующими причинами. Действие тлеющего разряда на водный раствор сульфата натрия не приводит к протекающим с заметной скоростью окислительно-восстановительным процессам [7]. Раствор гидрофосфата натрия в кислой среде приводит к образованию дигидрофосфата. В результате возникает смесь, обладающая буферными свойствами. Это должно оказать влияние на характер изменения pH исходного раствора в результате действия газового разряда. Действие тлеющего разряда на желтую кровяную соль приводит к ее окислению с образованием красной кровяной соли и ионов гидроксидов. Этот факт также не может не сказаться на ходе изменения кислотности раствора под действием разряда.

Объем обрабатываемого раствора составлял 400 мл, ток разряда изменялся от 10 до 40 мА. Показатель pH измеряли pH-метром «Аквилон-pH 410». Концентрация образовавшейся красной кровяной соли определялась спектрофотометрически на длине волны 418 нм. Прямой эксперимент показал, что самопроизвольным окислением  $K_4[Fe(CN)_6]$  в  $K_3[Fe(CN)_6]$  можно пренебречь.

© Кузьмичева Л.А., Максимов А.И., Титова Ю.В., Электронная обработка материалов, 2004, № 5. С. 37 – 40.