

4. *Kojevnicov I.V., Bologa M.K., Motorin O.V.* EHD-Pump Characteristics optimization // Annual Report of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Hyatt Regency Cancun, Quinta Roo, Mexico, October 20-24, 2002.

5. *Кожухарь И.А., Болога М.К., Малахов А.В.* Некоторые методы расчета электрогидродинамического насоса // Электронная обработка материалов. 1982. № 5. С. 74–75.

Поступила 18.01.05

Summary

Results of investigation of electrohydrodynamical pump "perforated ring-tube" are reported. Pressure-flow rate characteristics of the pump in the various dielectric media are obtained. Formulas for pressure-flow rate characteristics calculation, which are in a good agreement with experiment, are proposed.

Н.В. Полищук, И.М. Панченко*, М.С. Панченко, А.С. Мосиевич, А.Л. Панасюк

ЭНЕРГОГРАММЫ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СУШКИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОГО ТЕЛА В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

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

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

Сушка является одним из трудоемких технологических процессов и достаточно широко распространена в народном хозяйстве каждой страны. На сушку с использованием тепла расходуется около 25% мировых энергоресурсов. Поэтому повышение эффективности сушки позволяет обеспечить интенсификацию производства, улучшение качества продукции, сокращение расходов топлива и энергии, снижение затрат обслуживания, охрану окружающей среды от вредных выбросов теплосушильных установок.

Как показывает практика последних лет, наиболее перспективными по влиянию на процесс сушки становятся электрические поля (ЭП). Существенно, что по сравнению с ИКС, СВЧ, электроконтактными, тепловыми и другими методами сушки, применение постоянных и промышленной частоты переменных ЭП значительно снижает потери энергии. Последнее делает сушку с прямым использованием энергии этих полей особенно экономной и эффективной [1]. В доразрядном неоднородном электрическом поле (НЭП) во влажное тело вводится незначительное количество энергии и поэтому его интенсифицирующее воздействие слабое. Следовательно, необходимо вводить большие потоки энергии в сушимые капиллярно-пористые тела (КПТ) с помощью разрядных НЭП. Для их создания требуется в сравнении с энергоемкой СВЧ-сушкой с использованием сложных и дорогостоящих генераторов, резонаторов и волноводов очень простое аппаратное оформление – источник высокого напряжения и электроды, как правило, в виде острие – плоскость, между которыми размещается сушимый материал. На него при атмосферном давлении воздействует либо низкотемпературная плазма коронного разряда (КР), либо высокотемпературная плазма искрового разряда (ИР). Использование этих газовых разрядов относится к области электронно-ионных технологий (ЭИТ). Отметим, что высокоинтенсивная СВЧ-сушка требует затрат электроэнергии на удаление из КПТ 1 кг влаги, чем традиционные в несколько раз больше методы сушки.

© Полищук Н.В., Панченко И.М., Панченко М.С., Мосиевич А.С., Панасюк А.Л., Электронная обработка материалов, 2005, № 3, С. 58–69.

В основе ЭИТ лежит воздействие сильных ЭП на заряженные частицы диспергированного материала. Электрогазоочистка, электроокраска, электросепарация, электросмешивание, нанесение порошковых покрытий в ЭП, электропрядение, электропечать, электрическая размерная обработка материалов, формирование новых и модификация прежних материалов, сильные ЭП в сельском хозяйстве – это далеко не полный перечень примеров использования сильных ЭП в разных технологиях [2].

На протяжении ряда лет делаются попытки применить ЭИТ для интенсификации процесса сушки. Такой вид сушки назван электронно-ионной сушкой (ЭИС). Использование ЭИС позволит реализовать на практике прогноз развития науки о сушке [3], по мере накопления экспериментальных данных по комплексным физическим характеристикам и электромагнитодиффузии влаги появится возможность применения новых методов сушки с использованием электромагнитных полей.

Одним из важнейших критериев эффективности данного вида сушки является величина энергии, необходимой для удаления из КПТ массы m влаги, которая может находиться в различных состояниях и формах связи влаги с пористым скелетом твердой фазы. Классическим методом исследования энергетики процесса сушки с учетом различия состояний и форм связи влаги является метод энергограмм сушки (ЭС) В. М. Казанского [4]. С помощью ЭС определяют количество тепловой энергии, необходимой для испарения 1 кг влаги физико-механической и физико-химической формы связи. К первой относятся три вида капиллярной влаги, два из которых представляют воду, различную по особым состояниям (капиллярную и стыковую) 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 – влаги полимолекулярных и мономолекулярных слоев.

Целью данной работы явилось исследование ЭС (зависимости удельных теплот испарения влаги L из КПТ от времени сушки τ) и кривых скорости сушки ($dm/d\tau(\tau)$) силикагеля КСК–2 в условиях воздействия на его поверхность и пористый объем как доразрядных, так и разрядных НЭП.

Данный кинетический электрокалориметрический метод [5] служит для определения L при изотермической сушке тонких образцов с избытком увлажненных КПТ при отсутствии теплообмена между поверхностью тела и окружающим нагретым воздухом. Уравнение теплового баланса процесса сушки при наличии внутреннего и внешнего источников тепла (электрического нагревателя и газового разряда)

$$L \frac{dm}{d\tau} + c_{i\dot{a}\dot{o}} m \frac{dT_{i\dot{a}\dot{o}}}{d\tau} - \alpha S (T_{\dot{a}\dot{c}\dot{a}} - \dot{O}_{i\dot{a}\dot{o}}) - I^2 R - iU = 0. \quad (1)$$

Здесь первый член учитывает тепло, расходуемое на испарение влаги; второй – на нагревание влажного тела; третий – на теплообмен образца с окружающей средой; четвертый учитывает мощность, которую выделяет электрический нагреватель; пятый член определяет мощность, вводимую во влажный образец за счет газового разряда; $dm/d\tau$ – скорость сушки; $c_{обр}$ – удельная теплоемкость влажного КПТ; $dT_{обр}/d\tau$ – скорость нагревания образца; I – сила тока; R – сопротивление нагревателя; α – коэффициент внешнего теплообмена; S – поверхность образца; $T_{возд}$ – температура воздуха; $T_{обр}$ – температура образца; i – сила тока газового разряда; U – напряжение на электродах. В условиях принятого метода сушки разность температур $\Delta T = T_{возд} - T_{обр}$ должна компенсироваться нагревателем в калориметрической кювете. При этом $T_{обр} = T_{возд} = \text{const}$ и $dT_{обр}/d\tau = 0$. С увеличением тока газового разряда величина тока во внутреннем нагревателе уменьшалась на такую величину, чтобы компенсировать вводимую тепловую мощность за счет газового разряда. Величину L рассчитывали по формуле

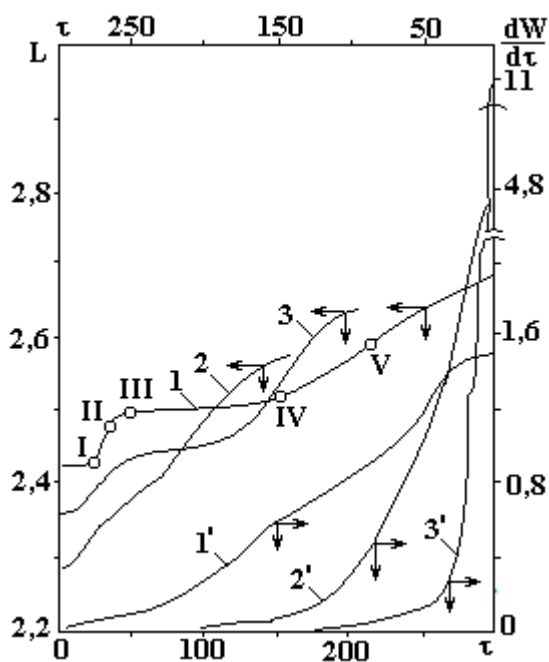
$$L = \frac{I^2 R + iU}{dm/d\tau}. \quad (2)$$

Таким образом, для расчета L надо иметь кривую тока в нагревателе кюветы $I(\tau)$, кривую тока газового разряда $i(\tau)$ и кривую скорости сушки ($dm/d\tau(\tau)$). Последняя получается из кривой сушки (убыли со временем τ массы m влажного образца) $m(\tau)$, отражающей изменение влагосодержания W образца во времени, дискретным дифференцированием. Схема и конструкция использованной установки, методика работы на ней и подготовка образцов к опыту в основном такая же, как и описанная в [5].

Как образец исследования применялся силикагель КСК-2. Это модельное КПП. Он типичный представитель эталонного ряда однородно-крупнопористых промышленных сорбентов состава $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Сорбционные свойства этого сорбента по воде представлены в [6]: влага монослоя – 6,8; общее количество адсорбционно-связанной влаги – 16,6; максимальное гигроскопическое влагосодержание – 102,7. Структурные характеристики: плотность сухого материала – $0,39 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; истинная плотность – $2,240 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; кажущаяся плотность – $0,671 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; средний размер микропор – $60 \cdot 10^{-10} \text{ м}$; объем микропор – $1,041 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$. В опытах использовалась фракция с диаметром зерен $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Образец с диаметром зерен $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ слоем толщиной $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ засыпался в квадратную фторопластовую кювету со стороной $4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ на нижний электрод, который представлял собой заземленную тонкую металлическую пластинку. Под ней размещался внутренний электронагреватель, который компенсировал разность температур $\Delta T(\tau)$ между окружающей средой и влажным образцом, а группа спаев дифференциальной термопары, другая группа находилась в воздухе над влажным образцом. Дифференциальная термопара служила датчиком для компенсатора ΔT .

Для создания НЭП в кювете использовалась следующая система электродов. Одним из них служила пластинка. Роль второго электрода исполняли пять тонких металлических игл, соединенных между собой и расположенных таким образом, что острия их могли находиться на расстоянии $0,3 \div 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ от поверхности обводненного образца. Верхняя группа спаев дифференциальной термопары находилась достаточно далеко, чтобы исключить влияние на нее НЭП. В качестве измерительного устройства термо-э.д.с. 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. Постоянная разность потенциалов до 25 кВ создавалась с помощью высоковольтного источника «Разряд-1». Это маломощный, с плавно регулируемым напряжением, источник, снабженный защитой от возникновения дугового разряда (во избежание 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 $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. В зависимости от расстояния электродов до поверхности образца 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. То, что мы называем влагой, естественно, является слабым 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 и других неконтролируемых процессов).



Энергограммы (L , МДж/кг – τ , мин) – 1, 2, 3 и кривые скорости сушки ($dW/d\tau$, %/мин – τ , мин) – 1', 2', 3' силикагеля КСК-2 при температуре 303 К. 1, 1' – без поля и в условиях наложения НЭП ($\nabla E \sim 10^{12} \text{ В/м}^2$); 2, 2' – в ЭП коронного разряда; 3, 3' – в ЭП искрового разряда

На рисунке представлены энергограммы $L(\tau)$ и кривые скорости сушки $dW/d\tau(\tau)$, 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 в наших условиях протекают токи ($i = 0 - 1 \cdot 10^{-7}$ А). Изменение полярности постоянного доразрядного НЭП практически не влияет на энергограммы и кривые скорости сушки. В постоянном доразрядном НЭП с максимально возможным градиентом напряжения $\nabla E \sim 10^{12}$ В/м² возле острия в начале процесса, когда еще не происходит сушка силикагеля, а идет процесс испарения избытка свободной воды, расхождение кривых $L(\tau)$ и $dW/d\tau(\tau)$ в полях и без них практически отсутствует, то есть влияние таких полей не проявляется на энергетике сушки, ибо вводимая мощность была крайне незначительной и составляла около 0,1 Вт/м². В НЭП на каждую дипольную молекулу воды действует сила

$$f_1 = p_e \nabla E \cos \alpha, \quad (3)$$

где p_e – дипольный момент молекулы воды; ∇E – градиент числового значения напряженности E НЭП; α – угол между осью диполя и направлением ЭП. Но ее величина крайне незначительная по сравнению с энергией водородных связей между молекулами жидкости [7], поскольку величина $p_e = 6 \cdot 10^{-30}$ Кл·м, а величина ∇E на поверхности воды практически равна нулю, поскольку избыточный слой воды для высоких напряженностей является проводящим (электропроводность $\sigma \sim E^2$) и линии напряженности входят в него почти перпендикулярно. В пределах горизонтальных участков энергограмм и кривых скорости сушки происходит испарение избытка свободной воды. При этом не обнаружено заметной интенсификации испарения жидкости, поскольку начальные горизонтальные участки кривых не смешались. Таким образом, НЭП несамостоятельного разряда не способно заметным образом интенсифицировать испарение даже свободной воды. Это же явление было обнаружено и в [8].

С окончанием испарения покрывающей пленки воды открываются макропоры межзернового пространства образца (точка перегиба I ЭС) и скорость испарения лимитируется массопереносом внутри макропор. Величина L увеличивается, поскольку при сохранении условия изотермичности (сохранении энергоподвода) снижается интенсивность испарения. Это обусловлено уменьшением площади испарения, и к тому же мениски воды капиллярного состояния опускаются внутрь образца, что удлиняет путь диффузии молекулам водяного пара. При этом уже отсутствует экранирующая проводящая пленка избыточной влаги и силовые линии поля входят в зерна силикагеля не под прямыми углами. Следовательно, теперь уже как в зернах силикагеля, так и в макрокапиллярах $\nabla E \neq 0$. Но все же величина силы f_1 еще остается очень малой, чтобы заметно снизить межмолекулярные взаимодействия в поверхностных слоях менисков. При этом на каждый единичный объем поляризованного столбика капиллярной жидкости будет действовать сила

$$f_2 = 0,5 \varepsilon_0 (\varepsilon_{ж} - 1) \nabla E^2, \quad (4)$$

где ε_0 – электрическая постоянная; $\varepsilon_{ж}$ – диэлектрическая проницаемость жидкости.

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

$$f_3 = \rho_e E. \quad (5)$$

Но поскольку сдвига кривой $L(\tau)$ не происходит, то, видимо, и силы (4) и (5) доразрядных НЭП все еще остаются недостаточными, чтобы уменьшить работу выхода молекул или гидратированных ионов с жидкости. Эти силы в расчете на объем каждой молекулы, принадлежащей единице объема жидкости, еще заведомо меньше водородных сил связи между молекулами воды. К тому же и плотность свободных зарядов в доразрядном поле очень малая. От точки II до точки III происходит испарение толстых макропленок стыковой влаги, непрерывно покрывающих зерна силикагеля. Это также свободная влага, то есть не связанная со стенками капилляров адсорбционными силами. При этом НЭП не оказывает заметного влияния на величину L , хотя скорость сушки продолжает падать. Это происходит скорее не за счет увеличения энергии отрыва молекул от поверхности пленки, а вследствие увеличения пути диффузии их в макропорах образца. При этом величина тока в кювете умень-

шается настолько, что замедляется рост величины L . При испарении влаги микрокапилляров (точки III–IV), а также адсорбированной влаги полимолекулярных слоев (точки IV–V) и влаги мономолекулярного слоя (после точки V) энергия физико–механической связи воды в микрокапиллярах и физико–химической связи молекул влаги с твердой фазой образца постепенно увеличивается, а поэтому продолжается дальнейший рост теплоты фазового перехода. В этих условиях НЭП тем более не может проявить своего влияния.

Теплота испарения L идет на работу A_1 , совершаемую молекулами при прохождении сквозь поверхностный слой жидкости, и на работу A_2 , связанную с увеличением удельного объема $V_{жс}$ вещества при переходе из жидкого в газообразное состояние:

$$L = A_1 + A_2. \quad (6)$$

Толщина поверхностного слоя, в пределах которого действуют на молекулу силы притяжения, есть величина порядка радиуса молекулярного действия r . Обозначая среднюю силу, действующую на длине r , через $\langle f \rangle$, получаем выражение для работы вырывания одной молекулы:

$$\Delta A = \langle f \rangle \cdot r. \quad (7)$$

Работа, совершаемая всеми молекулами, находящимися в единице массы жидкости,

$$A_1 = n_{жс} \cdot \Delta A = n_{жс} \cdot \langle f \rangle \cdot r, \quad (8)$$

где $n_{жс}$ – число молекул в единице массы жидкости. Работа

$$A_2 = p (V_n - V_{жс}), \quad (9)$$

где V_n – удельный объем пара; p – давление, при котором происходит испарение. Подставляя (8) и (9) в (6), получаем

$$L = n \cdot \langle f \rangle \cdot r + p (V_n - V_{жс}). \quad (10)$$

Соотношение (10) не позволяет непосредственно вычислить L , поскольку остаются неизвестными точные значения $\langle f \rangle$ и r , но оно показывает, что L зависит от той же величины молекулярного взаимодействия $\langle f \rangle$, которая обуславливает и наличие поверхностного натяжения. При повышении температуры T уменьшаются сила $\langle f \rangle$ и разность удельных объемов $V_n - V_{жс}$, откуда, по (10), с увеличением T убывает и L . При приближении T к критической температуре T_k величина $\langle f \rangle$ стремится к нулю, и одновременно исчезает различие между V_n и $V_{жс}$. Поэтому $L \rightarrow 0$. Последний член в (10) составляет обычно около 15% от величины L . Следовательно, для существенного изменения L необходимо прежде всего добиться изменения величины первого слагаемого за счет изменения величин $n_{жс}$, $\langle f \rangle$ и r . Наиболее значительным фактором влияния на эти величины является T . Но повышение T сопряжено с увеличением затрат теплоты, которая нагревает не только жидкость, но и всю массу сушильной установки. К тому же значительное количество теплоты выбрасывается в окружающую среду, вызывая ее тепловое загрязнение.

Величина энергии водородной связи молекул воды составляет в обычных условиях несколько десятых эВ. Чтобы существенно не повышать T и разорвать такую связь, нужно использовать КР или ИР, где энергия бомбардирующих поверхность влажного КПП электронов и ионов заведомо превышает эти величины и вместе с тем их действие локализовано только на влажных участках сушимого объекта.

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. Вводимая мощность составляет всего лишь 1 Вт/м^2 , и она заметным образом не влияет на выделяемую мощность электронагревателем в калориметрической кювете. Основным, интенсифицирующим сушку, фактором является ЭВ [8], 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 (уменьшение $n_{жс}$), что ускоряет парообразование. Отраженные потоки ЭВ уносят значительное количество пара от поверхности высушиваемого КПП. Это способствует уменьшению второго члена в (10). Кроме того, молекулы воды, содержащиеся в воздухе, разлагаются в ЭП ионизатора [9] и начальная влажность сушильного агента снижается, как и парциальное давление насыщенного пара. Образование одного иона H_2O^+ вследствие электронного удара ведет, согласно кластерной теории, к

диссоциации пяти молекул водяного пара. Это также приводит к уменьшению второго члена в (10). Следовательно, прохождение электрического тока КР способствует уменьшению парциального давления пара в окружающем воздухе. Скорость понижения давления паров воды связана с током проводимости в парогазовой среде уравнением [10]:

$$dp/d\tau = ai, \quad (11)$$

где коэффициент a зависит от размеров и формы сушильной камеры и не зависит от давления и напряженности ЭП в разряде.

Насыщение поверхностного слоя воды, покрывающей образец, ионами объемного заряда и молекулами озона существенно снижает поверхностное натяжение [11]. Это приводит к уменьшению работы выхода молекул в пограничный слой за счет уменьшения $n_{ж}$ и $\langle f \rangle$. Кроме того, электронно-ионной бомбардировкой разрушается как поверхностный слой (уменьшение $n_{ж}$), так и пограничный слой (уменьшается p). В результате уменьшается диффузионное сопротивление пограничного слоя. Как следствие, уменьшается число соударений выходящей из жидкости молекулы с молекулами пограничного слоя, что эквивалентно уменьшению величины $\langle f \rangle$ в (10). Часть молекул водяного пара конденсируется на ионах объемного заряда, образуя заряженные микрокапельки. При этом также уменьшается концентрация молекул пара в пограничном слое (уменьшение p в (10)). За счет воздействия ЭВ с поверхности жидкости электрогазодинамическими потоками в пограничный слой и за его пределы выносятся заряженные капельки. Этому также способствует электронно-ионная бомбардировка поверхности жидкости. Заряд отдельной капельки пропорционален ее площади [8, 12] и средней плотности поверхностного заряда. В результате возникают кулоновские силы, которые способствуют интенсивному рассеиванию скопившемуся над поверхностью воды пара (уменьшение p в (10)). 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 [13], поскольку ионы, бомбардирующие поверхность раствора, имеют величины энергии, сравнимые с удельной теплотой испарения воды. Но затраты энергии на неравновесный процесс переноса заведомо должны быть больше термодинамической теплоты испарения. Столь высокие коэффициенты переноса в [13] объясняются переносом крупных кластеров, сформировавшихся в приповерхностном слое вокруг ионов, а состояние в этом слое воды иное, чем в исходной воде. Оно отличается прежде всего разорванной сеткой водородных связей под влиянием внедренных ионов, что уменьшает затраты энергии на перевод воды в газовую фазу. Вода является ассоциированной жидкостью. Электронно-ионная бомбардировка приводит к разрыву ассоциатов в поверхностном слое воды, что уменьшает работу выхода отдельных молекул из этого слоя. 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.

Уменьшение L в КР приводит к увеличению числа молекул, покидающих поверхностный слой жидкости. Действительно, согласно закону Больцмана число молекул в единице объема, которые имеют потенциальную энергию U , определяется равенством

$$n = n_0 \cdot e^{-U/kT}, \quad (12)$$

где n_0 – число молекул в единице объема, которые имеют нулевую (относительно U) энергию; k – постоянная Больцмана. Уравнение (12) можно применить к интересующему нас случаю равновесия жидкости с насыщенным паром. Средняя энергия молекулы, которая вылетела с жидкости, отличается от средней энергии молекулы в середине жидкости на величину $\mu L/N_A$, где μL – молярная теплота испарения; μ – молярная масса жидкости; N_A – число Авогадро. Величина $\mu L/N_A$ является собой энергию U , которая входит в формулу (12). Поэтому плотность молекул пара n_n определяется равенством

$$n_i = n_{ж} e^{-\frac{\mu L}{N_A kT}}, \quad (13)$$

где $n_{ж}$ – плотность молекул жидкости, потенциальную энергию которых можно положить равной нулю. Следовательно, чем меньше величина L в силу воздействий разрядных полей на жидкость, тем интенсивней идет процесс испарения, а следовательно, и процесс сушки. При точном рассмотрении равенства (13) нужно учесть, что величины L и $n_{ж}$ сами зависят от температуры.

В [14] 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 энергоэффективностью. В зависимости от силы тока и полярности элект-

тродов 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 энергоэффективность, строгая направленность и локальный характер действия плазмы КР на поверхность жидкости и пограничный слой делают КР исключительно удобным методом энергоподвода и средством ускорения сушки сильно увлажненных КПТ за счет изменения структуры воды и интенсификации внешнего энерго- и массообмена.

Из представленных на рисунке кривых видно, что при сушке с использованием КР общая продолжительность процесса уменьшается почти в три раза, а энергетические затраты – в среднем на 20%. Наиболее значимая интенсификация процесса наблюдается при испарении свободной жидкости и влаги макрокапилляров. Такую же степень 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 в коллоидных КПТ.

Проведенные опыты [1] 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 %. 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 служат также резкое сужение петли сорбционного гистерезиса и падение равновесных влагосодержаний КСК–2 и других образцов КПТ при снятии изотерм сорбции в КР [15]. В [9] 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. Применения 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 таковым образом высушиваемой бумаги 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 [16]. Причем вкусовые качества готового продукта оказались выше полученного при обыкновенной сушке. Использование ионизированного воздуха для созревания сыров позволило не только интенсифицировать процесс, но и повысить их пищевые показатели и улучшить санитарно–гигиенические условия производства [17].

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 [8, 14, 18, 19]. 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 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 доразрядном НЭП, неоднородная поляризация высушенной части твердого скелета КПТ. Это равносильно внедрению НЭП в микропоры КПТ, но с напряженностью в ϵ 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 сопровождаются возникновением внутреннего НЭП с градиентом в несколько кВ/м² и протеканием разрядного тока (частичные разряды). Это вызывает в образце электромиграцию жидкости и электродиффузию молекул пара в микрокапиллярах в зону испарения. Накопление ионов приводит также к запасанию энергии КПТ 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 микрокапилляров. Последнее приводит к интенсификации внутреннего массопереноса по механизму, описанному в НЭП [20]. 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 жидко-

сти до значений 10–12. При этом вводимая удельная мощность возрастает почти на два порядка. При разности потенциалов 8 кВ ток КР изменялся в процессе отдельного опыта от 0,4 до 0,1 мА.

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 и потерь энергии. Это и приводит к уменьшению величин L в КР для влагосодержаний всех состояний и форм связи влаги с КПП.

Увеличение мощности еще на порядок переводит КР в ИР. Этот вид характеризуется поднятием электролита [21] под игольчатыми электродами. С ростом электропроводности происходит увеличение высоты поднятия электролита для обеих полярностей. У поверхности воды не очень интенсивный ИР растекается и имеет вид фигур Лихтенберга. При визуальном наблюдении обнаружена неустойчивость поверхности жидкости не только под данным острием, но и в областях, прилегающих к нему. Видимо, в этом случае происходят деформации поверхности за счет эффекта стягивания жидкости в межэлектродное пространство при воздействии силы

$$f_1 = 0,5\varepsilon_0(\varepsilon_{ж} - \varepsilon_{п})E_{п} E_{ж}, \quad (14)$$

где $\varepsilon_{ж}$ – диэлектрическая проницаемость жидкости; $E_{п}$ – 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 с поверхностной плотностью $\sigma = 2\varepsilon_0\varepsilon E$, где $E = 0,5(E_{п} - E_{ж})$, что обуславливает дополнительное кулоновское взаимодействие заряженной жидкости в данном месте с тем или иным игольчатым электродом. Этому препятствуют гравитационные силы и силы поверхностного натяжения. Здесь развивается неустойчивость Тонкса–Френкеля, которая зависит от отношения величин электрических сил к гравитационным и поверхностным силам на свободной поверхности. Это приводит к возникновению капиллярных волн на поверхности тонкого слоя жидкости. На гребнях волн, как и на любом острие, концентрация поверхностного заряда может достигнуть критической величины. Когда наступит преобладание электрической силы над силами поверхностного натяжения и гравитации, происходит выброс высокодисперсных капелек.

При пробое промежутка наблюдается перебрасывание электролита на металлические игольчатые электроды. Видимо, гидратированные ионы соответствующего знака, под действием возрастающих с уменьшением расстояния к каждой игле кулоновских сил, вырываются из поверхностного слоя воды и устремляются с нарастающей скоростью к ним. При этом они вытягивают за собой за счет сил вязкого трения нити воды. На определенной высоте над поверхностью воды происходит разрывание нитей на отдельные капельки при развитии вдоль их разного рода неустойчивостей. Более интенсивные перебросы наблюдаются в случае положительной полярности игольчатых электродов.

С дальнейшим увеличением интенсивности ИР картину развития его можно представить согласно [22]. В межэлектродном промежутке образуется сравнительно узкий токопроводящий канал с высокой температурой ионизации. За счет выделения джоулевого 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 стягивание раствора в искровой канал. Ударная, а затем звуковые волны турбулизируют окружающую среду, вызывая в ней интенсивное движение масс воды и воздуха. В них возникают хаотические, в том числе и вихревые движения, интенсифицирующие испарение влаги и отвод пара с пограничного слоя.

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 электростатической индукции. При возникновении ЭП все 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 этот процесс заканчивается электрическим пробоем межэлектродного пространства. Между электродами возникает интенсивный ИР – это электрические импульсы, длительность которых не превышает 10^{-3} с. Через образовавшийся в определенный момент практически безинерционный канал сквозной проводимости, обладающий ничтожно малым омическим сопротивлением, система броском освобождает накопленную энергию. При этом

если игольчатый электрод – катод, то 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 жидкость сначала прогибается, а затем в данном месте резко поднимается, вызывая выбросы частиц воды. На подъем электролита влияют плотность электролита, вязкость и особенно силы поверхностного натяжения, зависящие от концентрации зарядов. Зарядение 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 – это электролит на металле, то необходимо принять во внимание, что любая поверхность твердого вещества (металлическая пластинка в кювете), даже после самой тщательной механической обработки, имеет множество выступов и впадин, по своим размерам namного порядков превосходящих диаметр иона [23]. Поэтому ЭП на поверхности плоского электрода неравномерно. На ней есть точки, где напряженность поля может достигнуть значения 10^{10} В/м, что является уже достаточным для вырывания электронов из выступов металлической поверхности. Дальнейшее повышение напряжения все более 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 резко снижают плотность поверхностного слоя воды. Скорость их всплытия резко интенсифицируется в НЭП. Лопаясь на поверхности, они выбрасывают водяной пар и выталкивают в пограничный шар частицы жидкости, которые уносятся интенсивно движущимися воздушными потоками. В пределах пограничного слоя, который является основным сопротивлением внешнему теплообмену, ЭП в условиях ИР является сильно неоднородным. Если учесть, что в пограничном слое имеется линейная зависимость диэлектрической проницаемости ϵ_n водяных паров от плотности и большая концентрация свободных ионов ρ_e , то согласно известному соотношению электрогидродинамики объемная сила

$$f = 0,5\epsilon_0(\epsilon_n - 1) \nabla E^2 + \rho_e E, \quad (15)$$

вызывает значительную электроконвекцию, с образованием микровихрей, разрушающих структуру пограничного слоя. Последние могут втягивать микрообъемы жидкости и при отрыве от поверхности жидкости уносить их.

Вылетающие из жидкости электроны гидратированные, но при соударениях с молекулами газа теряют свою гидратную оболочку. Отметим, что в [24] под воздействием сильно неоднородного ЭП ИР 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. Поверхностное натяжение оказывает влияние на форму образующегося электролитного “острия”, то есть на геометрию разрядного промежутка, а следовательно, и на напряжение ЭП. На ведущую роль свободных зарядов при перебросах жидкости указывает их незначительность в переменном поле ИР.

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 [7, 8, 25]. Это увеличивает скорость испарения воды тем больше, чем большая мощность вводится в электролит с ИР. Поэтому величина L при испарении покрывающей пленки воды существенно уменьшается по сравнению с сушкой в КР, а dW/dt образца также интенсивно увеличивается по сравнению с сушкой в доразрядном НЭП. Это происходит не столько за счет собственно процесса испарения, сколько в результате изменения структуры поверхностного слоя воды, электропереноса при перебросах жидкости на электроды и выноса частиц жидкости в газовую фазу. При этом не расходуется теплота фазового перехода. Положение горизонтального участка ЭС в ИР, отвечающего удалению свободной влаги, соответствует испарению ее без поля почти при 363 К, то есть на 60 К больше, чем это происходит на самом деле. В первом периоде при воздействии ИР испаряется не только свободная влага, влага капиллярного и стыкового состояний, но и частично влага микрокапилляров (влага капиллярной конденсации и полимолекулярная влага), что резко сокращает весь процесс сушки. Это происходит благодаря поднятию влаги этих видов к поверхности КПП и концен-

трированию ее под игольчатыми электродами. Значительное поднятие воды в макрокапиллярах обнаружено в [26, 27].

Из приведенных результатов следует, что решающее значение для интенсификации внешнего энерго- и массообмена в НЭП при электроконвективной сушке имеет ускорение процесса в первом периоде за счет КР и ИР. Здесь испаряется из сильно увлажненных КПП излишек 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 КПП с водой. С помощью КР, и в особенности ИР, при атмосферном давлении можно вводить любые мощности в свободную воду. Пока не испарится свободная влага, газовые разряды не приводят к существенным для практики производственных процессов электроэрозии, деформации и дробления сушеного тела, как в случае гигроскопических влагосодержаний.

При выключении ЭП запасенная в первом периоде электронно-ионной сушки энергия может использоваться и во втором ее периоде. В частности, может использоваться накопленная электрическая энергия (осевшие ионы на внешней и внутренней поверхностях КПП, создающие внутреннее НЭП с высоким ∇E и частичными разрядами) для десорбции адсорбированной влаги. Под действием высоких E ЭП в местах пониженной электрической прочности диэлектрических сред (воздушные включения между зёрнами адсорбента) возникают частичные разряды [28], которые представляют собой пробои газовых включений в виде микрозарядов. Во втором периоде (гигроскопические влагосодержания КПП), когда нежелательны электро- и тепловая эрозии поверхности сушеного тела и высокие темпы сушки, приводящие к его деформации, образованию трещин и вообще к модификации физических и химических свойств, целесообразно использовать доразрядное НЭП либо НЭП темного КР, интенсифицирующие в основном внутренний массоперенос в КПП. Если эрозия поверхности образца не является помехой для данного вида производства или, наоборот, желательна модификация поверхностных свойств КПП, то целесообразно использовать светлый КР или насыщенный ИР. В периоде падающей скорости, когда удаляется влага микрокапилляров и адсорбционно-связанная влага, работа отрыва одного моля воды без изменения состава определяется соотношением

$$E = - RT \ln \varphi, \quad (16)$$

где φ – относительное давление пара. Тогда скрытая теплота фазового перехода связанной влаги определяется из соотношения [29]:

$$L = L_0 + E, \quad (17)$$

здесь L_0 – теплота фазового перехода свободной влаги. Определяемая из изотерм сорбции величина L для гидрофильных тел на 10–50% больше от L_0 и поэтому, естественно, требует для своего удаления соответственно больших энергетических затрат, тем более когда нужно максимально ускорить этот процесс. В этом случае для быстрого ввода большой энергии нужно использовать интенсивный ИР.

Таким образом, целый ряд специфических факторов, ускоряющих внешний и внутренний энерго- и массоперенос, и в первую очередь, большая энергоэффективность, строгая пространственная направленность и сконцентрированный только на влажных участках, а не на всей поверхности сушеного КПП, то есть локальный характер действия плазмы КР, и в особенности ИР (такую минимальную площадь воздействия и степень концентрации энергии невозможно получить никакими другими способами [30]), делают эти газовые разряды исключительно удобным методом энергоподвода и средством ускорения сушки сильно увлажненных КПП. При этом скорость сушки в первом периоде возрастает в десятки раз, во втором – в несколько раз при минимальных затратах энергии в сравнении с тепловой сушкой. Это достигается за счет ЭВ, сопровождающего КР, и избирательного ввода за счет ИР в наиболее влажные участки большой плотности локальных потоков электрической энергии. Поэтому электронно-ионную сушку можно использовать как самостоятельный, экономически выгодный вид сушки [3]. Это соответствует [31], где приводятся результаты экспериментальных данных по сушке резаных яблок с использованием разрядных ЭП. При этом установлена перспективность использования таких полей, поскольку интенсифицируется процесс сушки при сохранении качества продукции и уменьшении общих тепловых затрат.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Панченко М.С.* Повышение эффективности процесса сушки при использовании неоднородных электрических и магнитных полей // *Электронная обработка материалов.* 1980. № 4. С. 42–47.
2. Сильные электрические поля в технологических процессах: (Электронно–ионная технология). Сб. статей. Вып. 3. / Под ред. акад. В. И. Попкова. М., Энергия, 1979.
3. *Лыков А. В.* Прогноз развития науки о сушке капиллярно–пористых коллоидных тел // *Инженерно – физический журнал.* 1970. Т.43. № 4. С. 609–616.
4. *Казанский В. М.* Удельные теплоты испарения влаги из дисперсных тел // *ДАН СССР.* 1962. Т. 146. № 4. С. 860–864.
5. *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.
6. *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.
7. *Гак Е.З.* Гидродинамические эффекты в водных средах в электрических и магнитных полях // *Инженерно – физический журнал.* 1982. Т.43, №1. С. 140 – 153.
8. *Болога М. К., Руденко В. М.* Об интенсификации испарения жидкости под воздействием электрического поля // *Электронная обработка материалов.* 1975. № 3. С. 37–40.
9. *Пурмал М. Я.* Сушка ионизированным воздухом без подвода тепла к высушиваемому материалу // *Электронная обработка материалов.* 1978. № 2. С. 45–47.
10. *Еремин Е. Н.* Элементы газовой электрохимии. М., Изд–во МГУ, 1961.
11. *Ревзин И. С.* Экспериментальное исследование влияния переменного электрического тока на поверхностное натяжения жидкостей // *Электронная обработка материалов.* 1975. № 3. С. 28–30.
12. *Мунгиев В.А.* Влияние электромагнитных полей на эффект «зависания» капель жидкости над ее поверхностью // *Журнал физической химии.* 1979. Т. 53. № 10. С. 2653–2654.
13. *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.
14. *Бабеня Л.А., Головейко А. Г., Новикова В. И.* Диагностика электрогазодинамических потоков слаботочного высоковольтного разряда // *Инженерно–физический журнал.* 1987. Т. 53. № 6. С. 961–966.
15. *Панченко М. С., Мосиевич А.С., Панасюк А.Л., Карпович И.Н.* Влияние электрических и магнитных полей на геометрию порового пространства и сорбционную емкость дисперсных тел // *Электронная обработка материалов.* 1976. № 6. С. 40–42.
16. *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.
17. *Наремский Н. К., Монтык П. М., Кирвас А. В., Тадулев Б. А., Никульча И. П.* Применение электронно–ионной обработки воздуха в камерах созревания твердых сыров // *Электронная обработка материалов.* 1977. № 4. С. 76–77.
18. *Бабеня Л.А., Головейко А. Г., Новикова В. И. и др.* Влияние электрических полей на кинетику фазовых переходов // *Инженерно–физический журнал.* 1986. Т. 50. № 5. С. 729–735.
19. *Панченко М.С., Панасюк А.Л., Карпович И. М., Кисельчук Н. Л.* Кинетика сушки капиллярно–пористого тела в электрическом поле // *Инженерно–физический журнал.* 1977. Т. 33. № 2. С. 356–357.
20. *Панасюк А. Л., Панченко М. С., Старов В. М., Чураев Н. В.* Влияние неоднородного электрического и магнитного поля на внутренний массоперенос в капиллярнопористых телах // *Инженерно–физический журнал.* 1978. Т. 35. № 1. С. 93–100.
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 // *Электронная обработка материалов.* 1971. № 2. С. 44–46.
23. *Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И.* Механизм прохождения электрического тока через электролит // *Электронная обработка материалов.* 1979, №1. С. 5 – 11.
24. *Дураджди В.Н.* Об электрическом импульсном разряде между металлическим и электролитным электродами // *Электронная обработка материалов.* 2001. № 3. С. 22–26.

25. Гросу Ф. П., Болога М. К. Электроконвективные явления и интенсификация теплообмена // Электронная обработка материалов. 1977. № 5. С. 51–62.
26. Болога М. К., Васильев Л. Л., Кожухарь И. А., Шкилев В. Д. Влияние электрического поля на характеристики тепловых труб // Инженерно – физический журнал. Т. 36. № 6. С. 1126–1137.
27. Полищук Н. В., Панченко И. М., Панченко М. С. Эффекты воздействия и последствия электрических полей на поднятие воды в макрокапиллярах // Электронная обработка материалов. 2002. № 4. С. 54–67.
28. Панченко М. С., Панченко И. М., Панасюк А. Л., Мосиевич А. С., Карнович И. М. Повышение эффективности работы промышленных адсорберов путем продления срока эксплуатации адсорбентов в электрическом поле // Электронная обработка материалов. 1995. № 1. С. 39–42.
29. Иванов Л. Д., Болога М. К., Громацкий В. В. Исследование периода падающей скорости сушки с учетом зависимости связи влаги с материалом в СВЧ поле // Электронная обработка материалов. 1989. № 3. С. 34–36.
30. Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И. Изыскание новых применений электричества // Электронная обработка материалов. 1977. № 5. С. 5–19.
31. Панченко М. С., Панасюк А. Л., Мосиевич А. С., Мороз Г. А. Использование барьерного разряда для энергоподвода при сушке резаных яблок // Электронная обработка материалов. 1989. № 3. С. 34–36.

Поступила 19.01.05

Summary

The energogrammes and velocity curves of silicagel KCK-2 sample drying in strong non-uniform electric fields, including the fields of crown and spark discharge are shown. Equation of drying process heat balance in the conditions of inner and external heat sources (electric heater and gas discharge) presence and the equation for specific heat evaporation of free and combined water determination are adduced. The mechanism of physical processes directed to decreasing of phase transition with isothermal drying of capillary porous sample in crown and spark discharge is offered. This process is confirmed by the experiment on the electrocalorimetric plant.
