

ИЗУЧЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОДОВ НА ТЕПЛОТДАЧУ В ПРОВОЛОЧНОМ ЭГД-ТЕПЛООБМЕННИКЕ

А.И. Жакин, А.Е. Кузько, П.А. Белов, А.Н. Лазарев

*Юго-Западный государственный университет,
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Россия, zhakin@mail.ru, kuzko@mail.ru*

Введение. Действие кулоновской силы на свободные заряды, введенные в жидкий диэлектрик, можно использовать для интенсификации теплообмена в слабопроводящих средах [1]. Например, числа Нуссельта по теоретическим оценкам и экспериментам можно увеличивать до пятнадцати раз [1–4]. Как показывают эксперименты, системы проволочных или сеточных электродов обладают по сравнению с игольчатыми большими расходными характеристиками [1, 2] и в них менее интенсивно происходит электрохимическое загрязнение. Эти системы электродов также позволяют легко реализовать важный для практики случай теплопереноса без подачи высоковольтного потенциала на термостатируемые поверхности. То есть разность потенциалов, создающую ЭГД-конвекцию, на термостатируемые поверхности можно не подавать, так как они электрически изолированы самой диэлектрической жидкостью от высоковольтной части, инициирующей электроконвективные течения. Подобные электродные системы изучались в работах [1–3]. В наших исследованиях используется другая рабочая жидкость (теплоноситель ПМС-50), а в установке на термостатируемые поверхности не подается потенциал. В работе применяются другие методики определения коэффициента усиления теплоотдачи и рассматриваются переходные процессы.

Описание установки. Принципиальная схема проволочного теплообменника и его фотография представлены на рис. 1. Корпус теплообменника изготовлен из органического стекла проводимостью $\sim 10^{-15}$ См·м⁻¹. Конвективная часть имеет форму прямоугольного параллелепипеда с размерами 45×40×24 мм³. Система электродов (сечение P на рис. 1) представляет собой двухсекционный проволочный ЭГД-насос [1, 2] с общим числом медных проволок 46, расположенных в шахматном порядке: 24 проволочки, покрытые слоем шеллака, имеют диаметр поперечного сечения 0,7 мм и 22 проволочки с открытой поверхностью и диаметром 0,9 мм. Расстояния между проволочками равны: $a = 2,5$ мм, $b = 4$ мм. Во избежание поверхностной проводимости по стенкам между местом крепления проволок сделаны вырезы 4 глубиной 1,5 мм, а также каналы 5 для прокачки рабочей жидкости. В качестве источника высокого напряжения использовался ИВН-50. Температуры T_1 , T_2 горизонтальных термостатируемых медных пластин определялись термопарами 3, которые предварительно были проверены на сходство показаний. Для обеспечения лучшего теплового контакта спая термопар с поверхностью пластин термопары помещались в припаянные к пластинам половинки трубочек, заполненные кремнийорганической теплопроводящей пастой. Регулируемый подогрев одной из пластин производился нагревателем в виде спирали 2 с большим удельным сопротивлением, находящейся в пазах керамической пластины по всей площади и питаемым от источника регулируемого напряжения – ИПР. Электрически от медной пластины спираль была изолирована слюдяной пластиной 6, которая к тому же обеспечивала равномерный нагрев поверхности медной пластины.

Методика измерения. Перед измерением теплообменник промывался дистиллированной водой в ультразвуковой ванне, а затем сушился в сушильном шкафу. В качестве рабочей жидкости использовалась кремнийорганическая жидкость ПМС-50 (полиметилсилаксановая жидкость со степенью полимеризации 50). Выбор кремнийорганической жидкости обусловлен тем, что благодаря большей электроотрицательности кремния молекулы жидкости обладают большей химической, термоокислительной (150–300⁰С) и тепловой (240–350⁰С) устойчивостью по сравнению с обычными углеводородными маслами, что и позволяет широко использовать такие жидкости в качестве теплоносителей. Кроме этого, данные жидкости слабо подвержены старению, имеют однофракционный состав по сравнению, например, с трансформаторным маслом, что позволяет им иметь более стабильные физические параметры (относительно мало изменяют свою вязкость с изменением температуры), а также они гидрофобны, безвредны и имеют высокую диэлектрическую проницаемость. Выбирая

степень полимеризации, а также виды радикалов, связанных с атомами Si, можно подбирать жидкости по требуемым характеристикам. Данные качества и определяют возможности использования кремнийорганических жидкостей в термостатирующих устройствах. Жидкость ПМС-50 по ГОСТу 13032 77 (паспорт № 1597) содержит небольшое количество воды – 0,003% (по массовой доле), достаточно небольшую для ЭГД-течений кинематическую вязкость – 55 сСт (при 20⁰С) и температуру кипения – свыше 250⁰С.

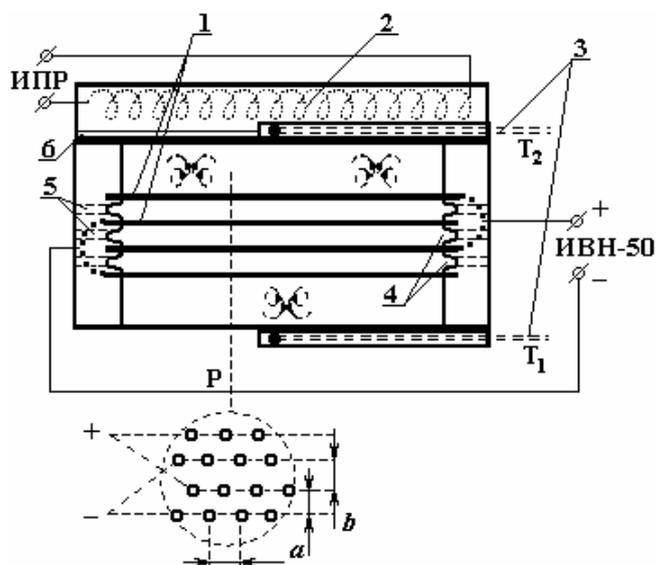


Рис. 1. Проволочный электроконвективный теплообменник: 1 – проволочные электроды, 2 – спираль нагревателя, 3 – выходы термопар, 4 – межэлектродные вырезы, 5 – каналы для прокачки жидкости, 6 – слюдяная пластина

Так как внутренняя часть теплообменника имела разветвлённое строение, то во избежание образования пузырьков воздуха заполнение рабочей жидкостью производилось при помощи предварительной откачки воздуха из теплообменника и последующим медленным заполнением жидкостью разреженного объёма устройства. Для ослабления влияния естественных гравитационных конвективных тепловых потоков, определяемых разностью плотностей нагретой и холодной жидкости, на электроконвекцию осуществлялся подогрев верхней пластины. Что может наглядно показывать эффективность ЭГД-теплообмена в условиях невесомости.

После прогрева верхней пластины до 80⁰С, что происходило за короткое время порядка 0,5–1 минуты, на электроды подавалось высокое напряжение. Этот момент прогрева верхней медной пластины и пристеночного слоя жидкости принимался за начало отсчета времени. Далее температура верхней пластины подачей регулируемого напряжения поддерживалась постоянной. После установления стационарного режима, когда температура нижней пластины переставала меняться (в эксперименте соответствующий момент считался 23,5 минуты), прекращался нагрев нижней пластины.

Для точной регистрации температур по времени производилась одновременная съёмка показаний приборов, регистрирующих токи термопар и цифрового секундомера с последующей обработкой на ЭВМ.

Результаты. На рис. 2 представлены сравнительные температурные зависимости от времени для верхней и нижней пластин с включенным высоковольтным электрическим полем и без него. Начальные условия были одинаковы: состояние теплового равновесия с окружающей средой. Точность определения температуры равна 1°C . При отсутствии электроконвекции в стационарном состоянии теплопередача нижней пластине осуществлялась преимущественно за счёт теплопроводности жидкого диэлектрика, определяемой диффузией его молекул. Для выхода на стационарный режим (на прогрев жидкости и теплообменника) требовалось порядка 23–25 минут, при этом температура нижней пластины увеличилась меньше чем на 5°C . Сделаем несложный расчёт эффективности теплоотдачи при электроконвекции для установившегося состояния в пренебрежении тепловым излучением стенок и их влиянием на однородность распределения температур пластин. Взяв во внимание также малость теплоотдачи стенками теплообменника воздушной среде (из-за малой теплопроводности воздуха и отсутствия развитой воздушной конвекции) и посчитав медные пластины тонкими (падение температуры на толщине пластин отсутствует, что оправдано небольшими температурными напорами в данных условиях и большой теплопроводностью меди), для удельного теплового потока, получаемого нижней пластиной, с учётом теплового излучения обеих пластин и их одинаковости, получим

$$q_0 = \frac{\lambda}{h} (T_2 - T_1) = a_T \sigma (T_1^4 - T_0^4) + a_T \sigma (T_2^4 - T_0^4) = \alpha_0 (T_2 - T_1), \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности жидкости, h – расстояние между пластинами, T_0 , T_1 и T_2 – температуры среды, нижней и верхней пластин соответственно, a_T – коэффициент теплового излучения обеих пластин, σ – постоянная Стефана-Больцмана, α_0 – коэффициент теплоотдачи жидкостью между пластинами.

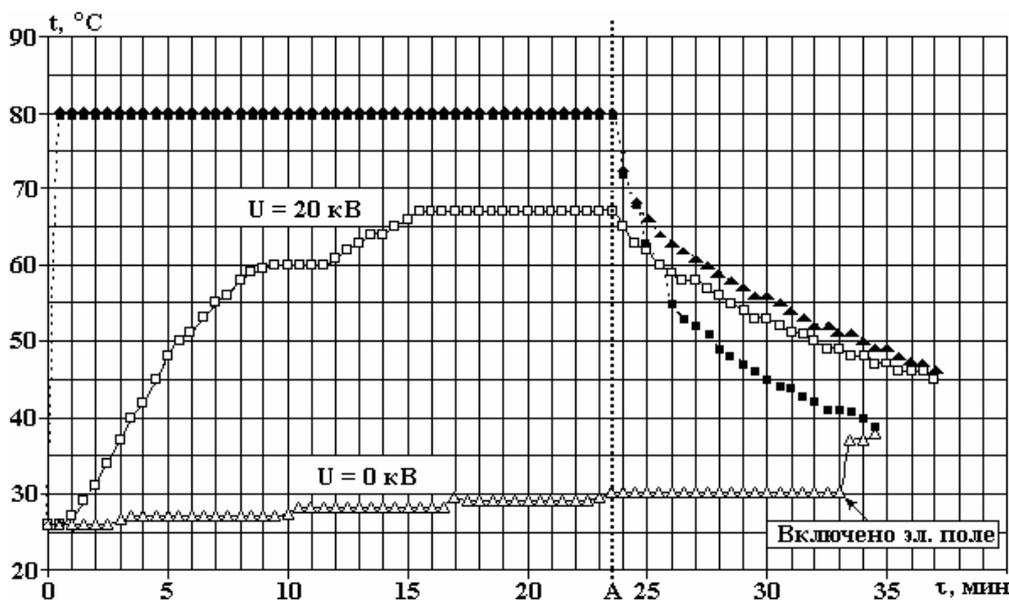


Рис. 2. Сравнительные зависимости температур верхней (тёмные точки) и нижней пластин (светлые точки) теплообменника от времени в электроконвективном режиме и без него. Линия A соответствует отключению нагрева

В электроконвективном режиме при поддержании $T_2 = 80^{\circ}\text{C}$ выход на стационарный режим занимал порядка 15 минут, но отбор тепла интенсифицировался и температура нижней пластины увеличилась на 40°C . Как и следовало ожидать, после отключения нагрева и при оставленном напряжении 20 кВ, как видно из графика, температуры верхней и нижней пластины быстро выравниваются за счёт ЭГД-конвекции. При этом обе температуры уменьшаются вследствие теплопередачи окружающей среде за счёт увеличенного в данном случае температурного напора. По-другому ведут себя графики при напряжении $U = 0$ кВ: температура нижней пластины не меняется до тех пор, пока не подаётся высокое напряжение и быстро сравнивается с температурой верхней пластины при подаче напряжения.

Для удельного теплового потока в случае электроконвекции, при сохранении всех принятых упрощений и в предположении, что коэффициент a_T и температура T_0 остаются постоянными, имеем

$$q_E = a_T \sigma (T_*^4 - T_0^4) + a_T \sigma (T_2^4 - T_0^4) = \alpha_E (T_2 - T_*), \quad (2)$$

где T_* – установившаяся температура нижней пластины, α_E – электроконвективный коэффициент теплоотдачи жидкостью между пластинами.

Для усиления электрическим полем коэффициента теплоотдачи из (1) и (2) получаем

$$\frac{\alpha_E}{\alpha_0} = \frac{(T_2 - T_1)}{(T_2 - T_*)} \cdot \frac{(T_*^4 + T_2^4 - 2T_0^4)}{(T_1^4 + T_2^4 - 2T_0^4)}. \quad (3)$$

Расчёт по данному выражению даёт значение усиления $\alpha_E/\alpha_0 \approx 6$. В отсутствие внешней и внутренней гравитационной конвекции в условиях невесомости электроконвективное усиление теплообмена следует ожидать ещё более эффективным.

Зависимости температуры от времени при различных подаваемых высоковольтных напряжениях представлены на рис. 3. Температура верхней пластины поддерживалась во всех случаях постоянной. Зависимость при $U = 10$ кВ отличается тем, что после отключения нагрева ещё около 5 минут увеличивается температура нижней пластины, а начиная с момента 32 минуты температура нижней пластины оказывается больше. Это можно объяснить тем, что при соответствующей температуре нижней пластины перенос тепла жидкостью к нижней пластине за счёт электроконвекции оказывается немногим больше, чем его отток за счёт теплопередачи окружающей среде самой пластиной.

Оценка отношения α_E/α по выражению (3) (в пренебрежении теплопередачей воздуху) для установившихся режимов зависимостей рис. 3 даёт график, представленный на рис. 4. Вид зависимости коррелирует с полученными авторами [1, 2] аналогичными зависимостями в случае, когда термостабилизация происходила непосредственно высоковольтных плоских электродов.

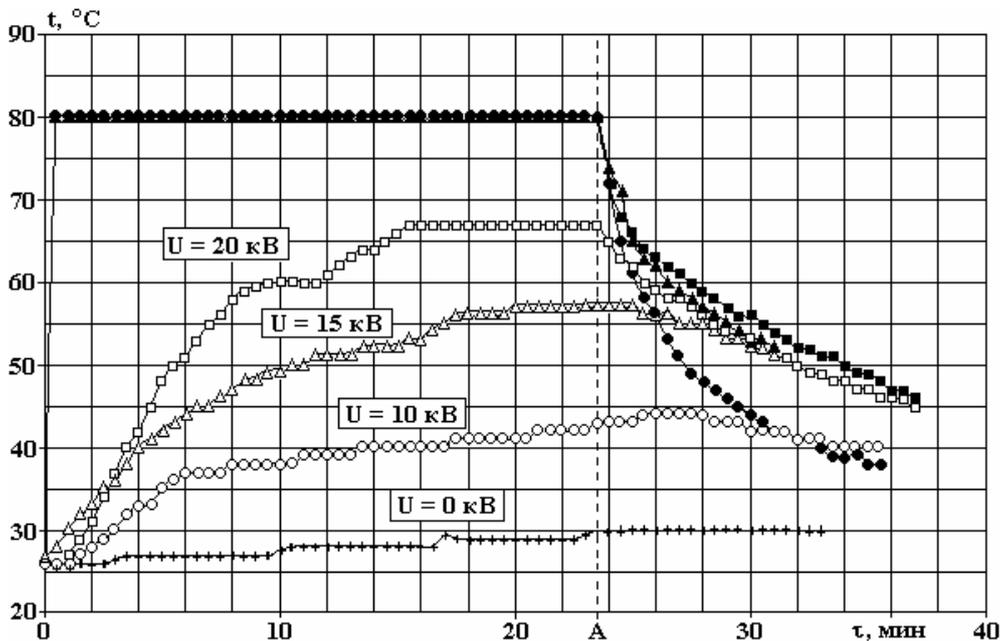


Рис. 3. Зависимости температур верхней (тёмные точки) и нижней пластин (светлые точки) теплообменника от времени. (Тёмные и светлые точки одной формы соответствуют одному и тому же напряжению. Линия А – отключению нагрева)

Однако стабильному эффективному теплообмену в рассматриваемом проволочном теплообменнике препятствует ряд причин. Во-первых, в чистой ПМС жидкости возникает инжекция с электродов обеих полярностей. Когда на тонкие проволочки, покрытые лаком, подавался отрицательный потенциал, напряжение без пробоев можно было увеличивать до 24 кВ и больше, если жидкость прошла электроочистку. Если катодом являлись проволочки с открытой поверхностью меди, то без пробоя можно с трудом подать 10 кВ. Эффективность теплоотдачи при этом падает (см. рис. 5,а). Объяснение этому можно дать, если считать, что в первом случае происходила инжекция зарядов и с катода (проволочек, покрытых лаком) и с анода, но преобладала с катода, так как визуально были

видны течения вверх, а также об этом свидетельствовал лучший отбор тепла от верхней пластины, где образовывались более тонкие пограничные слои. Во втором случае при смене полярности инжекция отрицательных зарядов была значительно интенсивнее с непокрытых лаком проволочек и при повышении напряжения больше 10 кВ происходил пробой. Теплообмен при этом ухудшался (рис. 5,а), так как проводимость жидкости превышала благоприятную для конвекции.

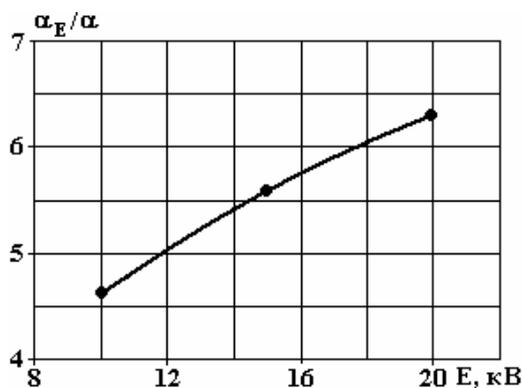


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления теплоотдачи электрическим полем от напряжённости высоковольтного поля для проволочного теплообменника с вынесенными за область электроконвекции термостатируемыми пластинами

При длительной электроконвекции её интенсивность убывает. Так, за 3 часа α_E/α убывает примерно наполовину (рис. 5,б). При этом на проволочках обнаруживаются адсорбированные слои в виде полимеризовавшихся молекул ПМС, которые и препятствуют конвекции.

Точный учёт всех процессов, происходящих в теплообменнике, вызывает значительные трудности, так в электрогидродинамическом расчёте турбулентных течений, в достаточно сложной геометрии данного теплообменника, неизбежно возникают трудности определения интенсивностей зарядообразования на электродах, то есть задача задания инжекционных функций. Сюда можно отнести трудности учёта образовавшихся двойных электрических слоёв на поверхностях электродов и электрохимического загрязнения жидкости. А расчёт опять-таки турбулентных тепловых потоков должен сопровождаться учётом потерь на тепловое излучение и теплопередачу окружающей среде, зависящих от материала и формы теплообменника. Как показывают рассмотренные эксперименты – это обстоятельство не маловажно.

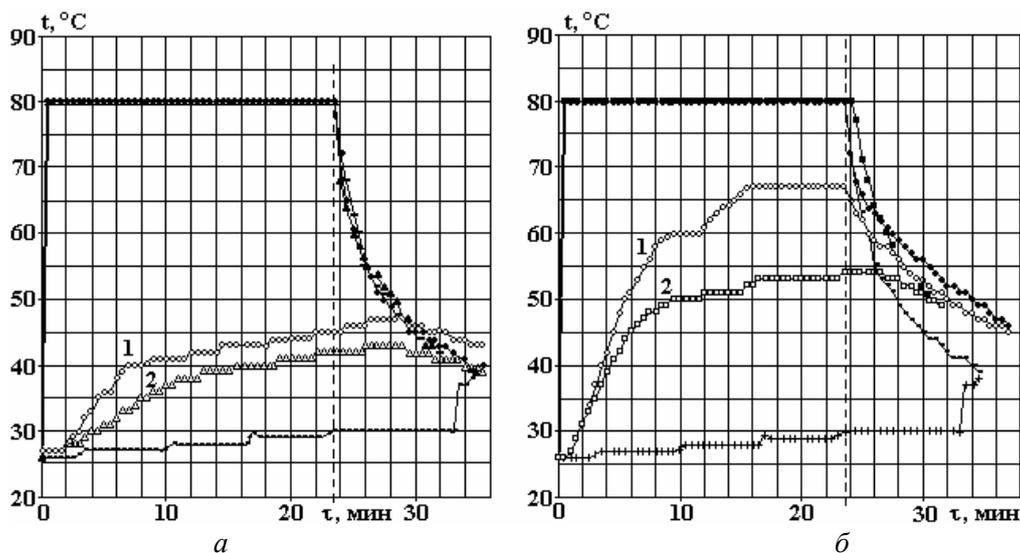


Рис. 5. Зависимости температур верхней (тёмные точки) и нижней пластин (светлые точки) теплообменника от времени: а) $U = 10$ кВ: 1 – тонкие проволочки ($d = 0,7$ мм) в качестве катода, 2 – анода; б) $U = 20$ кВ: 1 – первоначальные измерения, 2 – при образовании адсорбированного слоя на аноде после длительной электроконвекции (Тёмные и светлые точки одной формы соответствуют одному и тому же измерению. Линия А соответствует отключению нагрева)

Задание инъекционных функций, которыми в конечном счете определяется интенсивность электроконвекции, а следовательно, и эффективность ЭГД-теплообмена, играет важную роль. В большинстве теоретических работ уровни инъекции зарядов задаются в самом начале теоретических построений произвольно, и это создаёт известные трудности по вопросу экспериментальной проверки их адекватности. Естественно значение интенсивности зарядообразования на границе раздела электродов и диэлектрических жидкостей в электрических полях связать с микро- и наноструктурированными образованиями на поверхности электродов. За счёт известного эффекта усиления электрического поля

$$\beta = \frac{E}{E_0}, \quad (4)$$

где E – локальная напряжённость на выступающей части структуры, E_0 – средняя макроскопическая напряжённость в области выступающих частей наноструктур (кристаллитов, зёрён). Последние можно рассматривать в качестве центров зарядообразования. А плотность их расположения и форма определяют инъекционные функции. Созвучно этим исследованиям вопросы усиления электрического поля на границе жидкий диэлектрик–металл остаются весьма актуальными. Реальная неподготовленная поверхность электродов вызовет затруднения в оценке зарядообразования. Однако достаточно простые подготовительные действия уже позволяют сделать некоторые оценки. На рис. 6 показаны топологии поверхности меди после полировки до 20 нм. Естественно считать, что в данном случае коэффициент усиления электрического поля пропорционален аналогу аспектного отношения h/d , где h в нашем случае естественно считать средней высотой наноструктур, а d – их средним размером, которые могут определяться по изображениям топологии электродов. А создавая структуры на поверхности металла, например магнетронным напылением, методом импульсного пробоя и другими, можно контролировать уровни инъекции зарядов и, следовательно, процессы электроконвективного теплообмена.

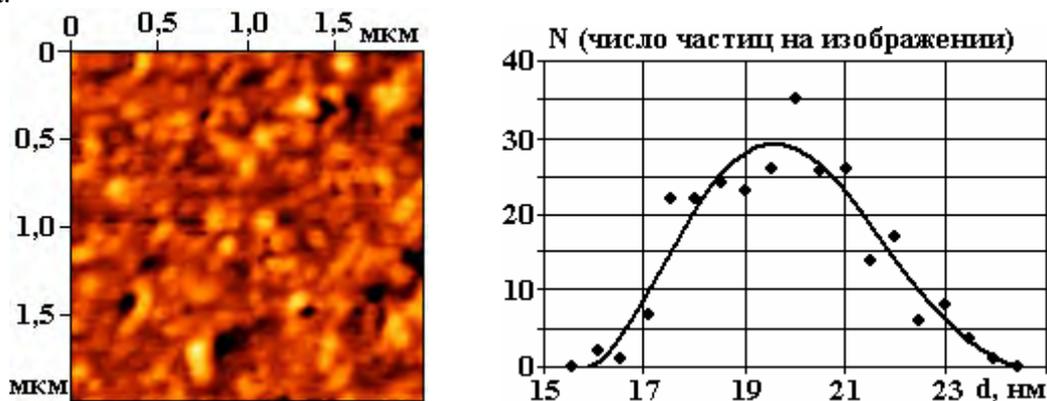


Рис. 6. Распределение наноструктур (кристаллитов) на поверхности меди по размерам (программа Gwyddion 2.9). Полиномиальная аппроксимационная кривая пятой степени построена в Excel

Заключение. Экспериментальное исследование электроконвективного теплообмена в системе проволочных электродов с выносом термостатируемых пластин за пределы рабочего электрического поля в условиях ослабляющих гравитационную конвекцию на полиметилсилаксановой жидкости показало, что теплообмен усиливается электрическим полем примерно в 6 раз. По атомно-силовым изображениям наноструктур на поверхностях электродов и определению их геометрии и размеров можно оценить количество инъекционных центров и степень усиления ими локального электрического поля, что позволяет прогнозировать интенсивность электроконвекции.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы (ГК П913).

ЛИТЕРАТУРА

1. Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. *Электроконвекция и теплообмен*. Кишинев: Штиинца, 1977. с. 320.

2. Bologna M.K., Kojevnicov I.V., Kozhuhari I.A. Multistage electrohydrodynamical pump. *Annual Report of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. 2000, **1**, 57–60.
3. Bologna M.K., Kozhevnikov I.V., Mardarskii O.I. The effect of an electric field on plane wall cooling. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2009, **45**(1), 13–15.
4. Жакин А.И., Лунёв С.А., Кузько А.Е. Исследование ЭГД-теплообмена в системе вложенных лезвий. *Сб. докладов VIII Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей»*. Санкт–Петербург, 2006. С. 280–283.

Поступила 21.10.10

Summary

The experimental research results of EHD heat exchanger between plane surface are presented. The electrodes are system of wirers. The heat planes are neutral. The working liquid is PMS-50. On the basis of experimental data the electrical enhancing coefficient is calculated.
