

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Казанский государственный технологический университет»

Андреев И.Н., Межевич Ж.В., Зотеев К.А.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА
ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ
И НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПОДВЕСОЧНОЙ ОСНАСТКИ**

Учебное пособие

Казань 2006

УДК 541.13(076.5)

Моделирование распределения тока при электрохимической обработке и нанесении покрытий с использованием подвесочной оснастки: Учебное пособие/ И.Н. Андреев, Ж.В. Межевич, К.А. Зотеев; Казан. гос. технол. ун-т. Казань, 2006. 00с.

ISBN 0-0000-0000-8

Пособие знакомит с приемами экспериментального исследования и моделированием распределения тока на обрабатываемых поверхностях с применением экранов, биполярных электродов и дополнительных анодов. Дано описание лабораторных работ специального раздела практикума по дисциплине «Основы теории и практики электроосаждения металлов и сплавов» с использованием опыта преподавания этого курса на кафедре ТЭП КГТУ. Выполнение работ сопровождается построением ПД-портретов моделирующих электролизеров с использованием графопостроителя пакета *Excel*. Приведены также расчетные задания для самостоятельной работы студентов по решению задач распределения тока в электрохимических объектах с использованием пакета программ *Cell-Design*.

Предназначено для студентов химико-технологических специальностей вузов.

Подготовлено на кафедре технологии электрохимических производств

Печатается по решению редакционно-издательского совета Казанского государственного технологического университета.

ISBN 0-0000-0000-8

Рецензенты: проф. Ахметов Т.Г.,
проф. Сайфуллин Р.С.

Электронная версия пособия доступна по адресу:
<http://andreevin.narod.ru/>

© Андреев И.Н., Межевич Ж.В., Зотеев К.А.

© Казанский государственный технологический университет,

2006

Введение

Толщина металлического покрытия h , получаемого в результате гальванической операции, является важным показателем качества готового изделия. Она определяется значением локальной плотности тока j по формуле:

$$h = j q T \alpha / d \quad (1)$$

(здесь: q – электрохимический эквивалент, T – продолжительность процесса электроосаждения, α – выход металла по току, d – плотность металла) и по этой причине оказывается величиной распределенной по поверхности обрабатываемых деталей, так как электрическое поле у поверхности покрываемых деталей обычно неоднородно вследствие сложности геометрии покрываемых деталей. При использовании подвесочной оснастки покрываемые детали имеют фиксированное положение в гальванической ванне, и это положение определяет количество электричества, приходящееся в процессе электролиза на каждую деталь и каждый элемент ее поверхности, так как электрическое поле за промежуток времени, в течение которого проводится операция, мало изменяется. При использовании для нанесения покрытий бесподвесочной технологической оснастки, при применении которой детали загружают в приспособление (барабаны, колокола, сетки-качалки и т.п. устройства) насыпью, в процессе электролиза детали внутри гальванической ванны перемещаются в некотором пространстве, ограниченном стенками этого приспособления. В этом состоит существенное различие «подвесочных» и «бесподвесочных» операций нанесения покрытий, так как во втором случае количество электричества, приходящееся на каждую деталь за время операции, практически не зависит от ее первоначального положения в пространстве ванны, а определяется условиями перемешивания.

При оценке параметров электрохимических процессов формирования покрытий в гальванических ваннах могут применяться численные методы интегрирования краевой задачи для потенциала в области между электродами. Однако компьютерные специализированные пакеты прикладных программ

для численного расчета вторичного распределения плотности тока на трехмерных электродах пока малодоступны, что затрудняет определение электрохимических параметров процессов покрытий с использованием подвесок.

Рассмотрим общую постановку задачи, используемой для оценки параметров распределения тока на поверхности деталей при применении подвесочной оснастки. Расчетная схема наиболее распространенного в гальванотехнике электрохимического объекта - гальванической ванны с симметрично расположенными катодом и анодами приведена на рис. 1.

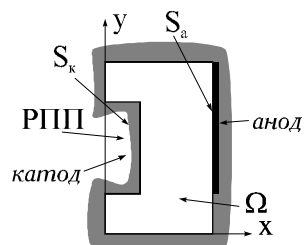


Рис. 1 Схема области интегрирования и ее границ для двухэлектродной ванны с подвеской и анодной корзиной. Обозначения имеют смысл: S_a, S_k - поверхности электродов, Ω - область интегрирования, РПП - рабочее поле подвески

На рисунке изображен только один анод, так как предполагается, что сечение ванны симметрично относительно оси y . Расчеты распределения тока на электродах двухэлектродной ванны для получения электрохимических металлопокрытий можно проводить на основе решения следующей нелинейной краевой задачи:

$$\Delta E = \frac{\int^2 E}{\int x^2} + \frac{\int^2 E}{\int y^2} = 0 \quad (2)$$

$$E + h_k \left(\frac{1}{r} \frac{\int E}{\int n} \right) \Big|_{S_k} = U_k \quad (3)$$

$$E - h_a \left(\frac{1}{r} \frac{\int E}{\int n} \right) \Big|_{S_a} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\nabla E}{r \nabla n} \Big|_{S_n} = 0 \quad (5)$$

Здесь Δ - оператор Лапласа для функции $E, (x,y)$ $\hat{I} W, S_a, S_k$ - поверхности анода и катода; h_a, h_k - анодная и катодная поляризация, ρ - удельное сопротивление электролита; n - направление внешней нормали к электродной поверхности, U_k - клеммовое напряжение электролитической ванны; S_u - поверхности стенок ванны и зеркала электролита. Приведенная система уравнений может быть дополнена выражениями, определяющими распределение тока на каждом из электродов и суммарные токи через каждый электрод. Последнее выражение используется в процессе решения в качестве средства контроля сходимости процесса интегрирования:

$$\frac{1}{r} \frac{\nabla E}{\nabla n} \Big|_{S_a} = j_a(x, y); \quad (6)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\nabla E}{\nabla n} \Big|_{S_k} = j_k(x, y); \quad (7)$$

$$\int_{S_a} j_a(x, y) \cdot dS_a = \int_{S_k} j_k(x, y) \cdot dS_k = I \quad (8)$$

В зависимости от особенностей решаемой задачи общая схема электрохимического объекта, приведенная на рис.1, может быть модифицирована с учетом конкретной геометрии катода. В частности, результаты расчетов распределения потенциала (рис.2) или плотности тока (рис.3) на поверхности катодных подвесок и анодных корзин, выполненных для разных вариантов гальванических ванн, могут использоваться при выборе оборудования для проектируемого промышленного объекта.

Для оценки степени неравномерности распределения тока на поляризованной поверхности применяют отношения экстремальных значений плотности тока на покрываемой поверхности: $K_k = J_{min}/J_{сред}$ (критерий Каданера) [1] и $K_u = J_{max}/J_{min}$ (критерий Иванова) [2].

Эти критерии применяют при исследовании влияния различных факторов в процессе электроосаждения, влияющих на равномерность распределения тока по поверхности катода. При этом влияние каждого фактора на равномерность распределения тока оценивают степенью изменения критерия. Например, показатель рассеивающей способности электролитов, измеренный с помощью ячейки с разноудаленными плоскопараллельными электродами, представляет собой отношение

$$T = \frac{K_u^1 - K_u^2}{K_u^1} 100, \% , \quad (9)$$

построенное с использованием критерия Иванова K_u^1 и K_u^2 , определенного для двух условий: в отсутствие поляризации катода и при ее учете, то есть применительно к первичному и вторичному распределениям тока.

Выражения, аналогичные (9), можно также применить при исследовании эффективности приспособлений, используемых для повышения равномерности покрытий:

$$\mathcal{E}_{np} = \frac{K_u^1 - K_u^2}{K_u^1} 100, \% . \quad (10)$$

В этом случае выражения критерия Иванова K_u^1 и K_u^2 представляют собой отношения экстремальных значений плотности тока на поверхности, соответственно, в исходной ситуации и при применении приспособления, предназначенного для улучшения равномерности распределения тока. Так можно оценить эффективность использования проводящего и непроводящего экранов, биполярного электрода и дополнительных анодов, являющихся элементами подвесочных устройств, предназначенных для этой цели. Если для моделирования таких устройств используется ячейка с разноудаленными плоскопараллельными электродами, значения критерия Иванова K_u^1 и K_u^2 находят как отношение токов на разноудаленных катодах ячейки - J_b и J_d .

Рассчитанные значения плотности тока на поверхности катода могут быть использованы для расчета среднего значения толщины покрытия на деталях, одновременно покрываемых на подвеске (или в бесподвесочном приспособлении) по формуле:

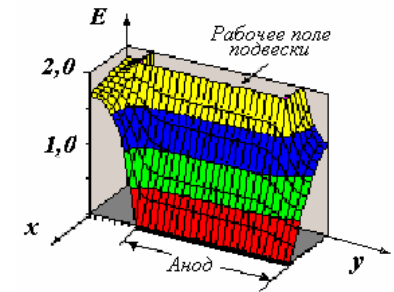
$$h_{av} = \frac{1}{N_1} \cdot \sum_i h_i \quad (11)$$

Это значение можно использовать для комплексной оценки технологической точности операции с использованием выражения:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i (h_i - h_{av})^2}{(N_1 - 1)}}, \quad (12)$$

где σ - мера технологической точности; N - число деталей в обрабатываемой партии (или на подвеске, в барабане).

Рис.2. Распределение значений потенциала E в пространстве между поверхностью анодной корзины и границей рабочего поля подвески (расчет выполнен для рабочей ванны автоматической линии многослойных покрытий глубиной 1500 мм, с межцентровым расстоянием 300 мм при клеммовом напряжении 2 В, уд. сопротивлении электролита 5 Ом.см)



В приведенных выражениях (3) и (4) фигурирует поляризация электродов, которая, вместе с проводимостью электролита, определяет параметр процесса, который принято называть рассеивающей способностью электролита (процедура количественной оценки этой величины регламентируется ГОСТ 9.309-86). Этот параметр при выбранной геометрии покрываемых деталей определяет распределение тока. В тех нередких случаях, когда рассеивающая способность не обеспечивает требуемой

степени равномерности покрытий, прибегают к дополнительным средствам, позволяющим регулировать параметры распределения плотности тока на покрываемой поверхности. Среди таких средств наибольшее распространение имеют экраны (проводящий и непроводящий), а также биполярный электрод и дополнительный анод. Предлагаемое вниманию читателя пособие состоит из двух частей. Первая часть посвящена моделированию распределения тока в гальванических ваннах с помощью ячейки с разноудаленными плоско-параллельными электродами, а во второй части описаны упражнения по компьютерному моделированию распределения тока на электродах в разнообразных ячейках.

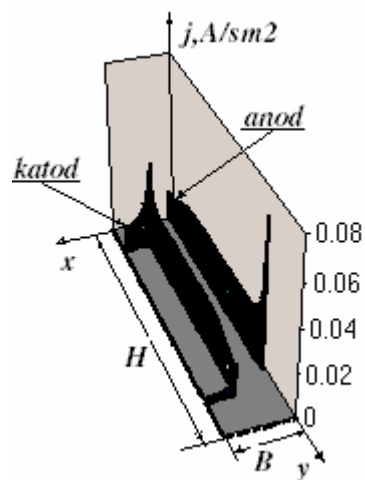


Рис.3. Распределение значений плотности тока (A/cm^2) на поверхности анодной корзины и на границе рабочего поля подвески (расчет выполнен для рабочей ванны автоматической линии многослойных покрытий глубиной $H=1500$ мм, с межцентровым расстоянием $B=300$ мм при клеммовом напряжении 2 В, уд. сопротивлении электролита 5 Ом.см)

Первая часть пособия содержит краткое описание лабораторных работ, которые позволяют познакомиться с приемами исследования при оценке равномерности распределения тока на катодной поверхности на основе физического моделирования с использованием ячейки с разноудаленными плоскопараллельными электродами (работа 1), а также с принципами регулирования распределения тока на поверхности профилированного катода с помощью экранов (работа 2), биполярного электрода и

дополнительного анода (работы 3 и 4). В этих работах также в качестве средства моделирования распределения тока и его корректирования использованы разные варианты ячейки с разноудаленными плоскопараллельными электродами. Применяемые в ходе выполнения работ лабораторные модели позволяют непосредственно наблюдать влияние на распределение тока на отдельных катодах проводящего и непроводящего экранов, а также электрохимических реакций на биполярном электроде и дополнительном аноде. С помощью предлагаемых схем измерений также можно исследовать влияние переменных факторов на электрические характеристики моделирующих электролизеров, что позволяет определять «цену» повышения равномерности распределения тока на катодной поверхности, которая выражается в повышении расхода электроэнергии, например, вследствие увеличения общего сопротивления электролизера в случае использования непроводящего экрана. При ознакомлении со средствами регулирования равномерности распределения тока на лабораторных моделях в этой части пособия предложено применять в качестве инструмента поляризационные диаграммы, облегчающие понимание принципов «работы» этих средств.

Вторая часть пособия рассчитана на использование пакета программ **Cell-Design** для моделирования двумерных электрохимических ячеек с произвольными границами. В этой части пособия содержится краткое описание учебных упражнений, которые позволяют познакомиться с приемами работы с пакетом **Cell-Design** при оценке равномерности распределения тока на внешних границах рабочего поля подвесок в гальванических ваннах разных типов (работа 5), при выборе параметров размещения деталей на подвесках внутри рабочего поля (работа 6), при выборе параметров средств оптимизации распределения тока (работа 7). В этой части работы приведены также задания, позволяющие познакомиться с приемами использования пакета при расчете распределения тока на индикаторных электродах ячеек сравнения (работа 8) и на электродах ячеек, которые использовали разные авторы при

изучении проблемы рассеивающей способности электролитов и равномерности покрытий (работа 9). В работе 10 студент соприкоснется с темой, связанной с метрологическими характеристиками мерных датчиков, предназначенных для измерения плотности тока в работающих гальванических ваннах. В приложении 1 дано краткое руководство по использованию опций пакета **Cell-Design** при выполнении заданий практикума, а приложение 2, подготовленное доц. Валеевым Н.Н., облегчит работу студента при планировании экспериментов и решении оптимизационных задач.

Литература:

1. Каданер Л.И. *Равномерность гальванических покрытий.* - Харьков.: Изд-во Харьков.гос. ун-та, 1960. - 414 с.

2. Иванов В.Т. *Расчеты электрических полей в многоэлектродных электрохимических системах с биполярными электродами.* // *Электрохимия.* - 1974. - Т.10, № 11. - С. 1657 - 1662.

3. Иванов В.Т., Гусев В.Г., Фокин А.Н. *Оптимизация электрических полей, контроль и автоматизация гальванообработки.* // М.: Машиностроение. М. - 1986. - 216 с.

4. Андреев И.Н. *Технологическая оснастка для гальванических линий (подвески, анодные корзины и погружные электрохимические модули)* Казань, Изд. Казан. гос. технолог. ун-та. 2006.

Часть 1

Работа 1. Моделирование распределения тока на катоде с использованием ячейки с разноудаленными плоскопараллельными электродами

Цель работы – освоение методических приемов изучения влияния плотности тока на его распределение на электродах ячейки с разноудаленными плоскопараллельными электродами, измерений составляющих общего напряжения на элементах ячейки; ознакомление с влиянием природы электролитов и электродных процессов на показатели рассеивающей способности электролитов.

Для моделирования неравномерного распределения тока на катодной поверхности при оценке (измерении) рассеивающей способности электролитов применяют ячейки (электролизеры)

разнообразных конструкций [1]. Наиболее простой из них является прямоугольная ячейка, показанная на рис. 4, с тремя плоскопараллельными электродами - одним анодом и двумя разноудаленными катодами [2]. При использовании такой ячейки рассеивающую способность выражают через значения критерия Иванова K_u^1 и K_u^2 , определенные для первичного (без учета влияния поляризации) и вторичного (с учетом поляризации электродов) распределений тока на «ближнем» и «дальнем» катодах:

$$T = \frac{K_u^1 - K_u^2}{K_u^1} 100, \% \quad (13)$$

где K_u^1 и K_u^2 - отношения экстремальных значений токов на катодах. K_u^1 и K_u^2 рассчитываются по формулам: $K_u^1 = R_\delta / R_\sigma = l_\delta / l_\sigma$, а $K_u^2 = J_{max} / J_{min} = J_\delta / J_\sigma$, где R_δ и R_σ - сопротивления электролита в «длинном» и «коротком» межэлектродных промежутках; l_δ и l_σ - протяженности «длинного» и «короткого» межэлектродных промежутков; J_δ и J_σ - токи на «ближнем» и «дальнем» катодах. Такая ячейка позволяет определять и поляризационный показатель рассеивающей способности электролитов, представляющий собой отношение катодной поляризуемости к удельному сопротивлению электролита (критерий Вагнера [3]):

$$R_j = \frac{dE}{dj} \cdot \frac{1}{r} \quad (14)$$

Здесь dE/dj представляет собой производную, определенную на поляризационной кривой в точке, соответствующей средней плотности тока. Эту величину заменяют наклоном секущей катодной поляризационной кривой, проведенной через точки на поляризационной кривой, соответствующие плотностям тока на ближнем и дальнем катодах. То есть производную dE/dj заменяют отношением $(E_\delta - E_\sigma) / (j_\delta - j_\sigma)$, в котором E_δ и E_σ - значения потенциалов на катодной поляризационной кривой при плотностях тока j_δ и j_σ , соответствующих ближнему и дальнему катодам.

Поляризационный показатель R_j применяют в расчетах с использованием критерия электрохимического подобия $\Theta = R_j / l_o$ (l_o - определяющий геометрический размер системы).

Для определения показателей рассеивающей способности по формулам (13) и (14) можно провести прямые измерения всех необходимых величин непосредственно на ячейке, используя схему, представленную на рис. 5, или выполнить расчеты тех же величин на основе эквивалентной электрической схемы ячейки, приведенной на рис.6. Во втором случае в качестве исходных данных, кроме размеров ячейки и электродов, применяют результаты поляризационных и кондуктометрических измерений для выбранных электролитов, так как номиналы сопротивлений, указанных на эквивалентной схеме, зависят от поляризации электродов и удельного сопротивления электролита ρ .

Методика выполнения работы

Эксперименты на моделирующей ячейке. В работе используют один из типов ячеек для моделирования неравномерного распределения тока при электроосаждении в гальванических ваннах. На схеме, приведенной на рис. 4, ячейка представляет собой прямоугольный сосуд из органического стекла, в котором размещены два одинаковых электрода 1б и 1д прямоугольной формы из стали или никелированные стальные пластины (при меднении в кислом электролите). Внутреннее пространство электролизера между плоскими электродами 1б и 1д разделяется на «короткий» и «длинный» межэлектродные промежутки с помощью анода, представляющего собой перфорированную цинковую, медную или никелевую пластину (в зависимости от процесса). При хромировании анодная пластина свинцовая. Электрическая схема экспериментальной установки состоит из двух цепей: поляризующей и измерительной. Поляризующую цепь собирают, используя в качестве источника питания потенциостат, работающий в гальваностатическом режиме. Вольтметр потенциостата предназначен для измерения напряжения на отдельных участках изучаемого электролизера с точностью до второго десятичного знака. Общий ток, измеряемый

амперметром, распределяется между ближним и дальним катодами. В качестве электрода сравнения в измерительной цепи используется хлорсеребряный стандартный электрод с потенциалом 0,201 В.

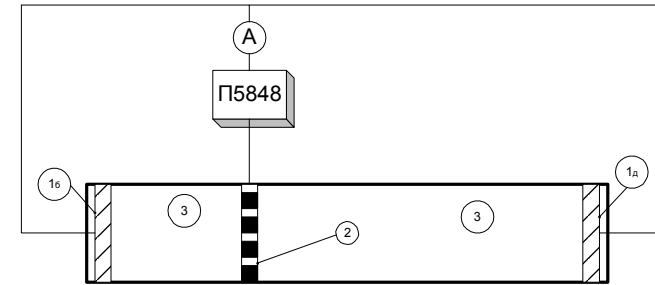


Рис.4. Схема включения в питающую цепь моделирующего электролизера с плоскопараллельными разноудаленными катодами (1б и 1а) и одним анодом (2); 3 – электролит в межэлектродных пространствах, А – амперметр, U - вольтметр для измерения клеммового напряжения, П5848- потенциостат

При измерении электродного потенциала капилляр электролитического ключа электрода сравнения должен быть плотно прижат к центру погруженной части электрода; для достижения стационарного значения потенциала требуется выдержка в течение 1-2 мин.

Данные, полученные в результате непосредственных замеров, заносят в таблицу, столбцы которой именуются в соответствии с обозначениями измеряемых величин на рис 5.

Используя таблицу экспериментальных данных, в пакете *Excel* получают поляризационные диаграммы (*ПД* - портреты) электролизера при моделировании процессов цинкования, меднения, никелирования и хромирования.

На рабочем листе *Excel* таблицу результатов непосредственных измерений на ячейке, которые используют для построения поляризационной диаграммы, дополняют расчетными величинами, которые позволяют провести анализ взаимосвязи

между компонентами общего напряжения электролизера и распределением тока между ближним и дальним катодами

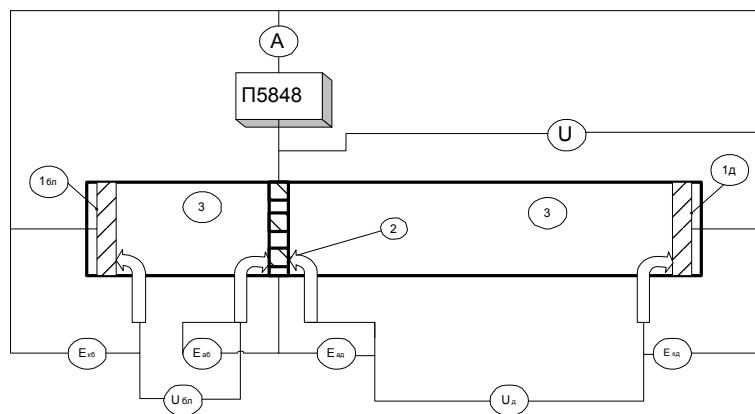


Рис.5. Схема моделирующего электролизера и включения его в питающую и измерительную цепи с одним анодом (2) и двумя катодами (1бл и 1д) в электрическую цепь с приборами для измерения тока и составляющих общего напряжения на ячейке; 3 – электролит в межэлектродных пространствах; А – амперметр, U - вольтметр для измерения клеммового напряжения, E_а и E_к - вольтметры для измерения потенциалов катода и анода; U_{бл} и U_д - вольтметры для измерения падения напряжения в электролите между анодом и ближним катодом, между анодом и дальним катодом соответственно; П5848 - потенциостат

Например, можно выделить столбцы со значениями токов на ближнем и дальнем катодах, содержащих значения K_u^1 и K_u^2 , а также значения показателей рассеивающей способности, так как они тоже являются функцией плотности тока на катоде.

На ПД-портрете следует обратить внимание на «поведение» перфорированного анода в электролизере при использовании разных электролитов. Появление разности потенциалов на разных сторонах анода является свидетельством отклонений от идеальности ячейки по сравнению с ее эквивалентом (рис. 6). При сопоставлении собственных

результатов с литературными данными нужно учесть, что «чужие» данные могут быть представлены в другой шкале электродных потенциалов. Для приведения электродных потенциалов к водородной шкале необходимо учитывать потенциал хлорсеребряного электрода сравнения, равный 0,201 В.

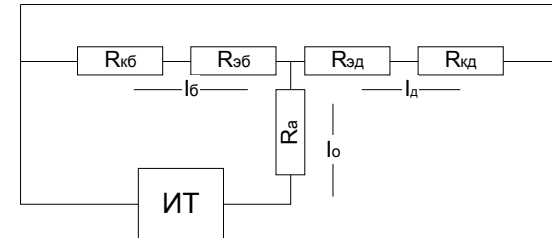


Рис.6. Эквивалентная электрическая схема моделирующего электролизера (рис.4) с плоскопараллельными разноудаленными катодами и одним анодом. $I_о$, $I_б$, $I_д$ – токи, протекающие через анод, ближний и дальний катоды, соответственно

Упражнение 1. Ознакомьтесь с влиянием плотности тока на составляющие напряжения на клеммах электролизера и на показатели рассеивающей способности T и R_j электролита цинкования (состав и режим указывает преподаватель).

Опыт производят при комнатной температуре, значения плотности тока от 50 до 650 A/m^2 , изменяют с шагом 50 A/m^2 . В качестве катодов используют стальные пластины, изолированные с нерабочей стороны, а в качестве анодов - цинковые перфорированные пластины с разной степенью перфорации.

Упражнение 2. Ознакомьтесь с влиянием плотности тока на составляющие напряжения на клеммах электролизера и на показатели рассеивающей способности T и R_j кислого электролита меднения.

Опыт производят при значениях плотности тока от 50 до 650 A/m^2 , изменяя ее с шагом 50 A/m^2 . Температура комнатная. В качестве катодов используют стальные предварительно никелированные пластины, изолированные с нерабочей стороны, а

в качестве анодов - медные перфорированные пластины с разной степенью перфорации.

Упражнение 3. Ознакомиться с влиянием плотности тока на составляющие напряжения на клеммах электролизера и на показатели рассеивающей способности T и Rj электролита никелирования.

Опыт производят при значениях плотности тока от 50 до 650 A/m^2 , изменяя ее с шагом 50 A/m^2 . Температура комнатная. В качестве катодов используют стальные пластины, изолированные с нерабочей стороны, а в качестве анодов никелевые перфорированные пластины с разной степенью перфорации.

Упражнение 4. Ознакомиться с влиянием плотности тока на составляющие напряжения на клеммах электролизера и на показатели рассеивающей способности T и Rj тетрагидратного электролита хромирования.

Опыт производят при значениях плотности тока от 50 до 5000 A/m^2 , изменяя ее с шагом 100 A/m^2 . Температура комнатная. В качестве катодов используют стальные пластины, изолированные с нерабочей стороны, и в качестве анодов - свинцовые перфорированные пластины с разной степенью перфорации.

По результатам измерений, произведенных для каждой комбинации электродов, на отдельном графике строят кривые зависимости всех измеренных значений составляющих общего напряжения на клеммах электролизера от тока, протекающего через электролизер и его параллельные цепи, то есть строят *ПД*-портреты изучаемых электрохимических объектов. На других графиках представляют зависимости токов, протекающих через ближний и дальний катоды, а также показателей рассеивающей способности T и Rj от общего тока, протекающего через электролизер.

Пример *ПД*-портрета электролизера, полученный с использованием графопостроителя *Excel*, приведен на рис. 7.

Упражнение 5. Ознакомиться с влиянием состава электролита меднения (соотношения концентраций сульфата меди и серной кислоты) на составляющие напряжения на клеммах

электролизера и на показатели рассеивающей способности T и Rj кислого электролита меднения.

Опыт производят при значениях плотности тока от 50 до 650 A/m^2 , изменяя ее с шагом 50 A/m^2 . Температура комнатная. В качестве катодов используют стальные предварительно никелированные пластины, изолированные с нерабочей стороны, а в качестве анода - медную перфорированную пластину.

Составы электролитов выбирают из таблицы.

Номер электролита	Концентрация компонентов, г/дм ³	
	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	H_2SO_4
1	250	50
2	200	75
3	175	100
4	150	125
5	125	150
6	100	175

При анализе экспериментальных данных полезно сопоставить на ПД-портрете результаты измерений с расчетными значениями тех же величин, дать объяснения расхождениям, сделать заключение о правдоподобности значений обсуждаемых величин.

Расчетные значения можно получить, используя эквивалентную схему моделирующей ячейки, приведенную на рис.6, и независимые исходные данные: результаты поляризационных измерений и значения удельного сопротивления электролитов.

Остальные данные получают, измеряя размеры элементов ячейки, так как значения напряжения $U_{эл}$ могут быть рассчитаны на основе геометрических параметров модельного электролизера по формуле

$$U_{эл} = I_p \rho l / S, \quad (15)$$

где l – расстояние между электродами; S – сечение электролита в этой части прямоугольного электролизера; а ρ – удельное сопротивление электролита, которое можно измерить, используя прием определения этой величины на постоянном токе.

Специальная ячейка для проведения таких измерений и описание измерительной процедуры имеются в лаборатории.

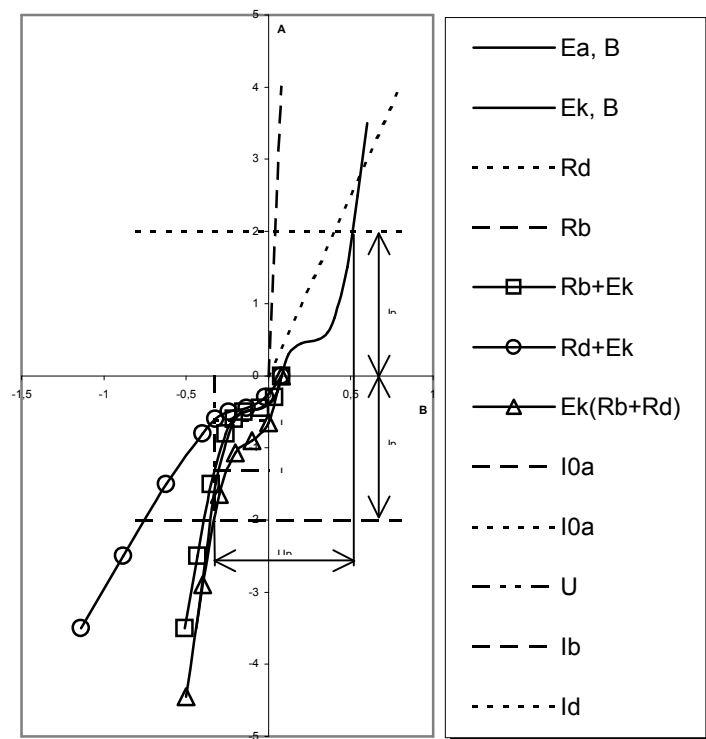


Рис. 7. ПД-портрет лабораторного электролизера, использованного для моделирования распределения тока на разноудаленных плоскопараллельных катодах (обозначения на кривых соответствуют обозначениям на рис.5)

Численные эксперименты. Как было отмечено, простая конструкция ячейки для измерения рассеивающей способности, имеющая прямоугольную форму и плоскопараллельные разноудаленные электроды, позволяет получить ее электрический аналог в виде параллельно-последовательного соединения

линейных и нелинейных сопротивлений (см. рис.6). Благодаря этому, имея минимум исходных данных (анодную и катодную поляризационные кривые и удельное сопротивление электролита), можно рассчитать распределение тока между разноудаленными катодами в ячейке любых размеров и получить значения показателей рассеивающей способности. Расчеты можно производить для электродных процессов с гладкими и N-образными поляризационными кривыми [4]. Ниже приведены задания численного моделирования гальванической ванны (упражнения 6 и 8) и ячеек с плоскопараллельными разноудаленными катодами (упражнения 7 и 9) для процессов с гладкими и N-образными поляризационными кривыми.

Упражнение 6. Ознакомиться с влиянием плотности тока на составляющие напряжения на клеммах гальванической ванны на основе расчетов с использованием литературных (или справочных) данных поляризационных измерений (для анодного и катодного процессов) и проводимости электролита. Состав электролита указывает преподаватель (предпочтительно, из следующего набора процессов: цинкование, меднение, никелирование или хромирование).

Расчеты производят на основе эквивалентной схемы, содержащей три последовательно включенных сопротивления: два из них – это сопротивления эквипотенциальных границ электрод-электролит для анода и катода, третье - сопротивление электролита в прямоугольном межэлектродном пространстве. Значения падений напряжений на этих сопротивлениях находят для значений плотности тока от 50 до 5000 A/m^2 , изменяя ее с шагом 100 A/m^2 . При расчете предполагают, что площади поверхности покрываемых деталей и анодных корзин совпадают с площадью сечения электролита в межэлектродном промежутке. Размеры ванны (мм): размер вдоль оси катодной штанги – 1500, расстояние между осями анодной и катодной штанг – 300, глубина – 1500.

Расчеты рекомендуется выполнять в пакете *Excel*. Итоговыми результатами численного эксперимента должны быть вольт-амперная характеристика гальванической ванны и

зависимость удельного расхода электроэнергии при получении гальванического покрытия толщиной 24 мкм от общего тока через ванну, представленные с использованием графопостроителя *Excel*.

Упражнение 7. На основе численного эксперимента ознакомиться с влиянием плотности тока на составляющие напряжения на клеммах ячейки с разноудаленными плоскопараллельными электродами и на показатели рассеивающей способности T и Rj для одного из широко используемых в гальванотехнике электролитов. Состав электролита указывает преподаватель (предпочтительно, из следующего набора процессов: цинкование, меднение, никелирование или хромирование).

Расчеты производят при известных анодной и катодной поляризационных кривых и удельном сопротивлении электролита для значений плотности тока от 50 A/m^2 до значения, в 2-3 раза превышающего рабочую плотность тока для выбранного электролита, изменяя ее с шагом 50 A/m^2 . Размеры моделирующей ячейки l_a и l_k принять равными 250 и 50 мм, площадь поверхности катодов - 25 см^2 . При расчете используют эквивалентную электрическую схему, представленную на рис.6. Расчеты рекомендуется выполнять в пакете *Excel*. Итоговыми результатами численного эксперимента должны быть вольт-амперная характеристика ячейки, зависимости токов на ближнем и дальнем катодах и показателей рассеивающей способности электролита от общего тока через ячейку и средней катодной плотности тока, представленные с использованием графопостроителя *Excel*.

Упражнение 8. Ознакомиться с влиянием плотности тока на составляющие напряжения на клеммах гальванической ванны на основе расчетов с использованием литературных (или справочных) данных поляризационных измерений (для анодного и катодного процессов) и проводимости электролита. Состав электролита указывает преподаватель (предпочтительно, из следующего набора процессов: цинкование, меднение, никелирование или хромирование).

Расчеты производят для условий, приведенных в упражнении 5, но для N -образной катодной поляризационной кривой.

Упражнение 9. На основе численного эксперимента ознакомиться с влиянием плотности тока на составляющие напряжения на клеммах ячейки с разноудаленными плоскопараллельными электродами и на показатели рассеивающей способности T и R_j для одного из широко используемых в гальванотехнике электролитов. Состав электролита указывает преподаватель (предпочтительно, из следующего набора процессов: цинкование, меднение, никелирование или хромирование).

Расчеты производят для условий, приведенных в упражнении 6, но для N -образной катодной поляризационной кривой.

Литература:

1. Герасименко А.А., Микитюк В.И. *Определение параметров электрохимических процессов осаждения покрытий (Справочные таблицы)*. – М.: Металлургия, 1980. - 110 с.
2. Haring H., Blum W. // *Trans. Electrochem. Soc.* –1923, v.44.-P.283.
3. *Оптимизация электрических полей, контроль и автоматизация гальванообработки.* / В.Т. Иванов, В.Г. Гусев, А.Н. Фокин // М.: Машиностроение. - М. - 1986. - 216 с.
4. Андреев И.Н. *Расчет стационарного распределения тока на электродах ячейки Херинга-Блюма.* // *Тр. Моск. хим.технол.ин-та.* - 1977. -. №95. - С.22-25.
5. Андреев И.Н. *Технологическая оснастка для гальванических линий (подвески, анодные корзины и погружные электрохимические модули)* Казань, Из-во. Казан.гос.технолог. ун-та. 2006.

Работа 2. Исследование эффективности экранов на гальванической подвеске

Цель работы – ознакомиться с принципами регулирования тока на катоде с помощью проводящего и непроводящего экранов на основе измерений электрических параметров электролизеров с

разноудаленными плоско-параллельными электродами, моделирующими систему основной катод – экран.

При проектировании технологической оснастки (подвесок) в гальванотехнике наиболее часто используется способ регулирования распределения тока с применением проводящих или непроводящих экранов, служащих конструктивными элементами приспособлений для нанесения покрытий. Иногда непроводящие экраны являются самостоятельными специальными устройствами для получения требуемого распределения тока на подвеске [1]. Применение проводящих экранов сопряжено с расходом металла и электроэнергии вследствие осаждения металла на дополнительных катодных поверхностях. Покрывающиеся элементы приспособлений нуждаются в периодической замене, особенно часто в тех случаях, когда введение дополнительной операции удаления осажденного металла с поверхности проводящего экрана приводит к быстрому изменению его геометрических параметров. На поверхности непроводящих экранов металл не выделяется. Это обеспечивает длительное сохранение параметров приспособлений и не вызывает расходов по обслуживанию. Однако такие устройства в гальванической ванне увеличивают до некоторой степени сопротивление межэлектродного промежутка, так как уменьшается сечение электролита, по которому протекает ток между анодом и катодом ванны.

Вследствие увеличения клеммового напряжения на ванне при сохранении средней плотности тока на деталях возрастает удельный расход электроэнергии на получение покрытий с фиксированными параметрами.

На рис. 8 приведены схемы проводящего и непроводящего экранов, которые могут быть элементами приспособления (подвески), используемого для нанесения гальванических покрытий. Такие экраны применяют для регулирования распределения тока на поляризованной поверхности.

Проводящий экран является дополнительным электродом в электрохимической системе и подключен параллельно с основным. Его располагают в электролите около выступающего

элемента основного электрода. В этом случае проводящий экран «оттягивает на себя» часть тока, приходящегося на выступающий элемент поверхности основного электрода, тем самым обеспечивая более равномерное распределение тока на поляризованной поверхности основного электрода.

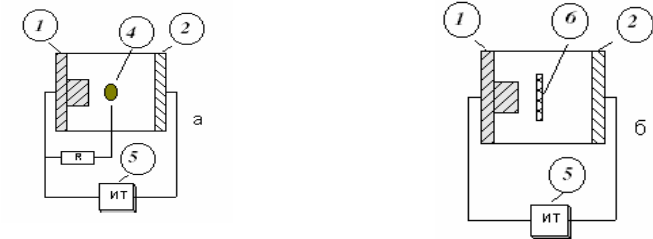


Рис. 8. Схемы взаимного расположения основного (1) и вспомогательного (2) электродов и проводящего (4) и непроводящего (6) экранов в гальванической ванне. 5-источник тока

Непроводящий экран обычно представляет собой тонкую пластину из непроводящего материала, размещенную в электролите возле выступающего элемента рельефа поверхности основного электрода. Благодаря этому протяженность пути тока между выступающим элементом поверхности основного электрода и вспомогательным электродом возрастает, что и обеспечивает повышение равномерности распределения тока на поверхности основного электрода. Такая пластина закрепляется на подвеске и обычно защищается от контакта с электролитом, как и все другие части подвески, слоем непроводящего материала.

Исследование распределения тока на поверхностях электродов в некоторых случаях может производиться численным интегрированием уравнения Лапласа для плоского электрического поля, показанного, например, на рис. 9. Одним из возможных приемов, используемых при проектировании таких элементов гальванической оснастки, может быть проведение расчетов с использованием математической модели в виде уравнения Лапласа с соответствующими граничными условиями. В системе уравнений учитываются параметры электрохимических реакций на катодной и анодной поверхностях, а также геометрические

характеристики обрабатываемой детали и средств регулирования распределения тока, их взаимное расположение. Численные решения системы уравнений позволяют получать распределения тока по поверхности детали, а критерий равномерности K_u дает возможность оценить степень близости распределения к требуемому. При необходимости в выбранную совокупность значений параметров проектируемого устройства вносят изменения, рассчитывают при новых исходных данных распределение тока, оценивают соответствующий критерий равномерности, сравнивают его с предыдущим значением и принимают решение на очередном шаге решения задачи в целом.

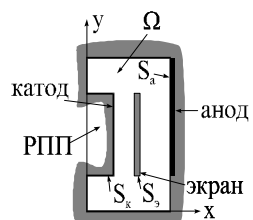


Рис. 9. Схема области интегрирования и ее границ для двухэлектродной ванны с непроводящим экраном

Такие расчеты позволяют оценить параметры распределения тока на катоде двухэлектродной ванны при получении электрохимических металлопокрытий в случае, когда в межэлектродном пространстве находится непроводящий экран (см. рис. 9), при следующей постановке задачи:

$$\Delta E = \frac{\nabla^2 E}{\nabla x^2} + \frac{\nabla^2 E}{\nabla y^2} = 0; \quad (16)$$

$$E - h_a \left(\frac{1}{r} \frac{\nabla E}{\nabla n} \right) \Big|_{S_a} = 0; \quad (17)$$

$$E + h_k \left(\frac{1}{r} \frac{\nabla E}{\nabla n} \right) \Big|_{S_k} = U_k; \quad (18)$$

$$\frac{\nabla E}{\nabla n} \Big|_{S_u} = 0; \quad (19)$$

$$\frac{\nabla E}{\nabla n} \Big|_{S_3} = 0, \quad (20)$$

где $(x, y) \in \Omega$; Δ -оператор Лапласа для функции E (потенциал в точке поля); S_a, S_k, S_u, S_3 - поверхности анода и катода, стенок ванны, зеркала электролита и непроводящего экрана, регулирующего распределение тока; η_a, η_k - анодная и катодная поляризация; ρ - удельное сопротивление электролита; n - направление внешней нормали к поверхностям S_a, S_k, S_u, S_3 ; U_k - клеммовое напряжение на электролитической ванне.

Распределение тока на электродах и общий ток через электролизер можно определить на основе следующих выражений:

$$\frac{1}{r} \frac{\nabla E}{\nabla n} \Big|_{S_a} = j_a(x, y); \quad (21)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\nabla E}{\nabla n} \Big|_{S_k} = j_k(x, y); \quad (22)$$

$$\int_{S_a} j_a(x, y) \cdot dS_a = \int_{S_k} j_k(x, y) \cdot dS_k = I. \quad (23)$$

Результаты такого расчета приведены на рис. 10. Здесь показан характер влияния параметров примененного непроводящего экрана на распределение тока на профилированном катоде и плоском аноде гальванической ванны. Сравнение рис. 10а и 10б показывает, что на выступающем элементе катода ток перераспределяется следующим образом: на вершине выступа плотность тока уменьшается почти в 2 раза, но возрастает на противоположном конце выступающего участка. На распределение тока на аноде также сказывается включение в межэлектродный промежуток непроводящего экрана. Если в отсутствие экрана на части анода со стороны выступа на катоде плотность тока повышена, то при установке экрана ток на этом конце анода снижается. Отмечено также, что введение экрана в межэлектродное пространство приводит к уменьшению

суммарного тока, проходящего через электролизер при постоянном напряжении (2 В) на его клеммах.

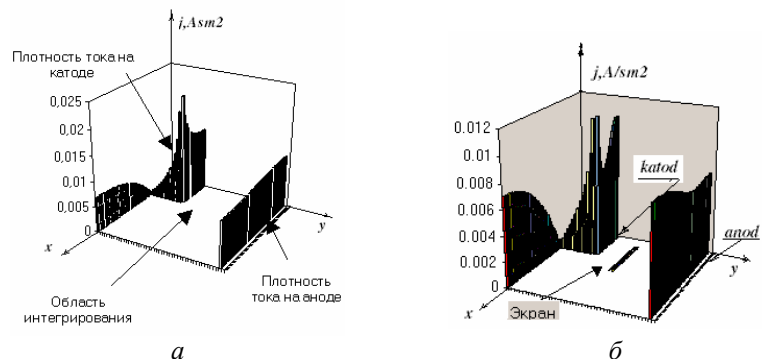


Рис. 10. Результаты расчета распределения тока (A/cm^2) на ступенчатом катоде и на аноде тока на ступенчатом катоде и на аноде с использованием модели (12)-(18): а - условия интегрирования: $U = 2 В$, $r = 5 Ом\cdot см$; б - при введении в пространство между ними непроводящего экрана. Условия интегрирования: $U = 2 В$, $r = 5 Ом\cdot см$. Плотность тока указана в A/cm^2

При ознакомлении с принципами регулирования распределения тока по поверхности покрываемых деталей с использованием в конструкциях приспособлений проводящих и непроводящих экранов полезными могут оказаться моделирующие электролизеры, в которых имитируется влияние электрохимических процессов и параметров конструкций экранов на перераспределение тока на элементах катода. В таких электролизерах можно моделировать влияние поляризации электродов и проводимости электролита, оценивая при этом эффективность регулирующих устройств, изменяя состав электролита. На рис.11 приведены схемы ячеек, которые позволяют реализовать выбранный способ моделирования распределения тока на профилированном катоде.

Данные, полученные в результате непосредственных замеров, заносят в таблицу, столбцы которой именуются в соответствии с обозначениями измеряемых величин на рис. 12.

Используя таблицу экспериментальных данных, в пакете *Excel* получают поляризационные диаграммы (*ПД* - портреты) ячеек при моделировании процессов цинкования, меднения, никелирования и хромирования. На рабочем листе *Excel* таблицу результатов непосредственных измерений на ячейке, которые используют для построения поляризационной диаграммы, дополняют расчетными величинами, с помощью которых можно провести анализ взаимосвязи между компонентами общего напряжения электролизера и распределением тока между ближним и дальним катодами. Например, можно выделить столбцы со значениями токов на ближнем и дальнем катодах, рассчитанными значениями K_u^1 и K_u^2 , а также со значениями показателей эффективности приспособления (с проводящим или непроводящим экраном):

$$\mathcal{E}_{np} = \frac{K_u^1 - K_u^2}{K_u^1} 100, \% \quad (24)$$

так как они тоже являются функциями плотности тока на катоде.

Методика выполнения работы

Эксперименты на моделирующей ячейке. В качестве емкости для электролизера используют прямоугольный сосуд из органического стекла вместимостью 0,2-0,5 дм³. В электролизер помещают две стальные пластины, изолированные с обратной стороны, которые будут выполнять роль «дальнего» и «ближнего» катодов, перфорированную анодную пластину (цинковую, медную, никелевую или свинцовую - в зависимости от состава изучаемого электролита).

Непроводящий экран, показанный на рис. 11б, представляет собой перфорированную пластину из непроводящего материала с отверстиями небольшого диаметра. Проводящий экран может быть изготовлен в виде рамки из непроводящего материала, в которую вмонтирована стальная проволока, прикрепленная к рамке. Она включается в электрическую проводящую цепь по схеме рис. 11.

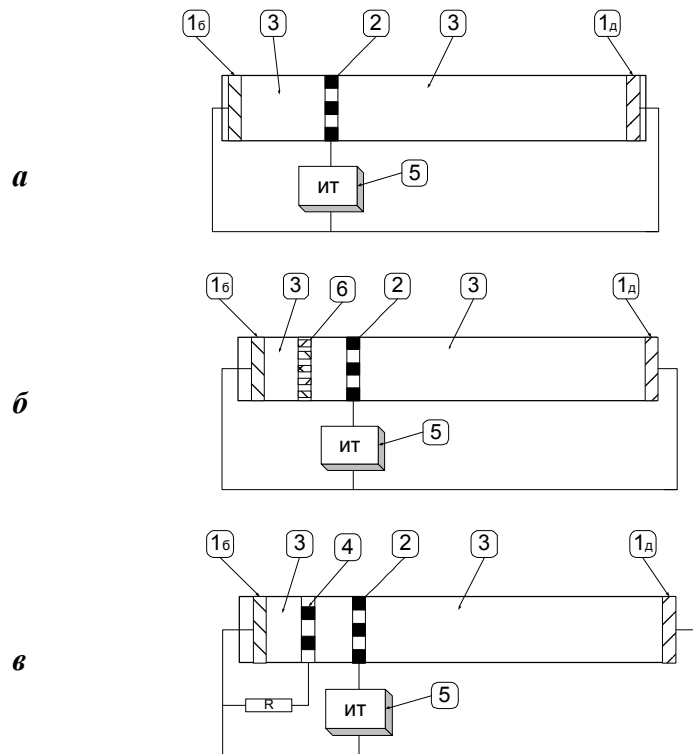


Рис.11. Схемы ячеек для моделирования распределения тока на разноудаленных элементах катода в отсутствие регулирующих устройств (а), при применении проводящего (б) и непроводящего (в) экранов: 1_б, 1_д – ближний и дальний от анода элементы катода; 2 – анод перфорированный; 3 – электролит в межэлектродных пространствах; 4- проводящий экран; 5 - источник тока; 6 – непроводящий экран; R – регулирующее сопротивление в цепи проводящего экрана

Измерения производят в соответствии со схемой, показанной на рис.12. Измерения на ячейке, соответствующей рис. 11а, позволяют получить значения K_u^1 , т.е. значения критерия

Иванова, соответствующие подвеске, на которой не установлены средства регулирования распределения тока.

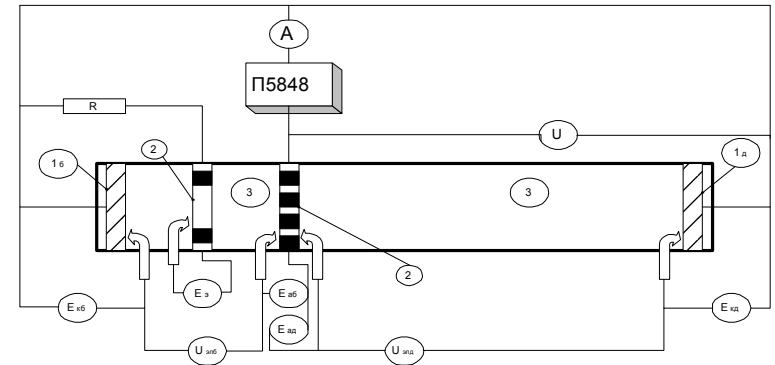


Рис.12. Схема измерений для построения ПД – портретов электролизеров, моделирующих приспособления для регулирования распределения тока на катоде с использованием проводящего и непроводящего экранов: А – амперметр; U - вольтметр для измерения клеммового напряжения; E_а и E_к- вольтметры для измерения потенциалов катода и анода; U_{эл} - вольтметр для измерения падения напряжения в электролите; П5848- потенциостат

Измерения на ячейках, соответствующих рис. 11б и 11в, позволяют получить значения K_u^2 , отвечающие приспособлениям с проводящим или непроводящим экраном соответственно.

При проведении измерений и анализе результатов следует руководствоваться эквивалентными электрическими схемами исследуемых ячеек, приведенными на рис. 13-15. Первая из них соответствует случаю, когда в межэлектродных пространствах нет дополнительных элементов.

Эквивалентная схема рис. 14 соответствует физической схеме, приведенной на рис. 11б, а эквивалентная схема рис.15 соответствует ячейке, приведенной на рис. 11в.

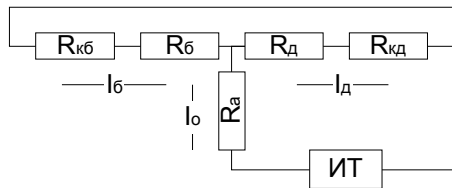


Рис.13. Эквивалентная электрическая схема ячейки с разноудаленными плоскопараллельными электродами, имитирующими профилированный катод и анод в гальванической ванне, соответствующая рис.11а

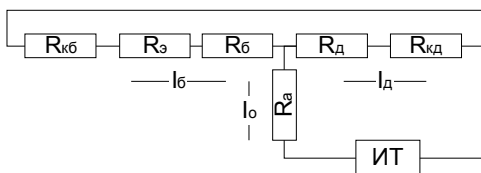


Рис.14. Эквивалентная электрическая схема ячейки с разноудаленными плоскопараллельными электродами, имитирующими профилированный катод и анод в гальванической ванне. $R_э$ – сопротивление непроводящего экрана, находящегося в промежутке между анодом и ближним катодом, соответствующая рис.11б

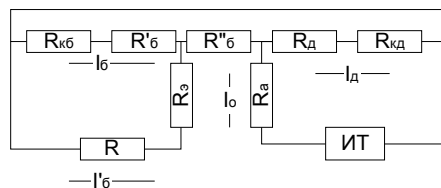


Рис.15. Эквивалентная электрическая схема ячейки с разноудаленными плоскопараллельными электродами, имитирующими профилированный катод и анод в гальванической ванне. $R_э$ – сопротивление проводящего экрана, находящегося в промежутке между анодом и ближним катодом, соответствующая рис.11в

Упражнение 1. Ознакомиться с влиянием плотности тока на составляющие напряжения на клеммах ячейки, моделирующей приспособления с проводящим и непроводящим экранами, и на показатели K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} при цинковании (состав электролита указывает преподаватель).

Опыт производят при комнатной температуре. Значения плотности тока от 50 до 650 A/m^2 , изменяют с шагом 50 A/m^2 . В качестве катодов используют стальные пластины, изолированные с нерабочей стороны, а в качестве анода цинковую перфорированную пластину.

Упражнение 2. Ознакомиться с влиянием плотности тока на составляющие напряжения на клеммах ячейки, моделирующей приспособления с проводящим и непроводящим экранами, и на показатели K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} при меднении в кислом электролите.

Опыт производят при значениях плотности тока от 50 до 650 A/m^2 , изменяя ее с шагом 50 A/m^2 . Температура комнатная. В качестве катодов используют стальные предварительно никелированные пластины, изолированные с нерабочей стороны, а в качестве анода - медную перфорированную пластину.

Упражнение 3. Ознакомиться с влиянием плотности тока на составляющие напряжения на клеммах ячейки, моделирующей приспособления с проводящим и непроводящим экранами, и на показатели K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} при никелировании в стандартном электролите.

Опыт производят при значениях плотности тока от 50 до 650 A/m^2 , изменяя ее с шагом 50 A/m^2 . Температура комнатная. В качестве катодов используют стальные пластины, изолированные с нерабочей стороны, а в качестве анода - никелевую перфорированную пластину.

Упражнение 4. Ознакомиться с влиянием плотности тока на составляющие напряжения на клеммах ячейки, моделирующей приспособления с проводящим и непроводящим экранами, и на показатели K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} при хромировании в тетрахроматном электролите.

Опыты производят при значениях плотности тока от 50 до 5000 A/m^2 , изменяя ее с шагом 100 A/m^2 . Температура комнатная. В качестве катодов используют стальные пластины, изолированные с нерабочей стороны, а в качестве анода - свинцовую перфорированную пластину.

По результатам измерений, проведенных для каждой комбинации электродов в указанном диапазоне поляризующего тока, на отдельном графике строят кривые зависимости всех измеренных значений составляющих общего напряжения на клеммах электролизера от тока, протекающего через электролизер и его параллельные цепи, то есть строят *ПД*-портреты изучаемых электрохимических объектов. На других графиках представляют зависимости токов, протекающих через ближний и дальний катоды, а также зависимости показателей K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} от общего тока, протекающего через моделирующую ячейку.

Пример *ПД*-портрета электролизера, полученный с использованием графопостроителя *Excel*, приведен на рис. 16.

Упражнение 5. Ознакомиться с влиянием состава электролита меднения (соотношения концентраций сульфата меди и серной кислоты) на составляющие напряжения на клеммах ячейки, моделирующей приспособления с проводящим и непроводящим экранами, и на показатели K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} при меднении.

Опыты производят при значениях плотности тока от 50 до 650, изменяя ее с шагом 50 A/m^2 . Температура комнатная. В качестве катодов используют стальные предварительно никелированные пластины, изолированные с нерабочей стороны, а в качестве анода - медную перфорированную пластину.

При анализе экспериментальных данных полезно сопоставить на *ПД*-портрете результаты измерений с расчетными значениями тех же величин, дать объяснения расхождениям, сделать заключение о правдоподобности значений обсуждаемых величин. Расчетные значения можно получить, используя эквивалентную схему моделирующей ячейки, приведенную на рис.6, и независимо полученные исходные данные:

поляризационные измерения и значения удельного сопротивления электролитов.

Составы электролитов выбирают из таблицы:

Номер электролита	Концентрация компонентов, г/дм ³	
	<i>CuSO₄-5H₂O</i>	<i>H₂SO₄</i>
1	250	50
2	200	75
3	175	100
4	150	125
5	125	150
6	100	175
7	75	200
8	50	250

Остальные данные получают, измеряя размеры элементов ячейки, так как значения напряжения $U_{эл}$ могут быть получены расчетом на основе геометрических параметров модельной ячейки по формуле

$$U_{эл} = I_p \rho l / S, \quad (25)$$

где l – расстояние между электродами; S – сечение электролита в этой части прямоугольного электролизера; а ρ – удельное сопротивление электролита, которое можно измерить, используя прием определения этой величины на постоянном токе. Специальная ячейка для проведения таких измерений и описание измерительной процедуры имеются в лаборатории.

Численные эксперименты. Как было отмечено выше, простая конструкция ячеек, используемых для моделирования распределения тока на профилированных катодах, имеющих прямоугольную форму и плоскопараллельные разноудаленные электроды, позволяет получать их электрические аналоги в виде параллельно-последовательного соединения линейных и нелинейных сопротивлений (рис. 13-15). Благодаря этому, имея минимум исходных данных (анодную и катодную

поляризационные кривые и удельное сопротивление электролита), можно рассчитать распределение тока между разноудаленными катодами в ячейках любых размеров и получить значения показателей K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} .

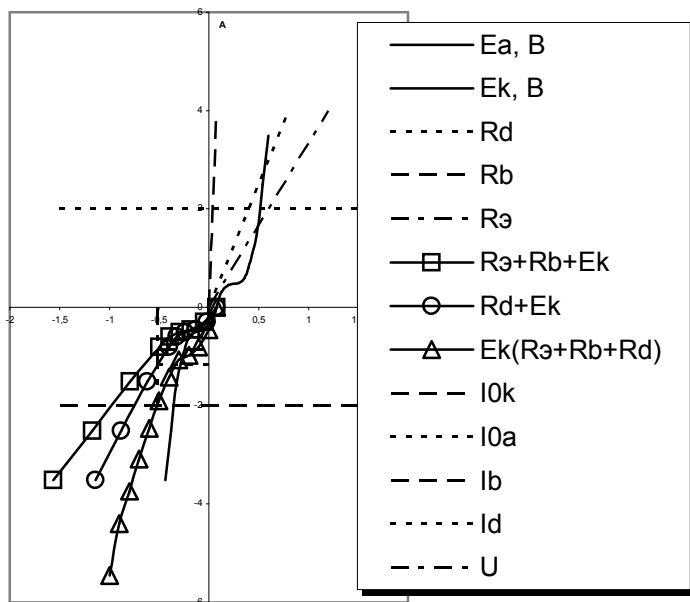


Рис. 16. ПД-портрет лабораторного электролизера, использованного для моделирования процесса перераспределения тока на поверхности детали при применении экранирующих устройств на подвеске. (обозначения на кривых соответствуют обозначениям, приведенным на рис.12)

Расчеты можно проводить для электродных процессов с гладкими и N -образными поляризационными кривыми [2]. Ниже приведены задания для численного моделирования ячеек с плоскопараллельными разноудаленными катодами, имитирующих влияние проводящего и непроводящего экранов, применяемых при

цинковании, меднении, никелировании, хромировании или любом другом гальваническом процессе, для процессов с гладкими (упражнение 7) и N -образными (упражнение 8) поляризационными кривыми.

Упражнение 7. На основе численного эксперимента ознакомиться с влиянием плотности тока на составляющие напряжения на клеммах ячейки с разноудаленными плоскопараллельными электродами и на показатели K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} при имитации приспособлений с проводящим и непроводящим экранами для одного из широко используемых в гальванотехнике электролитов (по указанию преподавателя, предпочтительно, из следующих процессов: цинкование, меднение, никелирование или хромирование).

Расчеты производят при известных анодной и катодной поляризационных кривых и удельном сопротивлении электролита для значений плотности тока от 50 A/m^2 до значения, в 2-3 раза превышающего рабочую плотность тока для выбранного электролита, изменяя ее с шагом 50 A/m^2 . Размеры моделирующей ячейки l_a и l_k принять равными 250 и 50 мм, площадь поверхности катодов 25 см^2 . Параметры экранов (R и $R_{\mathcal{E}}$) согласовать с преподавателем. При расчете используют эквивалентные электрические схемы, представленные на рис.13-15. Расчеты рекомендуется выполнять в пакете *Excel*. Итоговыми результатами численного эксперимента должны быть вольт-амперная характеристика ячейки, зависимости токов на ближнем и дальнем катодах и показателей K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} от общего тока через ячейку и средней катодной плотности тока, представленные с использованием графопостроителя *Excel*.

Упражнение 8. На основе численного моделирования ячеек, имитирующих приспособления с проводящим и непроводящим экранами, ознакомиться с принципами управления распределением тока на поверхности покрываемых деталей. Установить влияние плотности тока на составляющие напряжения на клеммах ячейки на основе расчетов с использованием литературных (или справочных) данных поляризационных

измерений (для анодного и катодного процессов) и проводимости электролита. Состав электролита указывает преподаватель (предпочтительно, из следующего набора процессов: цинкование, меднение, никелирование или хромирование).

Расчеты производят для условий, приведенных в упражнении 6, но для *N*-образной катодной поляризационной кривой.

Литература:

1. Гальванические покрытия в машиностроении: Справочник. Т.2. М.: Машиностроение.- стр. 167.
2. Андреев И.Н. Расчет стационарного распределения тока на электродах ячейки Херинга-Блюма. // Тр. Моск. хим.-технол.ин-та.- 1977. - №95. - С.22-25.
3. Андреев И.Н. Технологическая оснастка для гальванических линий (подвески, анодные корзины и погружные электрохимические модули) Казань, Изд. Казан. гос. технолог. ун-та. 2006.

Работа 3. Исследование гальванической подвески с биполярным электродом

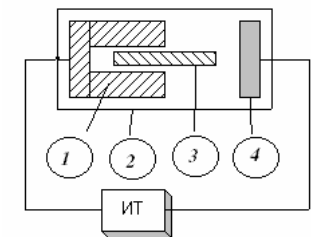
Цель работы – ознакомиться с принципом регулирования распределения тока на поверхности покрываемых деталей в гальванотехнике с помощью растворимых и нерастворимых биполярных электродов; рассмотреть влияние важных электрохимических факторов на перераспределение тока в параллельных проводящих цепях, определяющих распределение тока, на основе исследования электрических параметров модельных электролизеров с биполярными электродами.

Один из наиболее часто используемых способов регулирования распределения тока при проведении электрохимических операций в гальванотехнике - применение непроводящих экранов, которые могут являться конструктивными элементами приспособлений для нанесения покрытий и получения требуемого распределения тока на поверхности деталей. Их применяют, в частности, в приспособлениях для нанесения

многослойных покрытий типа медь-никель-хром на видовой поверхности деталей.

Применение непроводящих экранов, в отличие от проводящих, не сопряжено с расходом электроэнергии на осаждение металла на дополнительных катодных поверхностях, их параметры в процессе работы не изменяются. Это обеспечивает длительное сохранение параметров приспособлений и не вызывает расходов по обслуживанию, однако такие устройства в гальванической ванне увеличивают сопротивление межэлектродного промежутка, так как уменьшается сечение электролита, по которому протекает ток между анодом и катодом ванны. Вследствие увеличения клеммового напряжения на ванне при сохранении средней плотности тока на деталях возрастает удельная электроэнергия, расходуемая на получение покрытий с фиксированными параметрами. Использование биполярных электродов для оптимизации распределения тока на поверхности деталей по сравнению с непроводящими экранами позволяет снизить клеммовое напряжение, так как биполярный электрод может иметь большую проводимость, чем электролит в межэлектродном промежутке.

Рис. 17 Схема взаимного расположения основного (1), вспомогательного (4) и биполярного (3) электродов в ванне (2)



На рис. 17 приведена схема взаимного расположения покрываемой детали, имеющей большое углубление, и биполярного электрода, который может быть элементом приспособления (подвески). Такой электрод позволяет увеличить плотность тока на поверхности детали внутри углубления, вследствие чего получаемое покрытие будет более равномерным.

При проектировании приспособлений для нанесения однослойных гальванических покрытий может решаться задача оптимизации, учитывающая электрохимические и геометрические параметры биполярного электрода, который может быть растворимым или нерастворимым. Во втором случае появляются некоторые преимущества оснастки, проявляющиеся в процессе ее эксплуатации.

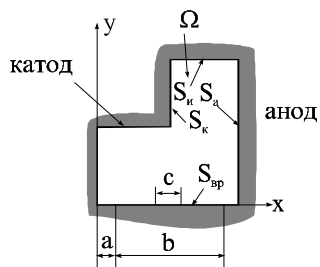


Рис. 18. Схема области интегрирования и ее границ для двухэлектродной ванны с биполярным электродом (b)

Если в качестве ресурса оптимизации используются параметры биполярного электрода [1-4] (рис. 18), может быть сформулирована следующая краевая оптимизационная задача:

$$\Delta E = \frac{\int E^2}{\int x^2} + \frac{\int E^2}{\int y^2} = 0 \quad (25)$$

$$E + h_k \left(\frac{1}{r} \frac{\int E}{\int n} \right) \Big|_{S_k} = U_k \quad (26)$$

$$E - h_a \left(\frac{1}{r} \frac{\int E}{\int n} \right) \Big|_{S_a} = 0 \quad (27)$$

$$\frac{\int E}{\int n} \Big|_{S_n} = 0 \quad (28)$$

$$h_k \left(\frac{1}{r} \frac{\int E}{\int n} \right) \Big|_{S_{be1}} = E - E_{be1} \quad (29)$$

$$h_a \left(\frac{1}{r} \frac{\int E}{\int n} \right) \Big|_{S_{be2}} = E - E_{be2} \quad (30)$$

Здесь E - потенциал электрода в области интегрирования $(x, y) \in \Omega$; Δ -оператор Лапласа для функции E ; S_a, S_k, S_u , - поверхности анода и катода, стенок ванны и зеркала электролита; S_{be} - поверхность биполярного электрода, координаты которого в области интегрирования и размеры анодного и катодного участков при известных характеристиках анодной и катодной реакций, протекающих на этих его участках являются управляющими параметрами в задаче оптимизации, состоящей в минимизации функционала:

$$F_1 = \frac{\max(\frac{1}{r} \frac{\partial E}{\partial n})|_{S_k}}{\min(\frac{1}{r} \frac{\partial E}{\partial n})|_{S_k}} \quad (31)$$

Этот функционал есть выражение критерия равномерности Иванова. При этом следует принять во внимание выражения:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial E}{\partial n} \Big|_{S_a} = j_a(x, y); \quad (32)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial E}{\partial n} \Big|_{S_k} = j_k(x, y); \quad (33)$$

$$\int_{S_a} j_a(x, y) \cdot dS_a = \int_{S_k} j_k(x, y) \cdot dS_k = I. \quad (34)$$

Следует отметить, что для рассматриваемой электрохимической системы, описываемой нелинейной краевой задачей (25)—(34), при интегрировании могут быть определены вольт-амперные характеристики гальванической ванны и найдены энергетические характеристики процесса.

Для уяснения физической сущности задачи в работе предлагается использовать лабораторную модель электрохимической системы, включающей биполярный электрод. Она представляет собой прямоугольную ячейку с одним анодом и двумя катодами, расположенными на разных расстояниях от анода. Таким образом, в ячейке два электрода могут моделировать участки катодной поверхности, находящиеся на разных

расстояниях от анода. В большой межэлектродный промежуток помещается биполярный электрод в виде двух плоских пластин, соединенных между собой накоротко. Пластины изготовлены из того же металла, что и анод ячейки. Тогда соединенные накоротко эти пластины имитируют растворимый биполярный электрод.

Если пластины, имитирующие в ячейке анодный и катодный концы биполярного электрода, сделать меньше по площади поверхности, чем сечение прямоугольной ячейки (рис.19), появляется возможность наблюдать влияние протекания параллельных токов в направлении одного из катодов модели на электрические характеристики системы.

Если одну из пластин, имитирующих концы биполярного электрода, изготовить из нерастворимого металла (или оксида), ячейка превратится в модель электрохимической системы, включающей нерастворимый биполярный электрод.

Методика выполнения работы

Эксперименты на моделирующей ячейке. В качестве емкости для моделирующей ячейки используют прямоугольный сосуд из органического стекла вместимостью 0,2-0,5 дм³.

В ячейку помещают анод (из меди, никеля или цинка), два катода из меди или стали и две пластины, имитирующие биполярный электрод. Эти пластины могут быть медными, никелевыми или цинковыми в тех случаях соответственно, когда они имитируют растворимые биполярные электроды в электролитах меднения, никелирования или цинкования.

В тех же случаях, когда имитируется нерастворимый биполярный электрод, пластина, соответствующая анодному концу биполярного электрода, должна быть из нерастворимого материала. При проведении опытов со щелочным электролитом цинкования может быть использована пластина из углеродистой стали. На ней при анодной поляризации выделяться будет кислород, благодаря пассивности железа в этих условиях. Но при экспериментировании с другими электролитами необходимо воспользоваться титановой пластиной с двуокисномарганцевым оксидным покрытием.

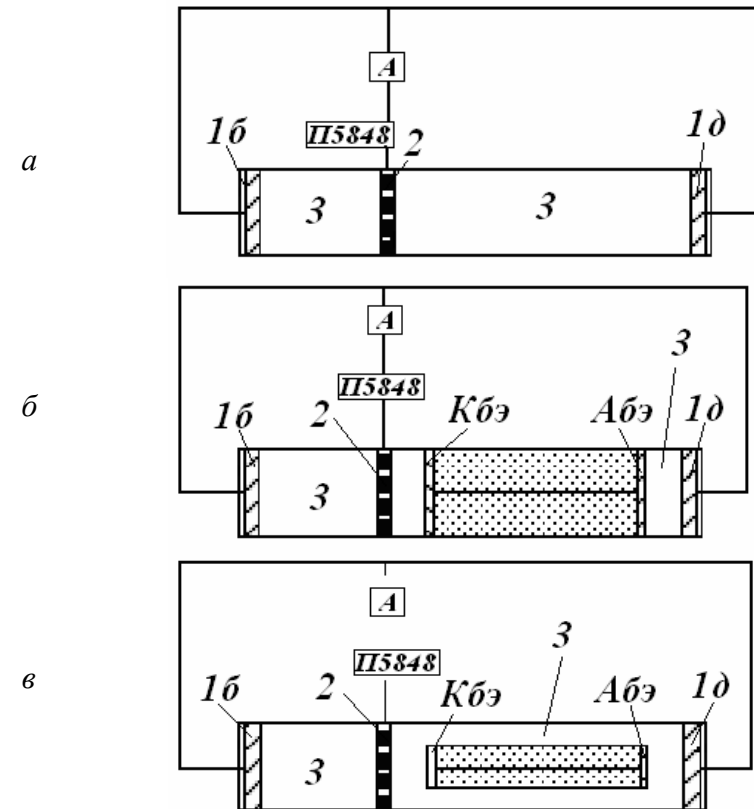


Рис.19. Схемы ячеек для моделирования распределения тока на разноудаленных элементах катода в отсутствие регулирующих устройств (а), при применении биполярного электрода, полностью перекрывающего проводящую часть межэлектродного пространства (б) и биполярного электрода, шунтированного электролитом (в): 1б, 1д – ближний и дальний от анода элементы катода; 2 – анод перфорированный, 3 – электролит в межэлектродных пространствах; Кбэ-катодный конец биполярного электрода; Абэ-анодный конец биполярного электрода; П5848-потенциостат

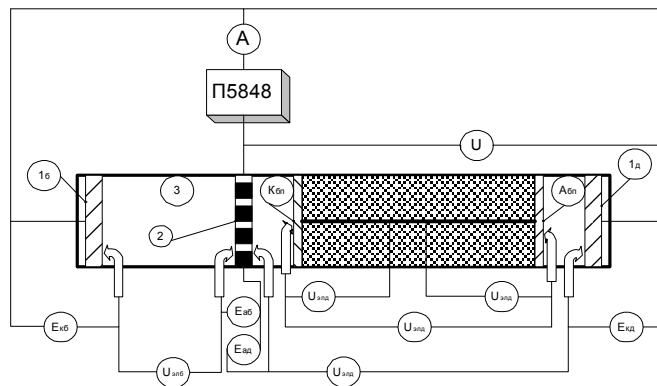
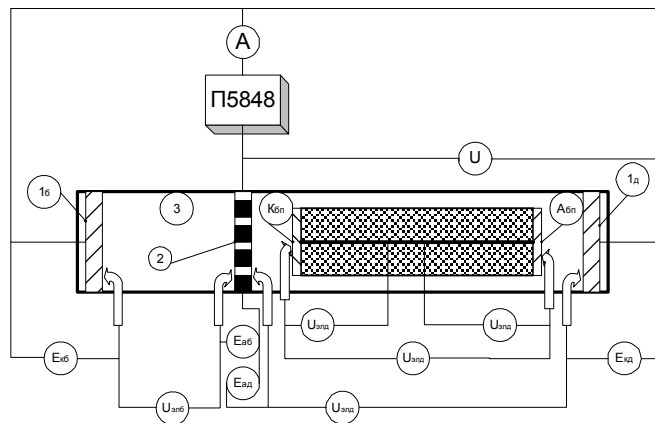


Рис.20. Схемы измерений для построения ПД – портретов ячеек, моделирующих приспособления для регулирования распределения тока на катоде с использованием биполярного электрода (см. рис.19): А – амперметр; U - вольтметр для измерения клеммового напряжения; E_a и E_k - вольтметры для измерения потенциалов катода и анода; $U_{эл}$ - вольтметр для измерения падения напряжения в электролите; П5848- потенциостат

Значения измеряемых величин заносят в таблицу, столбцы которой поименованы в соответствии с электрической схемой, приведенной на рис. 20.

Работу производят в несколько этапов. Первоначально выполняют измерения в ячейке, имитирующей неравномерное распределение тока на разноудаленных элементах катода. Затем в больший межэлектродный промежуток на некотором расстоянии друг от друга помещают две замкнутые накоротко пластины из одного металла, которые имитируют растворимый биполярный электрод. Расстояние между пластинами соответствует длине биполярного электрода в реальном приспособлении для нанесения покрытия.

Эта система позволяет наблюдать распределение тока между его электролитным и металлическим (через биполярный электрод) путями. Для оценки вклада в проводимость межэлектродного промежутка электролитного проводника измеряют электрическую проводимость используемого электролита, применяя методику и схему измерений на постоянном токе. Затем рассчитывают падение напряжения в электролите для сравнения этой величины с результатом прямых измерений $U_{эл}$ (см. рис. 20).

Ниже предлагается несколько упражнений, позволяющих обучающемуся ознакомиться с «поведением» биполярного электрода в электролитах для нанесения наиболее распространенных гальванических покрытий (цинкового, медного, никелевого). Упражнение 4 позволит детальнее рассмотреть влияние электрохимических свойств электролита на эффективность приспособления, предназначенного для улучшения равномерности покрытий. Упражнения следует выполнять на основе измерений с использованием лабораторных моделей, а также путем численного моделирования.

Упражнение 1. Ознакомиться с влиянием плотности тока на составляющие напряжения на клеммах ячейки, моделирующей приспособления с растворимым и нерастворимым биполярными электродами, и на показатели K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} при цинковании (состав электролита указывает преподаватель).

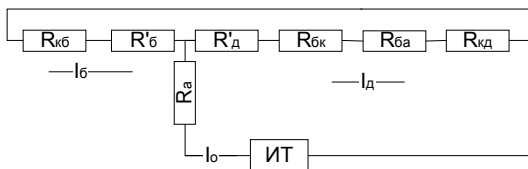


Рис.21. Эквивалентная электрическая схема ячейки, моделирующей распределение тока на разноудаленных катодах (соответствующая рис. 19а)

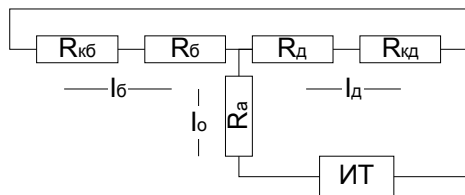


Рис.22. Эквивалентная электрическая схема ячейки, моделирующей приспособление для регулирования распределения тока на катоде с использованием биполярного электрода, полностью перекрывающего сечение со стороны дальнего электрода (соответствующая рис. 19б)

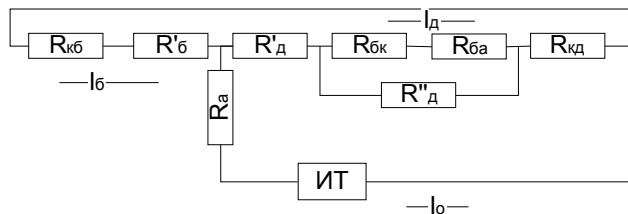


Рис.23. Эквивалентная электрическая схема ячейки, моделирующей приспособление для регулирования распределения тока на катоде с использованием биполярного электрода, не полностью перекрывающего сечение со стороны дальнего электрода (соответствующая рис. 19в)

Опыты производят при комнатной температуре, значения плотности тока от 50 до 650 A/m^2 , изменяют с шагом 50 A/m^2 . В качестве катодов используют стальные пластины, изолированные с нерабочей стороны, а в качестве анода - цинковую перфорированную пластину.

Упражнение 2. Ознакомиться с влиянием плотности тока на составляющие напряжения на клеммах ячейки, моделирующей приспособления с растворимым и нерастворимым биполярными электродами, и на показатели K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} при меднении в кислом электролите.

Опыты производят при значениях плотности тока от 50 до 650 A/m^2 , изменяя ее с шагом 50 A/m^2 . Температура комнатная. В качестве катодов используют стальные предварительно никелированные пластины, изолированные с нерабочей стороны, а в качестве анода - медную перфорированную пластину.

Упражнение 3. Ознакомиться с влиянием плотности тока на составляющие напряжения на клеммах ячейки, моделирующей приспособления с растворимым и нерастворимым биполярными электродами, и на показатели K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} при никелировании в стандартном электролите.

Опыты производят при значениях плотности тока от 50 до 650 A/m^2 , изменяя ее с шагом 50 A/m^2 . Температура комнатная. В качестве катодов используют стальные пластины, изолированные с нерабочей стороны, а в качестве анода никелевую перфорированную пластину.

Упражнение 4. Ознакомиться с влиянием состава электролита меднения (соотношения концентраций сульфата меди и серной кислоты) на составляющие напряжения на клеммах ячейки, моделирующей приспособления с растворимым и нерастворимым биполярными электродами, и на показатели K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} при меднении.

Опыты производят при значениях плотности тока от 50 до 650 A/m^2 , изменяя ее с шагом 50 A/m^2 . Температура комнатная. В качестве катодов используют стальные предварительно

никелированные пластины, изолированные с нерабочей стороны, а в качестве анода медную перфорированную пластину.

Составы электролитов выбирают из таблицы:

Номер электролита	Концентрация компонентов, г/дм ³	
	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	H_2SO_4
1	250	50
2	200	75
3	175	100
4	150	125
5	125	150
6	100	175
7	75	200
8	50	250

По результатам измерений, проведенных для каждой комбинации электродов в указанном диапазоне поляризующего тока, на отдельном графике строят кривые зависимости всех измеренных значений составляющих общего напряжения на клеммах ячейки от тока, протекающего через ячейки и их параллельные цепи, то есть строят *ПД*-портреты изучаемых электрохимических объектов. На других графиках представляют зависимости токов, протекающих через ближний и дальний катоды, а также зависимости показателей K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} от общего тока, протекающего через моделирующую ячейку. При анализе экспериментальных данных полезно сопоставить на *ПД*-портрете результаты измерений с расчетными значениями тех же величин, дать объяснения расхождениям, сделать заключение о правдоподобности значений обсуждаемых величин. Расчетные значения можно получить, используя эквивалентные электрические схемы моделирующих ячеек, приведенные на рис. 21-23, и независимо полученные исходные данные: результаты анодных и катодных поляризационных измерений (в том числе, и на нерастворимом аноде) и значения удельного сопротивления электролитов. Остальные данные получают, измеряя размеры

элементов ячейки, так как значения напряжения $U_{эл}$ могут быть получены расчетом на основе геометрических параметров модельной ячейки по формуле

$$U_{эл} = I_p \rho l / S, \quad (35)$$

где l – расстояние между электродами; S – сечение электролита в этой части прямоугольного электролизера; ρ – удельное сопротивление электролита, которое можно измерить, используя прием определения этой величины на постоянном токе. Специальная ячейка для проведения таких измерений и описание измерительной процедуры имеются в лаборатории.

Пример ПД-портрета электролизера, полученный с использованием графопостроителя *Excel*, приведен на рис. 24.

Численные эксперименты. Как было отмечено выше, простая конструкция ячеек, используемых для моделирования распределения тока на профилированных катодах, имеющих прямоугольную форму и плоскопараллельные разноудаленные электроды, позволяет получать их электрические аналоги в виде параллельно-последовательного соединения линейных и нелинейных сопротивлений. На рис. 21-23 приведены эквивалентные электрические схемы трех ячеек. Первая схема соответствует ячейке с разноудаленными катодами и перфорированным анодом, которая моделирует распределение тока на сложнопрофилированном катоде. Вторая схема соответствует ячейке, в которой часть электролитического проводника в «длинном» межэлектродном промежутке заменена биполярным электродом. На третьей схеме появилось дополнительное сопротивление, шунтирующее биполярный электрод. Оно соответствует сопротивлению электролита, находящегося рядом с биполярным электродом в ячейке. Благодаря возможности замены ячейки простыми электрическими аналогами, появляется возможность, имея минимум исходных данных (анодную и катодную поляризационные кривые и удельное сопротивление электролита) рассчитать распределение тока между разноудаленными катодами в ячейках любых размеров и получить значения показателей K_u^1 , K_u^2 и $\Xi_{пр}$. Расчеты можно

производить для электродных процессов с гладкими и N-образными поляризационными кривыми [2].

Ниже приведены задания для численного моделирования ячеек с плоскопараллельными разноудаленными катодами, имитирующих влияние биполярных электродов, применяемых для улучшения распределения тока на поверхности деталей при цинковании, меднении, никелировании или любом другом гальваническом процессе, имеющем гладкие (упражнение 5) и N-образные (упражнение 6) поляризационные кривые.

Упражнение 5. На основе численного эксперимента ознакомиться с влиянием плотности тока на составляющие напряжения на клеммах ячейки с разноудаленными плоскопараллельными электродами и на показатели K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} при имитации приспособлений с растворимым и нерастворимым биполярными электродами для одного из широко используемых в гальванотехнике электролитов (по указанию преподавателя, предпочтительно, из следующего набора процессов: цинкование, меднение или никелирование).

Расчеты производят при известных анодной и катодной поляризационных кривых и удельном сопротивлении электролита для значений плотности тока от $50 \text{ A}/\text{M}^2$ до значения в 2-3 раза превышающего рабочую плотность тока для выбранного электролита, изменяя ее с шагом $50 \text{ A}/\text{M}^2$. Размеры моделирующей ячейки l_a и l_k принять равными 250 и 50 мм, площадь поверхности катодов 25 см^2 . При расчете используют эквивалентные электрические схемы, представленные на рис. 21-23. Расчеты рекомендуется выполнять в пакете *Excel*. Итоговыми результатами численного эксперимента должны быть вольт-амперная характеристика ячейки, зависимости токов на ближнем и дальнем катодах и показателей K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} от общего тока через ячейку и средней катодной плотности тока, представленные с использованием графопостроителя *Excel*.

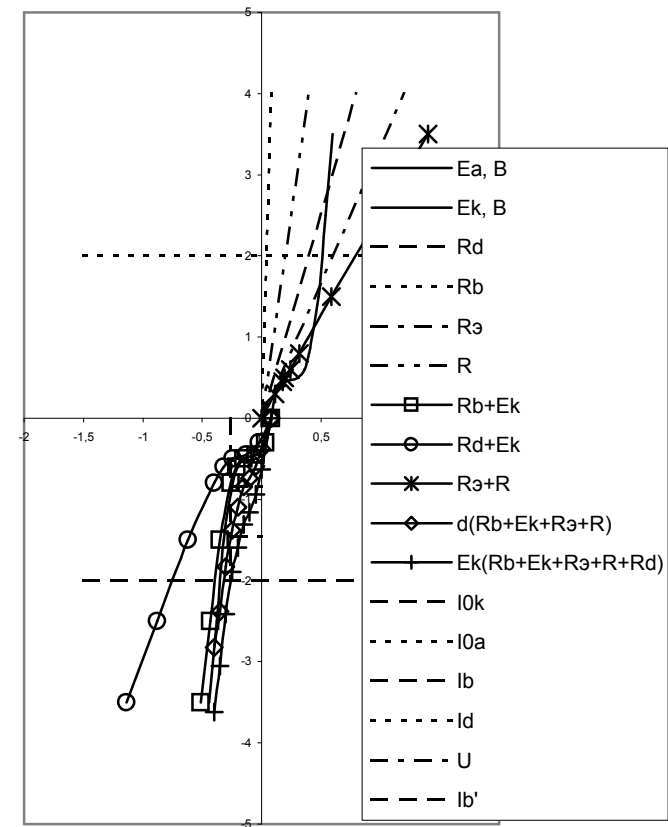


Рис. 24 ПД-портрет лабораторного электролизера, использованного для моделирования перераспределения тока на катоде с использованием биполярного электрода (обозначения на кривых соответствуют обозначениям, приведенным на рис.20)

Упражнение 6. На основе численного моделирования ячеек, имитирующих приспособления с растворимым и нерастворимым биполярными электродами, ознакомьтесь с принципами управления распределением тока на поверхности покрываемых деталей, установить влияние плотности тока на

составляющие напряжения на клеммах ячейки и значения показателей K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} на основе расчетов с использованием литературных (или справочных) данных поляризационных измерений (для анодного и катодного процессов) и проводимости электролита. Состав электролита указывает преподаватель (предпочтительно, из следующего набора процессов: цинкование, меднение, никелирование или хромирование).

Расчеты производят для условий, приведенных в упражнении 6, но для N -образной катодной поляризационной кривой.

Обучающемуся предлагается провести по возможности более полный анализ совокупности экспериментальных данных на ПД – портретах ячеек, моделирующих распределение тока на поверхности профилированного катода и влияние на это распределение параметров биполярного электрода в совокупности с электрохимическими параметрами электролита. На основе такого анализа можно сделать собственные выводы об изучаемом объекте.

Литература:

1. Каданер Л.И. *Равномерность гальванических покрытий*. - Харьков.: Изд-во. Харьков.гос. ун-та, 1960. - 414 с.
2. Иванов В.Т. *Расчеты электрических полей в многоэлектродных электрохимических системах с биполярными электродами*. // *Электрохимия*. - 1974. - Т.10, № 11. - С. 1657 - 1662.
3. Иванов В.Т., Гусев В.Г., Фокин А.Н. *Оптимизация электрических полей, контроль и автоматизация гальванообработки*. - М.: Машиностроение, 1986. - 216 с.
4. Фомичев В.Ф., Машовец В.П. *Исследование системы с биполярными электродами в виде комплекса круговых цилиндров*. // *Ж. физ.химии*. - 1961. - Т. 35, № 4. - С.803
5. Андреев И.Н. *Технологическая оснастка для гальванических линий (подвески, анодные корзины и погружные электрохимические модули)* Казань, Изд-во Казан.гос.технолог. ун-та. 2006.

Работа 4. Исследование распределения тока в системе с дополнительными анодами

Цель работы – ознакомиться с принципами регулирования тока на катоде с помощью дополнительных анодов на основе измерений электрических параметров электролизеров с разноудаленными плоско-параллельными электродами, моделирующими систему катод – анод внешний, анод внутренний.

При проектировании технологической оснастки для нанесения покрытий на сложно профилированные детали, например на детали типа стаканов, в гальванотехнике часто используют дополнительные аноды для обеспечения большей равномерности распределения тока на внутренних и наружных поверхностях таких деталей [1].

Для обеспечения равномерного распределения тока на внешней $S_{\text{вн}}$ и внутренней $S_{\text{вн}}$ поверхностях детали (рис.25) необходимо строго позиционировать электроды. В приспособлениях для нанесения покрытий на такие детали внутренние аноды растворяются особенно интенсивно, поэтому приходится их часто заменять, что приводит к повышению трудозатрат на выполнение гальванических операций. Для повышения стабильности технологических операций в некоторых случаях могут использоваться нерастворимые аноды. Но при этом процессы на внешних и внутренних анодах протекают при разных электродных потенциалах. Для регулирования распределения тока на внешней и внутренней поверхностях покрываемой детали необходимо дополнительно регулировать ток в поляризирующей цепи.

Показанная на рис.25 система является частным случаем многоэлектродных систем, используемых в гальванотехнике для нанесения равномерных покрытий на детали сложной формы. Исследование распределения тока на поверхностях электродов в некоторых случаях может проводиться численным интегрированием уравнения Лапласа для плоского электрического поля, показанного, например, на рис. 26, с соответствующими граничными условиями, в которых учитываются параметры электрохимических реакций на катодной и анодной поверхностях,

а также геометрические характеристики обрабатываемой детали и средства регулирования распределения тока, их взаимное расположение.

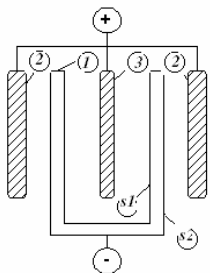


Рис.25. Схема взаимного расположения покрываемой детали (1), внешних (2) и внутреннего анодов (3)

Численные решения системы уравнений позволяют получать распределение тока по поверхности детали, а критерий равномерности K_u дает возможность оценить степень близости распределения к требуемому. При необходимости в выбранную совокупность значений параметров проектируемого устройства вносят изменения, рассчитывают при новых исходных данных распределение тока, оценивают соответствующий выбранной совокупности критерий равномерности K_u , сравнивают его с предыдущим значением и принимают решение на очередном шаге решения задачи в целом.

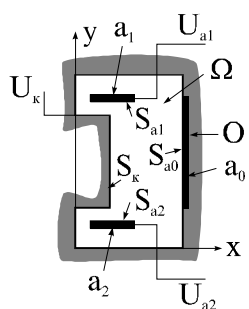


Рис. 26. Схема области интегрирования и ее границ для фрагмента многоэлектродной гальванической ванны с дополнительными анодами

При этом для моделирования распределения тока на катоде гальванической ванны при получении электрохимических

металлопокрытий с использованием дополнительных анодов (см. рис. 26) можно решать следующую нелинейную краевую задачу:

$$\Delta E = \frac{\nabla^2 E}{\nabla x^2} + \frac{\nabla^2 E}{\nabla y^2} = 0; \quad (36)$$

$$E - h_a \left(\frac{1}{r} \frac{\nabla E}{\nabla x} \right) \Big|_{S_a} = 0; \quad (37)$$

$$E + h_k \left(\frac{1}{r} \frac{\nabla E}{\nabla n} \right) \Big|_{S_k} = U_k; \quad (38)$$

$$\frac{\nabla E}{\nabla n} \Big|_{S_n} = 0; \quad (39)$$

$$E - h_{a_1} \left(\frac{1}{r} \frac{\nabla E}{\nabla n} \right) \Big|_{S_{a_1}} = U_{a_1}; \quad (40)$$

$$E - h_{a_2} \left(\frac{1}{r} \frac{\nabla E}{\nabla n} \right) \Big|_{S_{a_2}} = U_{a_2}, \quad (41)$$

где $(x, y) \in \Omega$; Δ -оператор Лапласа для функции E ; S_a, S_k, S_u , - поверхности анода и катода, стенок ванны и зеркала электролита; S_{a_1}, S_{a_2} - поверхности дополнительных анодов, регулирующих распределение тока; h_a, h_k - анодная и катодная поляризация; r - удельное сопротивление электролита; n - направление внешней нормали к поверхностям $S_a, S_k, S_u, S_{a_1}, S_{a_2}$; U_k - клеммовое напряжение электролитической ванны; U_{a_1}, U_{a_2} - напряжение на клеммах катод - дополнительный анод.

При ознакомлении с принципами регулирования распределения тока по поверхности покрываемых деталей с использованием дополнительных анодов в конструкциях приспособлений полезными могут оказаться моделирующие ячейки, в которых имитируется влияние таких анодов на перераспределение тока на внутренних и внешних элементах катода. В таких ячейках можно наблюдать совместное влияние поляризации электродов и проводимости электролита на эффективность регулирующих устройств, если соответствующим

образом подобрать состав электролита. На рис. 28 и 29 приведены схемы ячеек, которые позволяют проводить такие наблюдения. Аноды ячеек, имитирующие внешний и внутренний аноды приспособления, включены в поляризирующую цепь через регулирующие сопротивления, которые позволяют выравнять токи, приходящиеся на обе стороны катодной пластины.

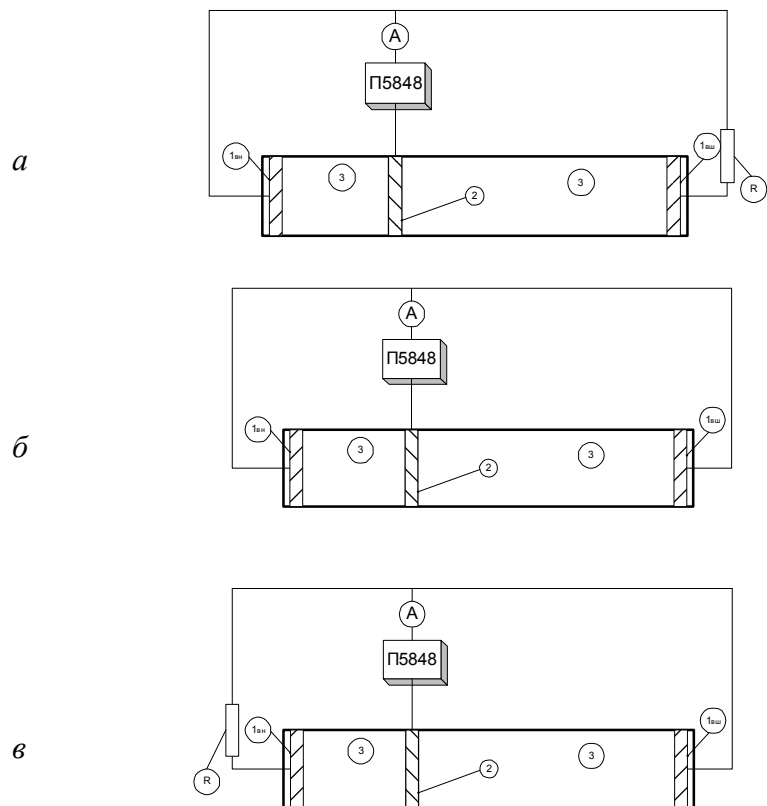


Рис. 27. Схемы электрохимических ячеек, моделирующих систему, включающую трубчатый катод (2), внешний и внутренний аноды (1вн, 1вн)

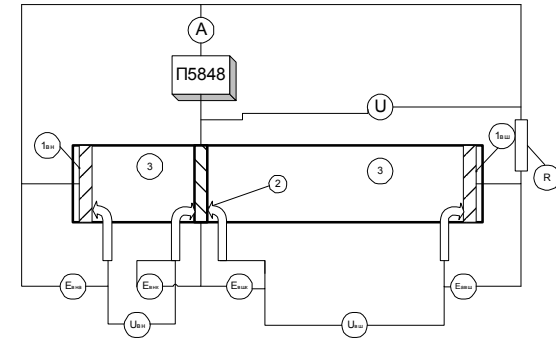


Рис. 28. Схема измерения падений напряжения на элементах внутренних цепей ячейки, моделирующей систему, включающую трубчатый катод(2), внешний и внутренний (нерастворимый) аноды (1вн, 1вн): A, U - амперметр и вольтметр, R – регулирующее сопротивление

При моделировании приспособления для гальванопокрытий с использованием ячеек, схемы которых приведены на рис.28, можно проводить измерения электрических параметров элементов, имитирующих элементы устройства для регулирования распределения тока. При этом можно использовать схему измерений, приведенную на рис.29. На основе этих измерений могут быть построены ПД – портреты моделирующих ячеек, которые можно использовать для анализа влияния переменных параметров на распределение тока между внутренней и внешней поверхностями катода.

Методика выполнения работы

Эксперименты на моделирующей ячейке В качестве емкости для ячейки используют прямоугольный сосуд из органического стекла вместимостью 0,2-0,5 дм³. В ячейку помещают два анода из цинка, меди, никеля или свинца (при хромировании) и катодную стальную пластину, «работающую» с обеих сторон. Электроды перед началом опыта механически обрабатывают и промывают, высушивают, а в случае

использования кислого электролита меднения стальной катод предварительно никелируют.

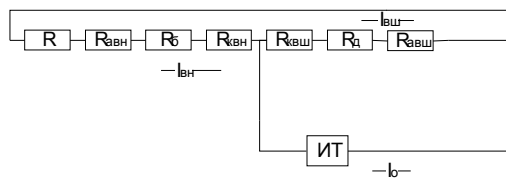


Рис. 29. Эквивалентная электрическая схема ячейки, моделирующей систему, включающую трубчатый катод, внешний и внутренний аноды

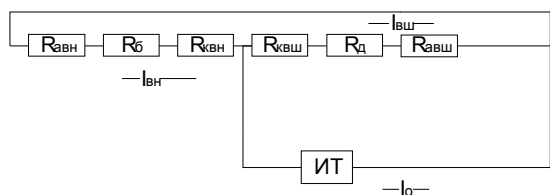


Рис. 30. Эквивалентная электрическая схема ячейки, моделирующей систему, включающую трубчатый катод, внешний и внутренний аноды. Регулирующее сопротивление R включено в цепь внутреннего анода

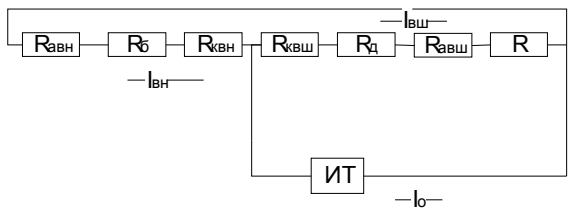


Рис. 31. Эквивалентная электрическая схема ячейки, моделирующей систему, включающую трубчатый катод, внешний и внутренний нерастворимый аноды. Регулирующее сопротивление R включено в цепь внешнего анода

Ток и напряжение на электролизере измеряют с точностью до 0,01 измеряемой величины. Электрическая схема включения ячейки и все измеряемые величины указаны на рис. 27 и 28.

По результатам измерений, проведенных для каждой комбинации электродов в указанном диапазоне поляризующего тока, на отдельном графике представляют зависимости всех измеренных значений составляющих общего напряжения на клеммах ячейки от тока, протекающего через ячейку и ее параллельные цепи, то есть строят *ПД*-портреты изучаемых электрохимических объектов. На других графиках представляют зависимости токов, протекающих через «внутреннюю» и «внешнюю» стороны катода, а также зависимости показателей K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} от общего тока, протекающего через моделирующую ячейку.

Упражнение 1. Ознакомиться с влиянием плотности тока на составляющие напряжения на клеммах ячейки, моделирующей приспособления с растворимым и нерастворимым дополнительными анодами, и на показатели K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} при цинковании (состав электролита указывает преподаватель).

Опыты производят при комнатной температуре, значения плотности тока от 50 до 650 A/m^2 , изменяют с шагом 50 A/m^2 . В качестве двухстороннего катода используют стальную пластину, и в качестве внутреннего и внешнего анодов - цинковые пластины.

Упражнение 2. Ознакомиться с влиянием плотности тока на составляющие напряжения на клеммах ячейки, моделирующей приспособления с растворимым и нерастворимым дополнительными анодами, и на показатели K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} при меднении (состав электролита указывает преподаватель).

Опыты производят при комнатной температуре, значения плотности тока от 50 до 650 A/m^2 , изменяют с шагом 50 A/m^2 . В качестве двухстороннего катода используют предварительно никелированную пластину, и в качестве внутреннего и внешнего анодов - медные пластины.

Упражнение 3. Ознакомиться с влиянием плотности тока на составляющие напряжения на клеммах ячейки, моделирующей приспособления с растворимым и нерастворимым

дополнительными анодами, и на показатели K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} при никелировании (состав электролита указывает преподаватель).

Опыты производят при комнатной температуре, значения плотности тока от 50 до 650 A/m^2 , изменяют с шагом 50 A/m^2 . В качестве двухстороннего катода используют стальную пластину, и в качестве внутреннего и внешнего анодов - никелевые пластины.

Упражнение 4. Ознакомиться с влиянием плотности тока на составляющие напряжения на клеммах ячейки, моделирующей приспособления с растворимым и нерастворимым дополнительными анодами, и на показатели K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} при хромировании (состав хроматного электролита указывает преподаватель).

Опыты производят при комнатной температуре, значения плотности тока от 50 до 650 A/m^2 , изменяют с шагом 50 A/m^2 . В качестве двухстороннего катода используют стальную пластину, и в качестве внутреннего и внешнего анодов - свинцовые пластины.

Упражнение 5. Ознакомиться с влиянием состава электролита меднения (соотношения концентраций сульфата меди и серной кислоты) на составляющие напряжения на клеммах ячейки, моделирующей приспособления с проводящим и непроводящим экранами, и на показатели K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} при меднении.

Опыты производят при значениях плотности тока от 50 до 650 A/m^2 , изменяя ее с шагом 50 A/m^2 . Температура комнатная. В качестве катодов используют стальные предварительно никелированные пластины, изолированные с нерабочей стороны, и в качестве анода - медную перфорированную пластину.

При анализе экспериментальных данных полезно сопоставить на ПД-портрете (рис.32) результаты измерений с расчетными значениями тех же величин, дать объяснения расхождениям, сделать заключение о правдоподобности значений обсуждаемых величин. Расчетные значения можно получить, используя эквивалентную схему моделирующей ячейки, приведенную на рис.6 и независимые исходные данные:

поляризационные измерения и значения удельного сопротивления электролитов.

Составы электролитов выбирают из таблицы

Номер электролита	Концентрация компонентов, г/дм ³	
	<i>CuSO₄-5H₂O</i>	<i>H₂SO₄</i>
1	250	50
2	200	75
3	175	100
4	150	125
5	125	150
6	100	175
7	75	200
8	50	250

Остальные данные находят в результате измерения размеров элементов ячейки, так как значения напряжения $U_{эл}$ могут быть получены расчетом на основе геометрических параметров модельной ячейки по формуле:

$$U_{эл} = I_p \rho l / S, \quad (25)$$

где l – расстояние между электродами, S – сечение электролита в этой части прямоугольного электролизера, а ρ – удельное сопротивление электролита (можно измерить, используя прием определения этой величины на постоянном токе). Специальная ячейка для проведения таких измерений и описание измерительной процедуры имеются в лаборатории.

Численные эксперименты. Как было отмечено, простая конструкция ячеек, имеющих прямоугольную форму и плоскопараллельные разноудаленные электроды, которые используют для моделирования распределения тока на профилированных катодах, позволяет получать их электрические аналоги в виде параллельно-последовательного соединения линейных и нелинейных сопротивлений (рис. 29-31).

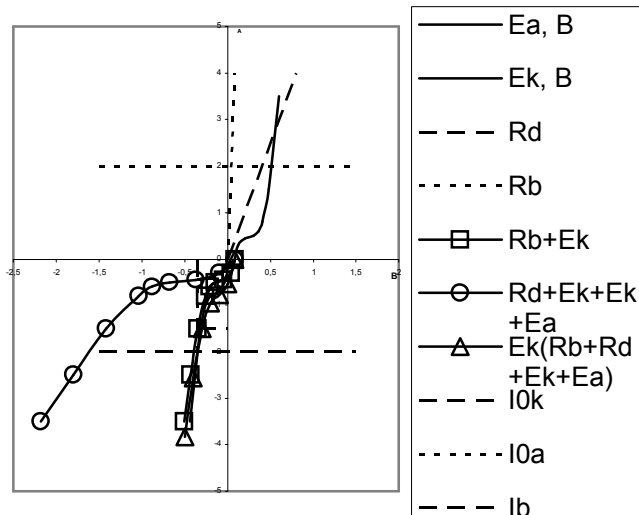


Рис. 32 ПД-портрет лабораторного электролизера, использованного для моделирования перераспределения тока на катоде с использованием дополнительного нерастворимого анода (обозначения на кривых соответствуют обозначениям на рис.28)

Благодаря этому, имея минимум исходных данных (анодные и катодные поляризационные кривые и удельное сопротивление электролита), можно рассчитать распределение тока между «внешней» и «внутренней» сторонами катода в ячейках любых размеров и получить значения показателей K_u^1 , K_u^2 и $\mathcal{E}_{пр}$. Расчеты можно производить для электродных процессов с гладкими и N -образными поляризационными кривыми [2]. Ниже приведены задания для численного моделирования ячеек с плоскопараллельными разноудаленными анодами. С помощью таких ячеек имитируют влияние растворимого и нерастворимого внутреннего анодов и регулирующих сопротивлений в цепях внешнего и внутреннего анодов, применяемых при цинковании,

меднении, никелировании, хромировании или любой другой гальванической операции для процессов с гладкими (упражнение 7) и N -образными (упражнение 8) поляризационными кривыми.

Упражнение 7. На основе численного эксперимента ознакомиться с влиянием плотности тока на составляющие напряжения на клеммах ячейки с разноудаленными плоскопараллельными анодами и на показатели K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} при имитации приспособлений с растворимым и нерастворимым внутренним анодами для одного из широко используемых в гальванотехнике электролитов (по указанию преподавателя, предпочтительно, из следующего набора процессов: цинкование, меднение, никелирование или хромирование).

Расчеты производят при известных анодной и катодной поляризационных кривых и удельном сопротивлении электролита для значений плотности тока от 50 A/m^2 до значения в 2-3 раза превышающего рабочую плотность тока для выбранного электролита, изменяя ее с шагом 50 A/m^2 . Размеры моделирующей ячейки l_a и l_b принять равными 250 и 50 мм, площадь поверхности катодов с каждой стороны 25 см^2 . Параметры экранов регулирующих сопротивлений в цепи внутреннего и внешнего анодов R согласовать с преподавателем. При расчете используют эквивалентные электрические схемы рис. 29-31. Расчеты рекомендуется выполнять в пакете *Excel*. Итоговыми результатами численного эксперимента должны быть вольт-амперные характеристики ячейки, зависимости токов на ближнем и дальнем катодах и показателей K_u^1 , K_u^2 и \mathcal{E}_{np} от общего тока, протекающего через ячейку, и средней катодной плотности тока, представленные с использованием графопостроителя *Excel*.

Упражнение 8. Ознакомиться на основе численного моделирования ячеек, имитирующих приспособления с растворимым и нерастворимым внутренними анодами, с принципами управления распределением тока на внутренней и внешней поверхностях покрываемых сложнопрофилированных деталей. Установить влияние плотности тока на составляющие напряжения на клеммах ячейки на основе расчетов с

использованием литературных (или справочных) данных поляризионных измерений (для анодного и катодного процессов) и проводимости электролита. Состав электролита указывает преподаватель (предпочтительно, из следующего набора процессов: цинкование, меднение, никелирование или хромирование).

Расчеты производят для условий, приведенных в упражнении 7, но для *N*-образной катодной поляризионной кривой.

Литература:

1. Гальванические покрытия в машиностроении. Справочник. Т.2. // М. Машиностроение. -1985.стр. 167.
2. Андреев И.Н. Расчет стационарного распределения тока на электродах ячейки Херинга-Блюма. // Тр. Моск. хим-технол.ин-та.- 1977. -. №95. - С.22-25
3. Андреев И.Н. Технологическая оснастка для гальванических линий (подвески, анодные корзины и погружные электрохимические модули) Казань, Изд. Казан.гос.технолог. ун-та. 2006.

Часть 2

Работа 5. Оценка равномерности распределения тока на внешних границах рабочего поля подвесок в гальванических ваннах разных типов

*Цель работы – ознакомиться с приемами применения пакета программ **Cell-Design** для анализа влияния основных размерных параметров ванн гальванических линий (включая параметры рабочего поля подвески) на распределение тока при гальванообработке.*

В каталогах гальванического оборудования в качестве одного из главных параметров указывают габарит подвески [1,2]. Этот параметр вместе с внутренними размерами гальванических ванн и размерами анодных корзин определяют геометрические характеристики электрического поля в межэлектродном промежутке. Если эти данные дополнить электрическими

параметрами электролита и межфазных границ, можно, пользуясь пакетом программ **Cell-Design**, получить расчетным путем параметры распределения тока на внешних границах рабочего поля подвесок. Эти данные могут быть основой для выбора оптимальных геометрических параметров рабочих зон гальванооборудования. В работе 5 предлагается ознакомиться с приемами работы с пакетом программ **Cell-Design** для решения таких задач.

Упражнение 1. Произвести расчеты распределения тока по границе рабочего поля подвески для ванн гальванических линий, поперечные разрезы которых приведены в [3] на рис. 2. Исследовать влияние высоты анодных корзин в этих ваннах. Пример расчета распределения тока в внешней границе рабочего поля подвески приведен на рис. 34. Расчет выполнен для одной половины подвески, определенной осью симметрии (рис.33).

Рис. 33. Схема вертикального сечения однорядной гальванической ванны – схема расчетной ячейки для моделирования распределения тока на электродах, соответствующая **упр.1**

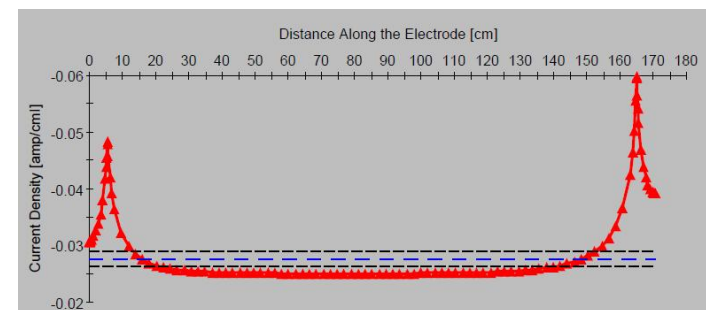
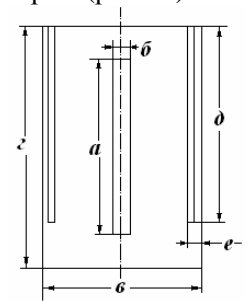


Рис. 34. Результат расчета распределение плотности тока на внешней границе рабочего поля подвески для размеров ванны, близких к данным, представленным в [3] (рис. 2.)

Упражнение 2. Произвести расчеты распределения тока по границе рабочего поля подвески для ванн гальванических линий, поперечные разрезы которых приведены в [3] на рис. 3. Исследовать влияние высоты анодных корзин в этих ваннах. Полученные результаты сопоставить с результатами, полученными при выполнении *упр.1.*

Упражнение 3. Произвести расчеты распределения тока по границе рабочего поля подвески для гальванических ванн ручного обслуживания, размеры которых соответствуют нормативам (см. в [3] табл. 1).

Упражнение 4. Исследовать влияние геометрических параметров ванн в горизонтальном сечении (см. рис.4 в [3]) на показатель равномерности распределения тока на внешней границе рабочего поля подвески.

Литература:

1. *Гальванические покрытия в машиностроении: Справочник. М. Машиностроение. -Т.2- С. 167.*
2. *Оборудование для химической, электрохимической обработки поверхности и нанесения покрытий: Каталог.- Тамбов.,2001.*
3. *Андреев И.Н. Технологическая оснастка для гальванических линий (подвески, анодные корзины и погружные электрохимические модули) /Казан.гос.технолог. ун-та. Казань, 2006.-112 с.*

Работа 6. Оценка равномерности распределения тока при выборе параметров размещения деталей на подвесках внутри рабочего поля

*Цель работы – ознакомиться с приемами применения пакета программ **Cell-Design** для анализа и оптимизации геометрических условий в ваннах (параметров оснастки), влияющих на распределение тока при гальванообработке сложнопрофилированных деталей.*

Как известно [1-3], внутри габаритов подвески, т.е. внутри рабочего поля подвески, обрабатываемые детали могут располагаться в один или в два ряда в зависимости от размеров и других геометрических особенностей. Расчеты распределения тока

с использованием пакета программ *Cell-Design* могут использоваться для анализа влияния геометрических соотношений в рамках рабочего поля подвески на распределение тока на поверхности деталей, а также могут быть средством оптимизации процесса в ванне. Предлагаемые упражнения позволяют выработать навыки решения задач такого рода.

Упражнение 1. Произвести расчеты для исследования влияния размеров расчетной ячейки (a , b , σ) на показатель равномерности распределения тока на поверхности цилиндрических деталей, размещенных на однорядной подвеске (рис.35). Полученные данные представить в виде полинома, используя прил. 2. Пример результатов расчета для одного из сочетаний размеров ванны и деталей приведен на рис. 36.

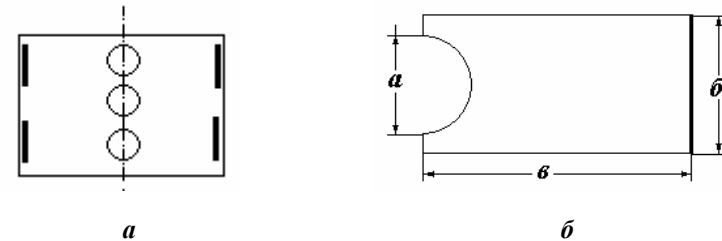


Рис.35. Схема однорядной подвески с цилиндрическими деталями (а) и расчетная ячейка для моделирования распределения тока (б)

Упражнение 2. Произвести расчеты для исследования влияния размеров расчетной ячейки (a , b , σ) на показатель равномерности распределения тока на поверхности цилиндрических деталей, размещенных симметрично на двухрядной подвеске (рис.35). Полученные данные представить в виде полинома, используя приложение 2. Сопоставить полученные результаты с результатами, приведенными в [3].

Упражнение 3. Произвести расчеты для исследования влияния размеров расчетной ячейки (a , b , σ) на показатель равномерности распределения тока на поверхности цилиндрических деталей, размещенных на двухрядной подвеске в шахматном порядке (рис.39). Полученные данные представить в

виде полинома, используя прил. 2. Сопоставить полученные результаты с результатами, приведенными в [3].

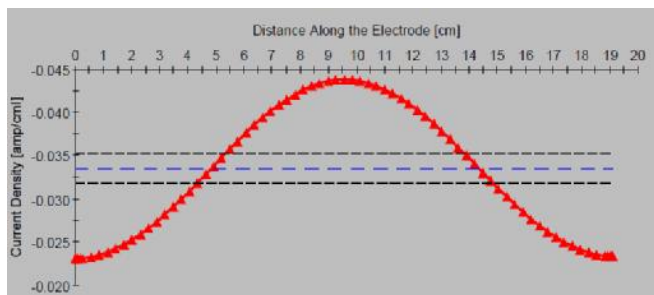


Рис. 36. Результат расчета распределения плотности тока на поверхности цилиндрической детали, обрабатываемой на однорядной подвеске (размеры расчетной ячейки 300x200 мм)

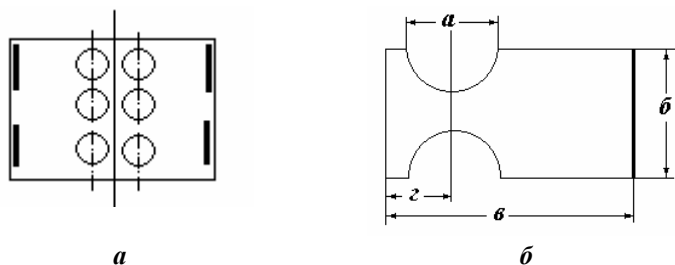


Рис.37. Схема двухрядной подвески с цилиндрическими симметрично размещенными деталями (а) и расчетная ячейка для моделирования распределения тока (б)

Упражнение 4. Произвести расчеты для исследования влияния длины анодов на показатель равномерности распределения тока на поверхности С-образной детали при вертикальном ее завешивании в ванне между анодами (рис.40).

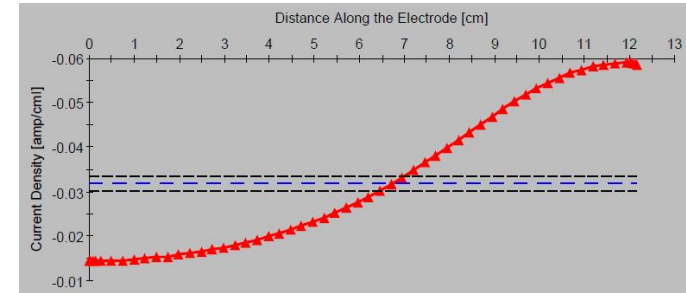


Рис. 38. Распределение плотности тока на поверхности одной из симметрично расположенных цилиндрических деталей (размеры расчетной ячейки 300x200 мм)

Сравнить полученную расчетную картину распределения эквипотенциалей с экспериментальными данными, приведенными в [2].

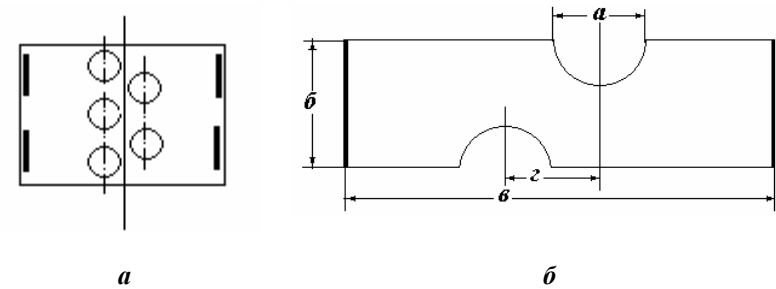


Рис.39. Схема двухрядной подвески с цилиндрическими деталями, размещенными в шахматном порядке (а), и расчетная ячейка для моделирования распределения тока (б)

Пример результатов расчета распределения тока по поверхности С-образной детали приведен на рис. 41.

Упражнение 5. Произвести расчеты для исследования влияния взаимного расположения обрабатываемой детали и анодов на показатель равномерности распределения тока на

поверхности С-образной детали при горизонтальном ее завешивании в ванне между анодами (рис.42).

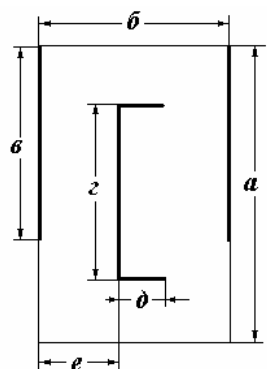


Рис. 40. Схема вертикального сечения гальванической ванны с С-образной деталью при вертикальном размещении в ванне с укороченными анодами (размеры расчетной ячейки 300x200 мм)

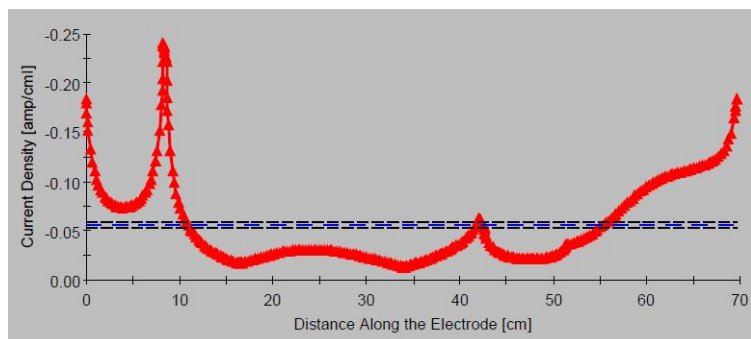
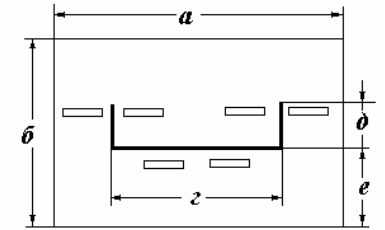


Рис. 41. Распределение плотности тока на поверхности С-образной детали при вертикальном размещении в ванне с укороченными анодами (размеры расчетной ячейки 300x200 мм)

Сравните полученную расчетную картину распределения эквипотенциалей с экспериментальными данными, приведенными в [2]. Пример результатов расчета распределения тока по поверхности С-образной детали для ячейки с размерами 200x300 мм приведен на рис. 43.

Рис. 42 Схема горизонтального сечения гальванической ванны с С-образной деталью при размещении анодов по периферии детали. Расчетная ячейка имеет размеры 300x200 мм



Упражнение 6. Произвести расчеты для исследования влияния взаимного расположения обрабатываемых деталей и анодов на двухрядной рамной подвеске для нанесения многослойных покрытий на колесные колпаки на показатель равномерности распределения тока на их поверхности (см. рис.6 и рис.18 в [2]). При расчете использовать расчетную схему ячейки, приведенную на рис.44.

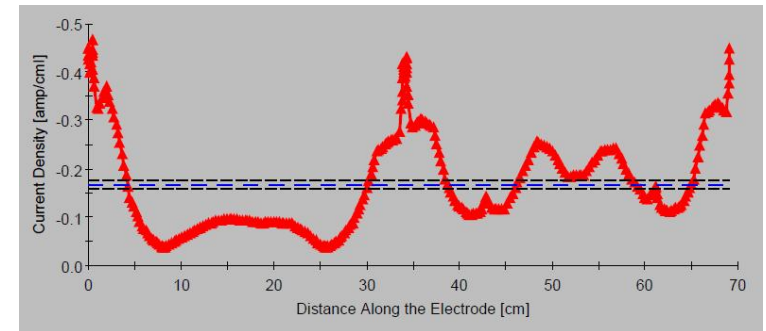


Рис. 43. Распределение плотности тока на поверхности С-образной детали при горизонтальном ее размещении в ванне (размеры расчетной ячейки 300x200 мм)

Упражнение 7. Произвести расчеты для исследования влияния взаимного расположения четырех бамперов и анодов на рамной подвеске для нанесения многослойных покрытий на

показатель равномерности распределения тока на их поверхности (см. рис.6 и рис.19 в [2]).

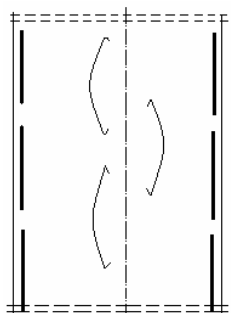


Рис. 44. Схема горизонтального сечения гальванической ванны с колесными каткарами, размещенными на рамной подвеске (размеры расчетной ячейки 300x200 мм)

При расчете использовать расчетную схему ячейки, соответствующую горизонтальному центральному сечению, приведенную на рис. 44. При анализе результатов расчетов обратить внимание на значительные расхождения плотностей токов на видовой и невидовой поверхностях покрываемых деталей, которое может иметь место при выбранном способе размещения бамперов при нанесении многослойных покрытий.

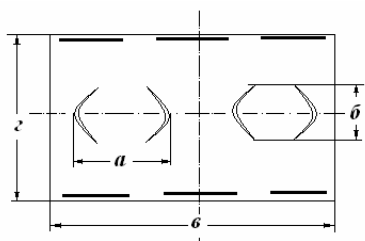


Рис. 45. Схема горизонтального центрального сечения гальванической ванны с рамной подвеской с четырьмя автомобильными бамперами (см. рис. 19 в [2]). При выборе размеров расчетной ячейки принять к сведению, что подвеска используется на линии (см. рис. 2 в [2])

Литература:

1. Гальванические покрытия в машиностроении: Справочник. М. Машиностроение. - Т.2- С. 167.

2. Андреев И.Н. Технологическая оснастка для гальванических линий (подвески, анодные корзины и погружные электрохимические модули) /Казан.гос.технолог. ун-та. Казань, 2006.- 112 с.
3. Андреев И.Н., Кушниковская Г.А. К выбору конструктивных элементов технологических спутников при проектировании процессов гальванопокрытий // Защита металлов. - 1984. - Т.20, №4. - С.650.

Работа 7. Оценка равномерности распределения тока при выборе параметров средств оптимизации распределения тока

*Цель работы – ознакомиться с приемами применения пакета программ **Cell-Design** для оптимизации распределения тока при гальванообработке сложнопрофилированных деталей с помощью дополнительных электродов, проводящего и непроводящего ток экранов.*

Как известно [1, 2], из-за сложной геометрии покрываемых деталей, наличия на их поверхностях углублений или выступов даже при высокой рассеивающей способности выбранного электролита не удастся достичь требуемых параметров равномерности покрытий. В качестве ресурса оптимизации технологического процесса в таких случаях могут быть использованы параметры проводящего и непроводящего экранов, монополярного и биполярного электродов, размещаемых обычно внутри рабочего поля подвески. В данной работе студенту предлагаются упражнения, которые позволят освоить некоторые приемы использования пакета программ **Cell-Design** для решения таких задач.

Упражнение 1. Произвести расчеты для исследования распределения тока на детали в гальванической ванне, размеры которой показаны в [2] на рис. 61, при нанесении медного покрытия на деталь с большим углублением. Сравните полученную расчетную картину распределения эквипотенциалей с экспериментальной картиной, приведенной в [2] на рис.61.

Упражнение 2. Произвести расчеты для исследования влияния размеров *a*, *b*, *c* и *d* (см. рис 4б) на показатель равномерности распределения тока на детали в гальванической ванне, размеры которой показаны в [2] на рис. 61, при нанесении

медного покрытия при изменении в некотором диапазоне (до 100%) размеров a , b , v и z . Исходными принять размеры ячейки, приведенной в [2] на рис.61.

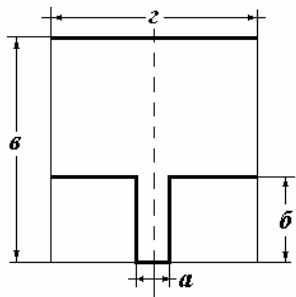


Рис.46. Геометрические параметры расчетной ячейки для оценки их влияния на равномерность распределения тока в углублении на поверхности детали

Упражнение 3. Произвести расчеты для исследования влияния на показатель равномерности распределения тока на детали в гальванической ванне, размеры которой показаны в [2] на рис. 61, при нанесении медного покрытия при изменении в некотором диапазоне (до 100%) размеров a , b , v и z (см. рис 47). Исходными принять размеры ячейки, приведенной в [2] на рис.61. В качестве факторов используйте также размеры анода d и отклонение его положения относительно осевой линии e , (рис. 47).

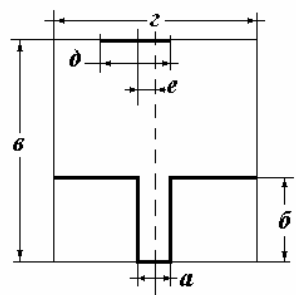


Рис.47. Геометрические параметры расчетной ячейки для оценки их влияния на равномерность распределения тока в углублении на поверхности детали с учетом эксцентриситета e

Упражнение 4. Произвести расчеты для исследования распределения тока на детали в гальванической ванне, размеры которой показаны в [2] на рис. 62, при нанесении медного покрытия на деталь с большим углублением. Сравните

полученную расчетную картину распределения эквипотенциалей с экспериментальной картиной, приведенной в [2] на рис.62. (Пример результатов расчета распределения тока по профилю катода приведен на рис.49.)

Рис.48. Геометрические параметры расчетной ячейки для оценки влияния на равномерность распределения тока в углублении на поверхности детали геометрических характеристик дополнительного анода

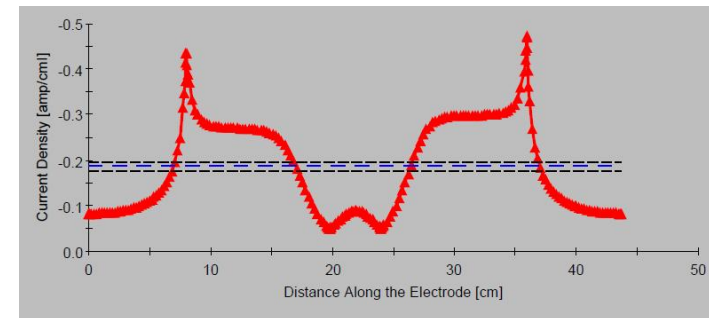
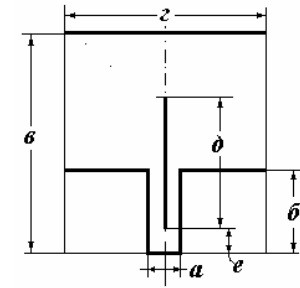


Рис.49. Характер распределения тока в углублении на поверхности детали при использовании вспомогательного анода (размеры расчетной ячейки 300x200 мм)

Упражнение 5. Произвести расчеты для исследования распределения тока на цилиндрической детали с внутренним отверстием, размещенной в гальванической ванне на подвеске с смонтированными на траверсах внутренними анодами (см. в [2] рис.73). Для построения геометрии расчетной ячейки использовать рис. 50. При анализе результатов моделирования обратить

внимание на экранирующий эффект, который оказывают на распределение тока непроводящие траверсы подвески.

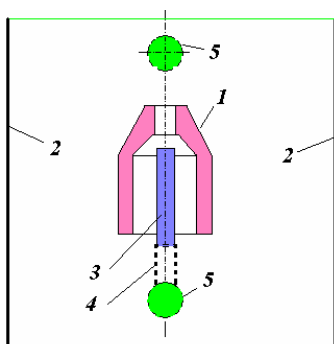


Рис.50. Сечение детали, имеющей внутреннюю полость с покрываемой поверхностью. Данные использовать для формирования геометрических параметров расчетной ячейки при оценке их влияния на равномерность распределения тока на наружной и внутренней поверхностях детали. Учитывать также геометрические характеристики дополнительного анода и экранирующих элементов подвески

Упражнение 6. Используя рис. 27 в [2], построить геометрию расчетной ячейки и произвести расчеты для исследования распределения тока на детали «боковина бампера». Подобрать параметры экрана, отвечающие максимальной равномерности плотности тока.

Упражнение 7. Используя рис.27 в[2], построить геометрию расчетной ячейки и Произвести расчеты для исследования распределения тока на внутренней поверхности вкладыша. Исследовать зависимость показателя равномерности распределения тока на внутренней поверхности вкладыша от значений параметров экрана (***a***, ***b***, ***в***), отвечающих максимальной равномерности плотности тока (использовать прил.2).

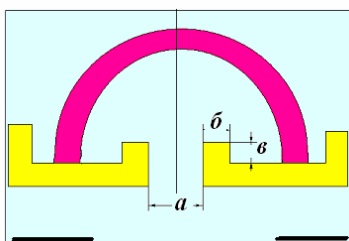
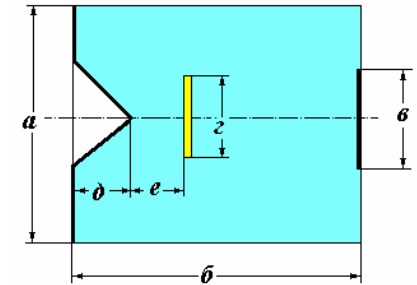


Рис. 51. Схема расчетной ячейки для определения параметров непроводящего экрана, используемого для управления распределением тока на внутренней поверхности вкладыша

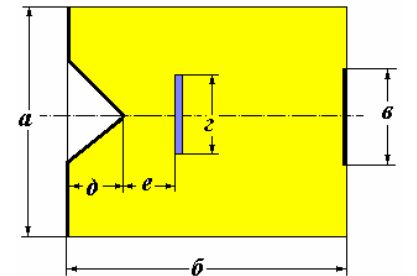
Упражнение 8. Используя прил.2, построить и реализовать план компьютерного эксперимента для оценки влияния геометрических факторов, указанных на рис.52, на равномерность распределения тока на поверхности детали с выступом при использовании для управления распределением тока непроводящего экрана. Номинальные значения факторов согласовать с преподавателем.

Рис.52. Геометрические параметры расчетной ячейки для оценки их влияния на равномерность распределения тока на поверхности детали с выступом при использовании непроводящего экрана



Упражнение 9. Используя прил. 2, построить и реализовать план компьютерного эксперимента для оценки влияния геометрических факторов, указанных на рис.53, на равномерность распределения тока на поверхности детали с выступом при использовании для управления распределением тока проводящего экрана. Номинальные значения факторов согласовать с преподавателем.

Рис.53. Геометрические параметры расчетной ячейки для оценки их влияния на равномерность распределения тока на поверхности детали с выступом при использовании проводящего экрана



Упражнение 10. Используя прил.2, построить и реализовать план компьютерного эксперимента для оценки влияния геометрических факторов, указанных на рис.54, на равномерность распределения тока на поверхности детали с выступом при использовании для управления распределением тока проводящего экрана с изолирующим покрытием со стороны детали. Номинальные значения факторов согласовать с преподавателем.

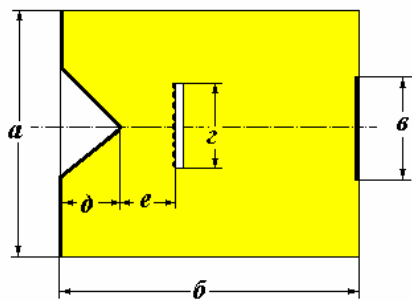


Рис.54. Геометрические параметры расчетной ячейки для оценки их влияния на равномерность распределения тока на поверхности детали с выступом при использовании проводящего экрана с изолирующим покрытием со стороны детали

Литература:

4. Гальванические покрытия в машиностроении: Справочник. М. Машиностроение. - Т.2- С. 167.
5. Андреев И.Н. Технологическая оснастка для гальванических линий (подвески, анодные корзины и погружные электрохимические модули) /Казан.гос.технолог. ун-та. Казань, 2006.- 112 с.

Работа 8. Оценка равномерности распределения тока на индикаторных электродах ячеек сравнения

Цель работы – ознакомиться с приемами применения пакета программ **Cell-Design** для расчета распределения тока на индикаторных электродах ячеек, используемых при мониторинге состояния электролитов для электроосаждения металлов и сплавов, а также при измерении рассеивающей способности электролитов.

Ячейки сравнения используют для измерения рассеивающей способности электролитов [1-13], а также для мониторинга состояния электролита по рабочим параметрам. Например, в [2] приводится методика определения допустимой катодной плотности тока. По результатам одного эксперимента с использованием ячейки с индикаторным электродом, на котором плотность тока изменяется в широком диапазоне, после осаждения в течение одного часа можно определить длину участка бездефектного покрытия. Расчетом определяют плотности тока, соответствующие границам качественного покрытия, и таким образом устанавливают режим работы гальванической ванны. Процедуру определения допустимой плотности тока с использованием угловой ячейки иллюстрирует рис. 55 применительно к ячейке Хулла.

Для решения такой задачи могут быть использованы и другие ячейки, на индикаторном электроде которых плотность тока изменяется в некотором диапазоне. Далее приведены упражнения, позволяющие усвоить приемы расчетов распределения тока на индикаторном и вспомогательном электродах некоторых наиболее часто используемых в практике электрохимических измерительных ячеек. Конструкции таких ячеек постоянно совершенствуются в направлении расширения их функциональности [13].

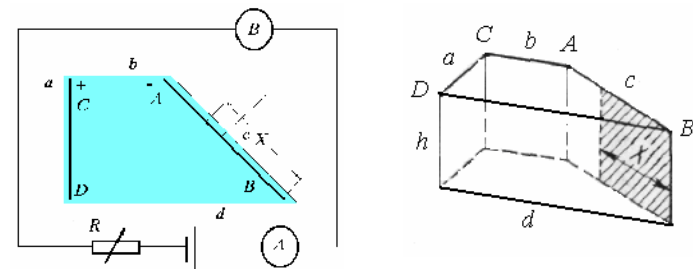


Рис. 55. Схема электролитической ячейки Хулла: a (CD) - анод; c (AB) - катод; b , d - боковые стороны; x - длина пластины с качественным покрытием; A - амперметр; B - вольтметр; R - реостат

Упражнение 1. Произвести расчеты для исследования распределения тока на индикаторных электродах в ячейке с разноудаленными плоскопараллельными электродами при нанесении медного покрытия. Рассчитайте показатель T (см. работу 1), сравните полученные результаты с результатами расчета с использованием ПД – портрета.

Упражнение 2. Произвести расчеты для исследования распределения тока на индикаторных электродах в ячейке с разноудаленными плоскопараллельными электродами (ячейка Филда, размеры указывает преподаватель) при нанесении медного покрытия.

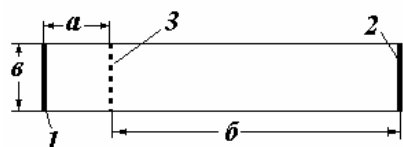


Рис. 56. Схема ячейки с разноудаленными плоскопараллельными электродами (Херинга-Блюма): 1 и 2 – индикаторные электроды; 3 – перфорированный анод

ассчитать показатель T (см. работу 1), сравнить полученные результаты с результатами расчета с использованием ПД – портрета.

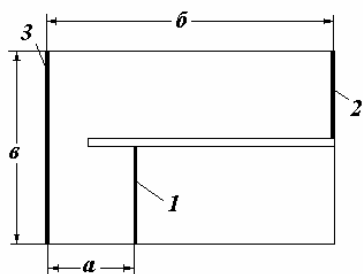
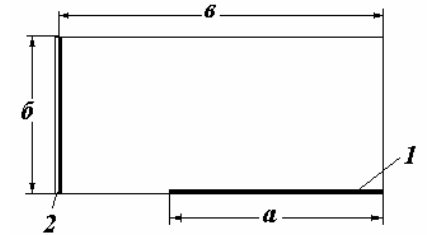


Рис. 57. Схема ячейки с разноудаленными плоскопараллельными электродами (ячейка Филда): 1 и 2 – индикаторные электроды; 3 – анод

Упражнение 3. Произвести расчеты для исследования распределения тока на индикаторном электроде в прямоугольной

ячейке с взаимно перпендикулярными электродами (размеры указывает преподаватель) при нанесении медного покрытия. Сравнить полученные результаты с результатами в [11].

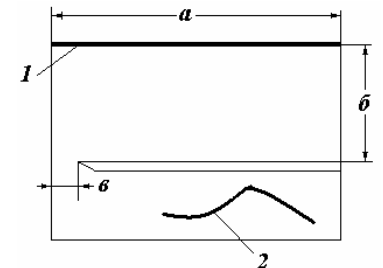
Рис. 58. Схема прямоугольной ячейки с взаимно перпендикулярными электродами: 1 индикаторный электрод; 2 - анод



Упражнение 4. Произвести расчеты для исследования распределения тока на индикаторном электроде щелевой ячейки (рис.59), размеры которой $a = 10$, $b = 3$, для условий нанесения медного покрытия. Сравните полученные результаты с результатами, приведенными в [4].

Упражнение 5. Произвести расчеты для исследования распределения тока на индикаторном электроде ячейки Хулла (рис.60) для условий нанесения медного покрытия. Размеры расчетных ячеек: при объеме 250 мл $b=64$ мм, $v=48$ мм, $a=127$ мм, и высота равна 65 мм, при объеме 1000 мл: $b=85$ мм, $v=120$ мм, $a=212$ мм, и высота равна 85 мм. Сравнить полученные расчетные данные с данными, приведенными в [2].

Рис. 59. Схема щелевой ячейки: 1 – индикаторный электрод; 2 - анод



Упражнение 6. Произвести расчеты для исследования распределения тока на индикаторном электроде круговой ячейки

(рис.60), размеры которой $a = 1,0$, $r = 20$, для условий нанесения медного покрытия.

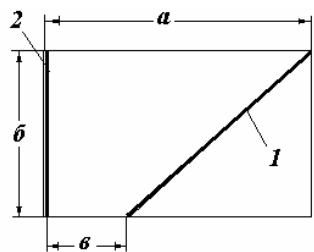


Рис. 60. Схема угловой ячейки. 1 – индикаторный электрод, 2 – анод

Сравнить полученную расчетную картину распределения тока с результатами распределения тока на индикаторных электродах в щелевой и угловой ячейках. Сопоставить результаты расчетов с экспериментальными данными, приведенными в [14] на рис.226.

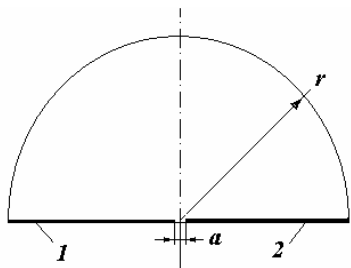


Рис. 61. Схема круговой ячейки с плоскими электродами: 1 – индикаторный электрод; 2 – анод

Литература:

1. Гальванические покрытия в машиностроении: Справочник. М. Машиностроение. -Т.2- С. 167.
2. Герасименко А.А., Микитюк В.И. Определение параметров электрохимических процессов осаждения покрытий. М. Металлургия, 1980. 111с.
3. Андреев И.Н. Технологическая оснастка для гальванических линий (подвески, анодные корзины и погружные электрохимические модули) /Казан.гос.технол. ун-та. Казань, 2006.-112 с.
4. Давыденко А.А., Поддубный Н.П. Электрохимия, 1978, - Вып.11, 1728с.

5. Начинов Г. Н., Кудрявцев Н. Т. Тр. МХТИ им. Д. М. Менделеева, -М., 1973, вып. 75, - С. 197.
6. Hering H. E., Blum B. Trans. Am. Electrochem. Soc, 1923, vol. 44, p. 313.
7. Heatley A. H. Trans. Am. Electrochem. Soc, 1923, vol. 44, p. 283.
8. Fild S. J. Electrodeposit. Techn. Soc, 1931, vol. 7, p. 83.
9. Esih J. Metalloberflache, 1969, Bd 23, S. 161.
10. Герасименко А. А., Слотин Ю. С. Электрохимия, - 1975. _ Вып 1, с. 110.
11. Андреев И.Н., Кайдриков Р.А., Кушниковская Г.А. Защита металлов, Ячейка с перпендикулярными электродами для оценки электролитов барабанных ванн. /Защита металлов. 1985. вып.3. С.461.
12. Валеев Н.Н., Андреев И.Н. О новом показателе рассеивающей способности. // Журн. прикл. хим.- 1988. - Т. № 9. - С. 2136.
13. Андреев И.Н., Гудин Н.В. Удобная ячейка для измерения комплекса электрохимических параметров электролитов// Некоторые вопросы теории и практики использования в гальванотехнике неядовитых электролитов. КХТИ. Казань, 1964.- С. 160.
14. Ваграмян А.Т., Соловьева З.А. Методы исследования электроосаждения металлов. М.: Из-во АН СССР, 1960.448 с.

Работа 9. Оценка равномерности распределения тока на электродах ячеек произвольной формы

*Цель работы – ознакомиться с некоторыми задачами, которые были предметом исследований отечественных электрохимиков, путем воспроизведения части полученных ими результатов с использованием пакета программ **Cell-Design** для расчета распределения тока на электродах авторских ячеек.*

Исследования проблемы распределения тока в электрохимических объектах и равномерности гальванических покрытий имеют в отечественной науке продолжительную историю. В данной работе предлагается познакомиться с некоторыми задачами, которые решались авторами многочисленных публикаций [1-9] в этой области на основе использования исследовавшихся ими объектов в качестве расчетных ячеек для решения задач в пакете **Cell-Design**.

Упражнение 1. Произвести расчеты для исследования распределения тока на электродах в электрохимической ячейке, рассматривавшейся Ивановым В.Т. [4] При расчете принять размеры электродов, приведенные на рис.62 по указанию преподавателя. Сравнить полученную расчетную картину распределения эквипотенциалей и тока на электродах с результатами работы [4].

Произвести расчеты для исследования распределения тока на электродах в той же электрохимической ячейке, но при измененной полярности электродов. Проанализировать причины расхождения результатов расчетов в этих случаях (используя рис.63 и 64).

Упражнение 2. Произвести расчеты для исследования распределения тока на электродах в электрохимической ячейке, рассматривавшейся Машовцом В.П. [2]. При расчете принять размеры электродов, приведенные на рис.65, по указанию преподавателя. Сравнить полученную расчетную картину распределения эквипотенциалей и тока на электродах с результатами, показанными в [2] на рис.181. Результаты расчета приведены на рис. 66.

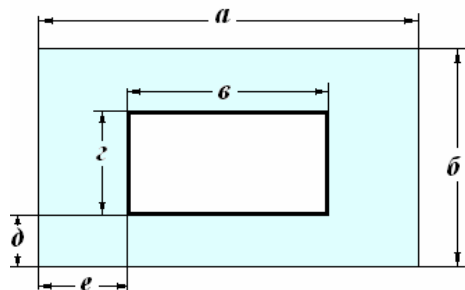


Рис. 62. Схема расчетной ячейки, использованной в работе [4] (внутренний электрод – анод)

Упражнение 3. Произвести расчеты для исследования распределения тока на электродах в электрохимической ячейке, рассматривавшейся Н.П. Федотьевым и А.И. Евстюхиным [2]. При расчете принять размеры электродов, приведенные на рис.67.

Сравните полученную расчетную картину распределения эквипотенциалей и тока на электродах с результатами, показанными в [2] на рис.179, учитывая и рис. 68.

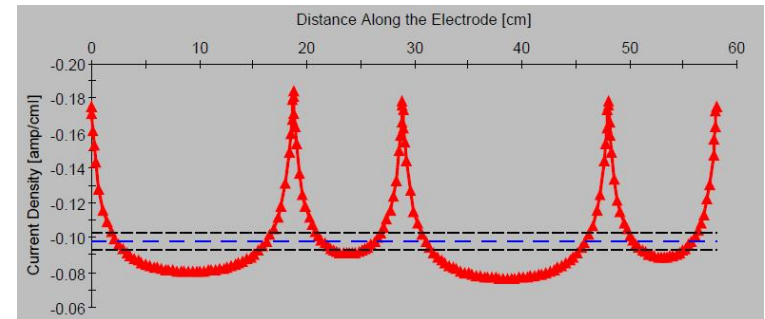


Рис.63. Характер распределения тока в на поверхности внутреннего катода в прямоугольной ячейке, использованной В.Т. Ивановым[4] (размеры расчетной ячейки 300x200 мм)

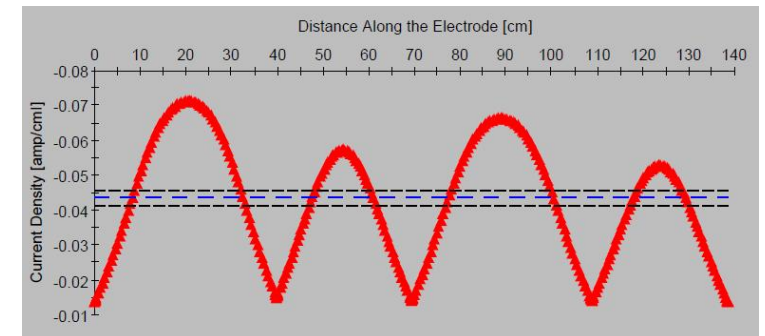


Рис.64 Характер распределения тока в на поверхности внешнего катода в прямоугольной ячейке, использованной В.Т. Ивановым[4] (размеры расчетной ячейки 300x200 мм)

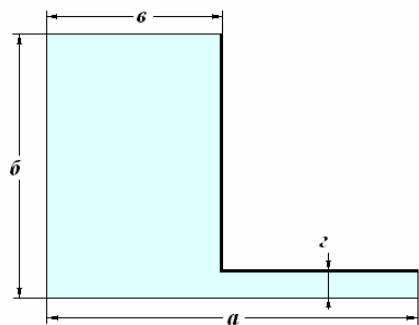


Рис. 65. Схема ячейки с двумя угловыми электродами (В.П. Машовец [2]) (малый электрод – анод)

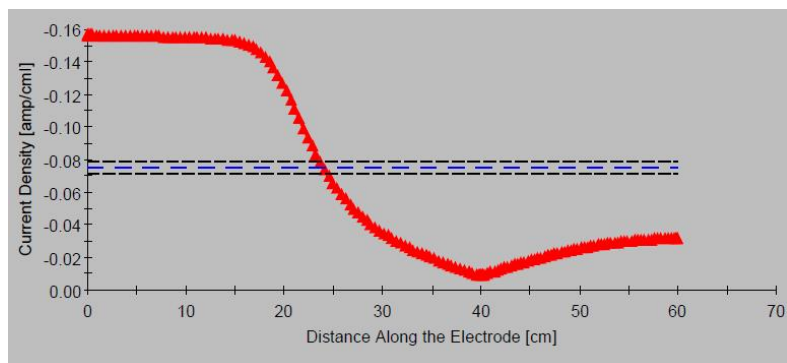


Рис.66. Характер распределения тока на поверхности катода в ячейке Машовца (размеры расчетной ячейки 300x200 мм)

Упражнение 4. Произвести расчеты для исследования распределения тока на электродах в электрохимической ячейке, рассматривавшейся А.Т. Вагряном [2]. При расчете принять размеры электродов, приведенные на рис.69. Сравнить полученную расчетную картину распределения эквипотенциалей и

тока на электродах с результатами, приведенными в [2] на рис.182.

Рис. 67. Схема ячейки, которую использовали Н.П. Федотьев и А.И. Евстюхин [2]

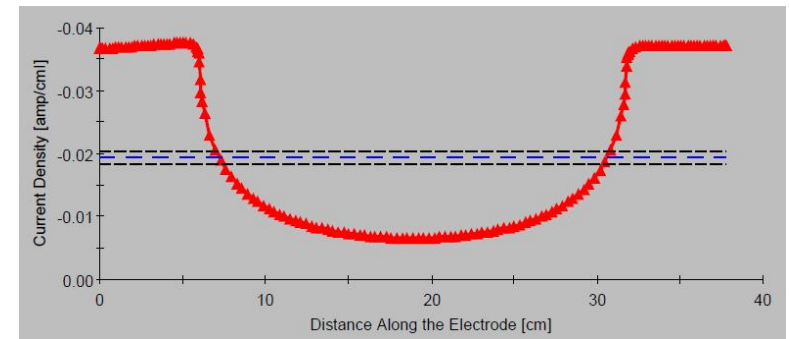
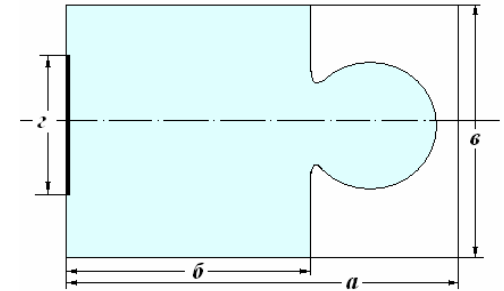


Рис.68. Характер распределения тока на поверхности сложно профилированного катода в ячейке Федотьева - Евстюхина. (размеры расчетной ячейки 300x200 мм)

Упражнение 5. Произвести расчеты для исследования распределения тока на электродах в электрохимической ячейке, рассматривавшейся Кудрявцевым Н.Т. [2]. При расчете принять размеры электродов, приведенные на рис.70. Сравнить

полученную расчетную картину распределения эквипотенциалей и тока на электродах с результатами, приведенными в [2] на рис.228.

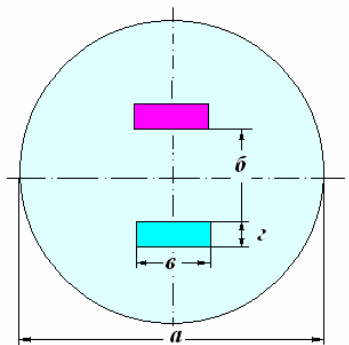


Рис. 69. Схема цилиндрической ячейки с электродами прямоугольного сечения, использовавшейся А.Т.Вагряном для изучения процесса меднения [2]

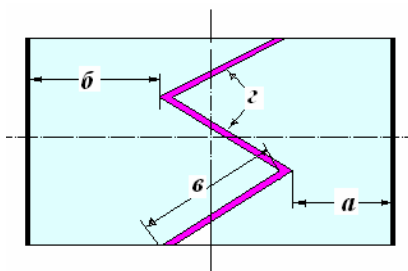


Рис. 70. Схема прямоугольной ячейки с угловым двухсторонним катодом, использовавшейся Н.Т.Кудрявцевым для изучения процесса цинкования [2]

Литература:

1. Гальванические покрытия в машиностроении. Справочник. Т.2. // М. Машиностроение. -1985.стр. 167.
2. Вагрян А.Т., Соловьева З.А. Методы исследования электроосаждения металлов. - М.: Из-во АН СССР, 1960. - 448 с.
3. Каданер Л.И. Равномерность гальванических покрытий. - Харьков: Из-во Харьковск. ун-та, 1960.
4. Иванов В.Т. Электрохимия, 1972. Вып.11.-.1654с.
5. Машовец В.П., Форсблом Г.В. Журн. прикл. хим.1954. Вып.3, с.280.
6. Федотьев П.П., Евстюхин А.И. Ж. общей химии. - 1942. Вып 1. С. 12.

7. Машовец В.П. Тр. II. Всесоюзной конф. по теоретической и прикладной электрохимии. Киев: Изд. АН УССР 1949. С. 230.
8. Машовец В.П. Методы исследования электрического поля в растворах. // Ж. прикл. химии. 1950. Т.23, № 1. С. 230.
9. Ibl N. Current distribution// *Comprehensive Treatise of Electrochemistry*. - N-Y, London, 1983. V. 6. p.239.

Работа 10. Оценка влияния распределения тока на электродах на метрологические характеристики датчиков плотности тока

*Цель работы – ознакомиться с некоторыми задачами, которые возникают при выборе формы, размеров и положения мерного датчика в межэлектродном пространстве гальванической ванны, на основе моделирования с использованием пакета программ **Cell-Design** для расчета распределения тока на основных электродах и датчике.*

В гальванотехнической практике для контроля токового режима технологического процесса иногда используют метод эталонного датчика [1]. Суть его состоит в том, что вместе с деталями в ванну опускается дополнительный электрод известной площади, который включают в электрическую цепь параллельно с подвеской. Общий ток на подвеску устанавливается так, чтобы на датчике обеспечивалась заданная плотность тока. Однако при этом необходимо считаться с тем, что показания датчика зависят от выбора его положения, геометрии индикаторной поверхности датчика и геометрии деталей и их размещения в рабочем поле подвески. При решении задач проектирования систем контроля плотности тока с использованием эталонного датчика может быть использован пакета программ **Cell-Design**. В работе 10 предлагается несколько упражнений на эту тему.

Упражнение 1. Произвести расчеты для оценки тока на эталонном датчике плотности тока и общей плотности тока на деталях, находящихся на подвеске для случая, когда в качестве эталонного датчика используется одна из деталей, размещенных на однорядной подвеске.

Упражнение 2. Произвести расчеты для оценки тока на эталонном датчике плотности тока и общей плотности тока на

деталей, находящихся на подвеске, для случая, когда в качестве эталонного датчика используется верхняя деталь из симметрично размещенных на двухрядной подвеске деталей.

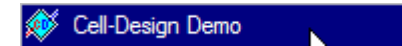
Упражнение 3. Произвести расчеты для оценки тока на эталонном датчике плотности тока и общей плотности тока на деталях, находящихся на подвеске, для случая, когда в качестве эталонного датчика используется нижняя деталь, из размещенных в шахматном порядке на двухрядной подвеске деталей.

Литература:

1. Захаров В.И. Локальные системы управления АЛГ// Гибкие автоматизированные гальванические линии: Справочник / Под ред. В.Л. Зубченко. М.: Машиностроение, 1989. - 515 с..

Приложение 1. Приемы работы с пакетом Cell – Design при расчете распределения тока на электродах ячеек с произвольными границами

Для запуска программы нажмите кнопку **Пуск**, далее выберите **Программы**, кликните левой кнопкой мыши на **Cell-Design Demo**.



Откроется окно программы, нажмите кнопку **Start**. Далее появится окно, запрещающее использовать данную версию программы в коммерческих целях.

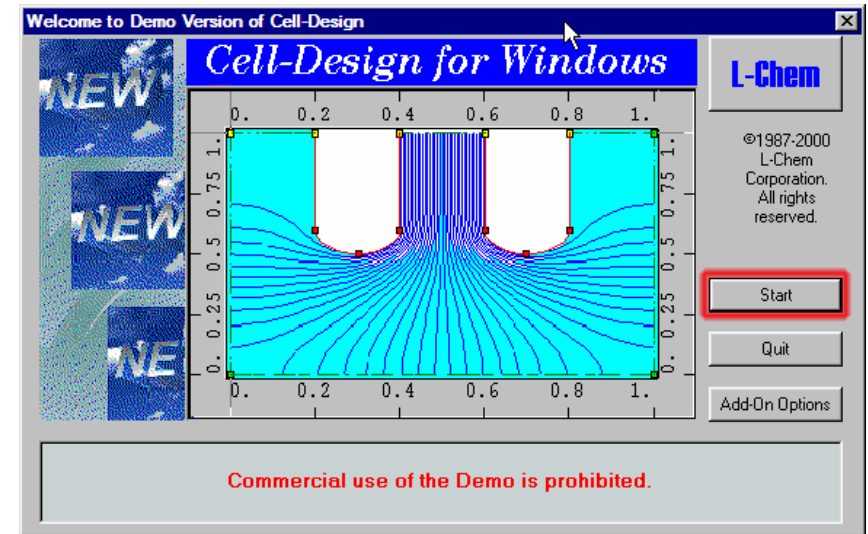


Рис. П1-1

Нажмите кнопку **OK**.

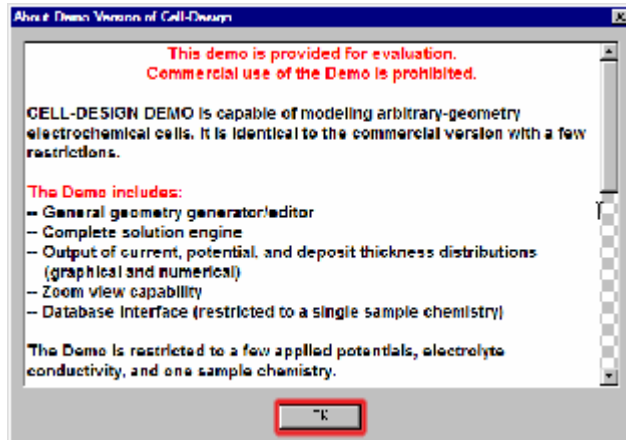


Рис. III-2

При запуске нам предлагают прочитать советы, для более эффективной работы с программой. Чтобы данное окно не появлялось снова при следующем запуске, снимем галочку **Show Tips on StartUp**. Для закрытия этого окна нажмите кнопку **Close**.

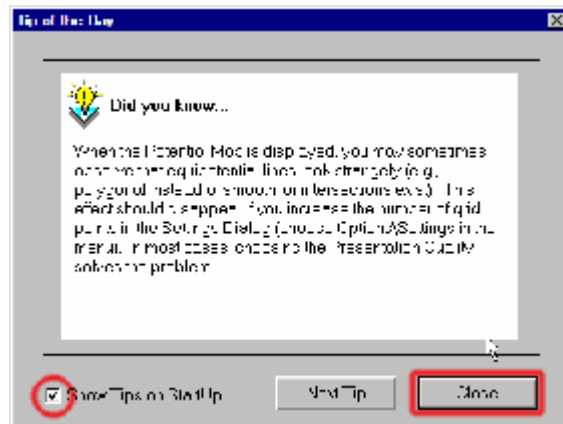


Рис. III-3

Следующее открывшееся окно представляет собой краткий обучающий курс по использованию программы. Чтобы пропустить обучение нажмите кнопку **Skip Tutorial**, для того, чтобы данное предложение не появлялось при следующем запуске, снимите галочку **Show this screen on StartUp**.

Наконец то мы попали в основное окно программы **Cell-Design**.

Приступим к моделированию процессов, происходящих в гальванической ванне.

Для начала нажмите кнопку **New**, данная команда может быть также вызвана через меню **File -> New** или с помощью горячей клавиши **Ctrl-N**.



Рис. III-4

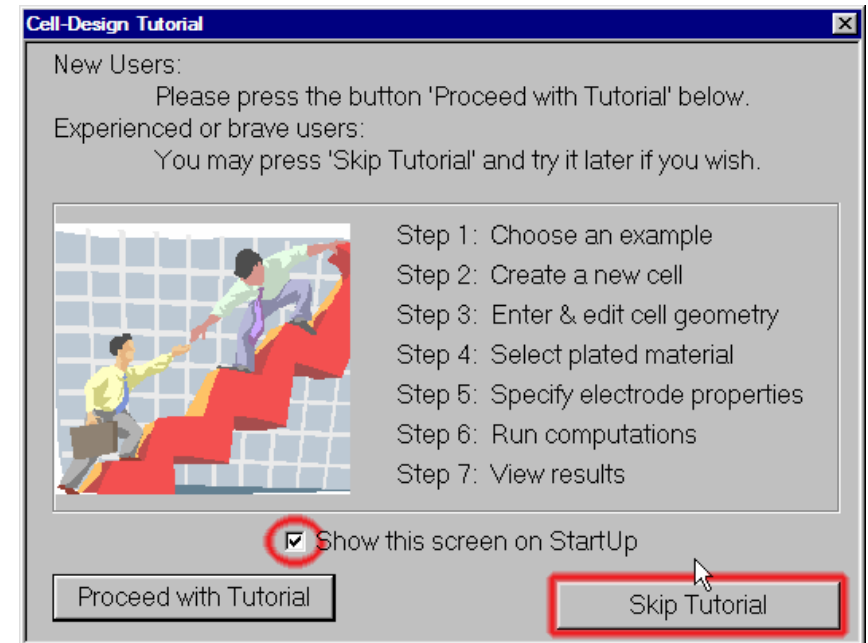


Рис. III-5

В появившемся окне **Cell Layout** на закладке Dimensions впишите размеры вашей ячейки, единицы измерения могут быть выбраны с помощью выпадающего меню. В этом же окне на закладке **Position** сместите ячейку относительно начала координат, задав координаты нижнего левого угла ячейки.

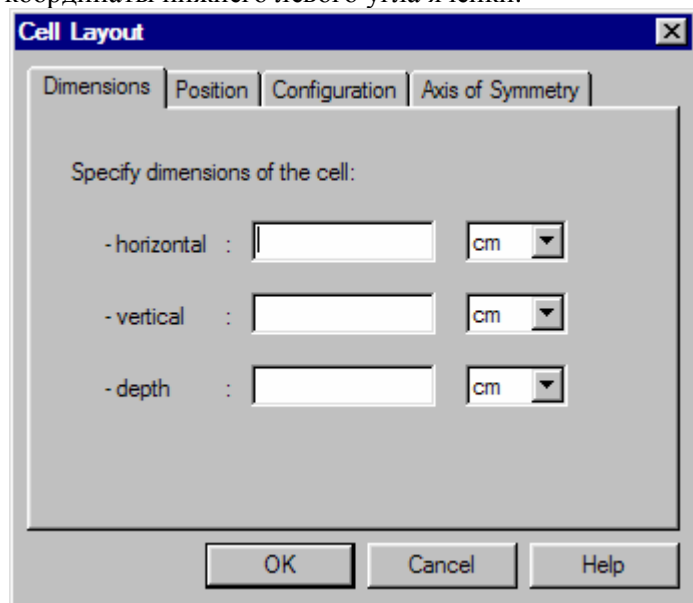


Рис. III-6

Мы ввели следующие размеры ячейки по горизонтали, по вертикали и глубине: 6, 3 и 3 см, соответственно. Вы можете изменить геометрические размеры вашей ячейки, вызвав данное окно нажатием кнопки **Cell Layout**.



Рис. III-7

Нанесите линии, соответствующие электродам и непроводящим стенкам ячейки. Для этого кликнем левой кнопкой мыши в левом верхнем углу нашей ячейки – должен появиться зеленый квадрат, показывающий начало линии. Затем следует указать, что началом электрода или изолятора будем данный квадрат. Для этого нажмите кнопку с буквой **I** (изолятор) или **E** (электрод).



Рис. П1-8

Вначале выберите **I** (изолятор), далее выберите тип линии (прямая линия или дуга), в нашем случае – прямая. После выбора кнопки с изображенной стрелкой у нас появится линия, для которой надо указать конечную точку. Для того чтобы линия была параллельна оси координат, установите галочку в пункте меню **Cell -> Geometry -> Snap Along Axes**.

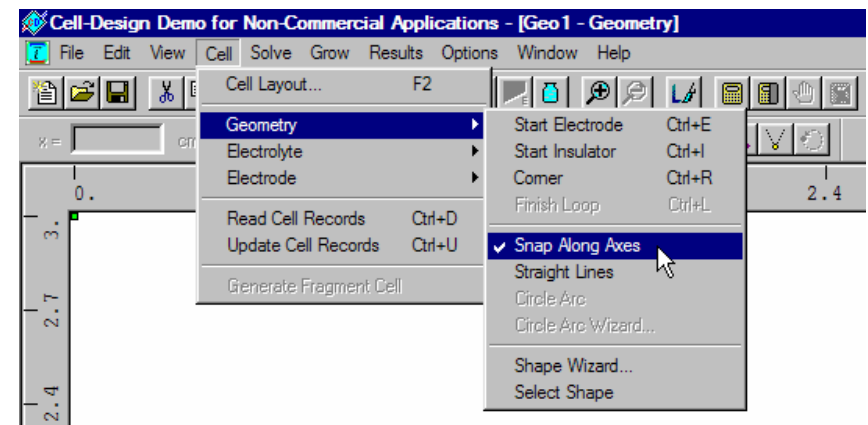


Рис. П1-9

Доведите курсор мыши приблизительно до точки с координатой по оси x , равной 1,2 см и нажмите левую кнопку

мыши. Появилась линия, изображающая изолятор, с начальной точкой желтого цвета и конечной - зеленого.

Далее изобразите электрод полукруглой формы. Для этого нажмите на кнопку с буквой **E**, тем самым, задав начало электрода, и нажмите кнопку с полукруглой стрелкой.

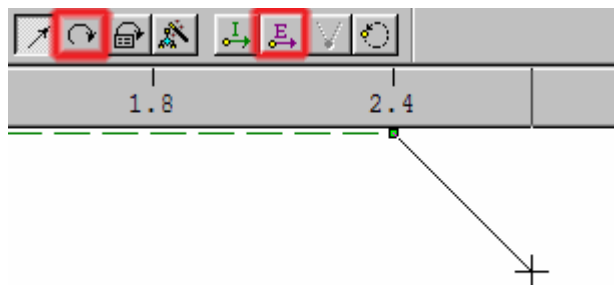


Рис. П1-10

Появляется линия с дополнительной точкой посередине. Доведите линию до точки с координатой по x , равной 2,4 см, и нажмите левую кнопку мыши. Курсор должен сместиться на среднюю точку линии. Теперь, двигая курсором, мы можем менять форму дуги. Поместите курсор в точку с координатами [1,8; 2,4] и нажмите на левую кнопку мыши. Должен появиться красный полукруг (красным цветом в **Cell-Design** отображаются границы электродов, а зеленым – изоляторов).

Теперь продолжите прямую линию, но это уже будет изолятор. Нажмите кнопку с буквой **I**, и выберите кнопку с прямой линией. Также чтобы линии были прямыми, не забудьте поставить галочку в пункте меню **Cell -> Geometry -> Snap Along Axes**. Продолжите строить нашу ячейку. Пришло время боковой проводящей стенки. Выберите кнопку с буквой **E**, и затем кнопку с прямой линией. Проводите линию до нижнего правого угла и нажмите левую кнопку мыши – электрод готов.

Теперь снова у нас на очереди изолятор. Нажмите кнопку с буквой **E**. Кнопку с прямой линией нажимать не надо, так как она

уже нажата. Доведите курсор до точки с координатой по оси x , равной 4,8 см, и нажмите левую кнопку мыши. Далее нарисуйте полукруглый электрод. Для этого нажмите кнопку с буквой **E**, и кнопку с полукруглой стрелкой. Не забываем снять галочку в пункте меню **Cell** -> **Geometry** -> **Snap Along Axes**. Доводим курсор до точки с координатой по x , равной 3,6 см и нажмите левую кнопку мыши. Теперь помещаем курсор в точку с координатами [4,2; 0,7] и нажмите левую кнопку мыши. Должен появиться красный полукруг, являющийся нашим электродом.

Достройте нижнюю сторону ячейки. Для этого нажмите кнопку с буквой **I**, далее - кнопку с прямой стрелкой, а также поставьте галочку в пункте меню **Cell** -> **Geometry** -> **Snap Along Axes**. Доведите курсор до нижнего левого угла и нажмите левую кнопку мыши. Появится зеленая пунктирная линия, изображающая непроводящую поверхность.

Завершите построение ячейки, нажав кнопку с буквой **E**, а затем кнопку, с изображением замкнутой круглой стрелки. Линия автоматически соединится с начальной точкой, замкнув контур ячейки. Создание модели ячейки закончено.

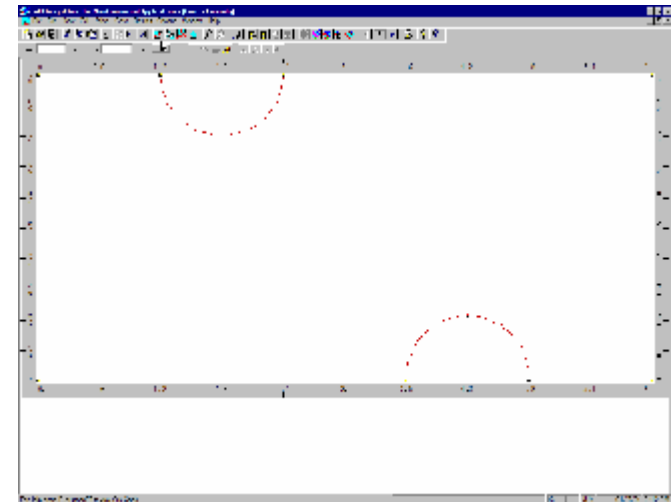


Рис. П1-11

Заметим, что ввод координат линий также может осуществляться напрямую с помощью полей для ввода и нажатия кнопки **Input**.

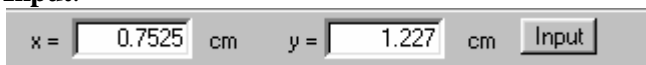


Рис. III-12

Выберите электролит. Для этого нажмите кнопку **Chemistry**, появится одноименное окно, разделенное на две части. В левой части находятся группы электролитов для определенного металла, при выборе которых можно указать тип электролита.



Рис. III-13

Выберите сернокислый электролит меди, для этого выберите в левом столбце медь – **Copper**, в правом – **Acid 0.24M Cu/1.0M H2SO4**, нажмите кнопку **OK**.

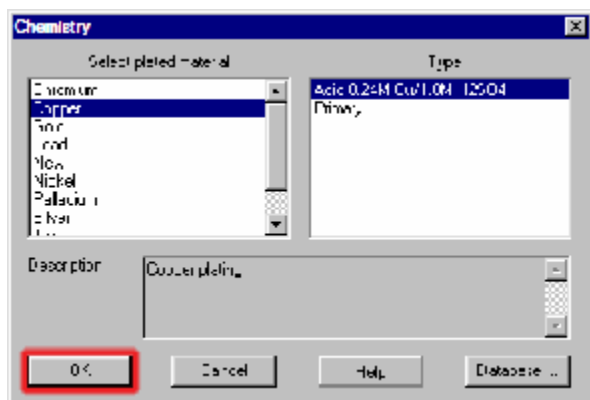


Рис. III-14

Появляется окно для выбора распределения тока (первичное или вторичное), выбираем вторичное – **Secondary Distribution**. Снова нажмите **OK**.

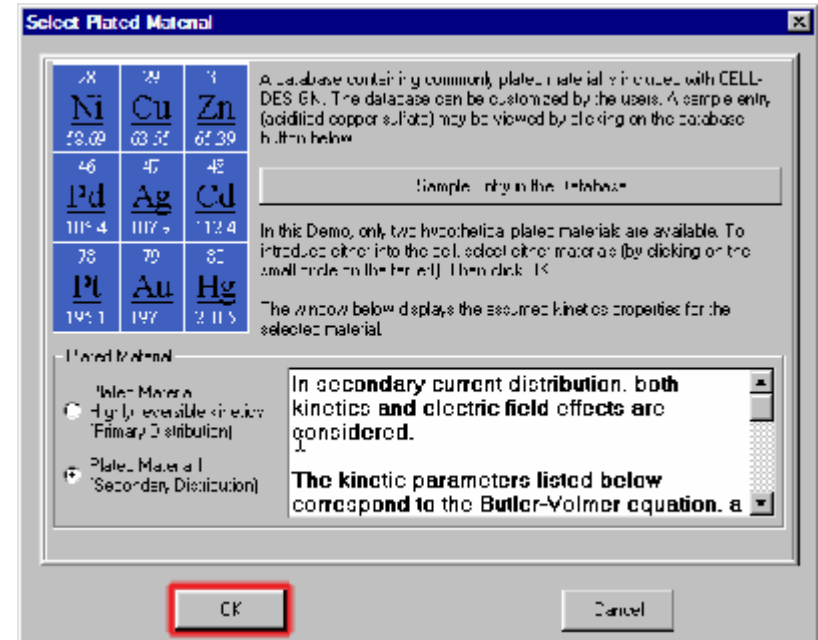


Рис. П1-15

Теперь задайте свойства электрода. Для этого нажмите кнопку **Electrode Properties**. В появившемся окне можно, выбирая участки ячейки, которые были помечены как электроды, задавать потенциалы на них.



Рис. П1-16

В нашем случае первый и третий электроды будут катодами, а второй и четвертый – анодами. Поэтому для первого и

третьего электродов в поле **Voltage** поставьте значение, равное **0** В, для второго и четвертого – **1** В.

После введения всех значений, нужно нажать кнопку **OK**.

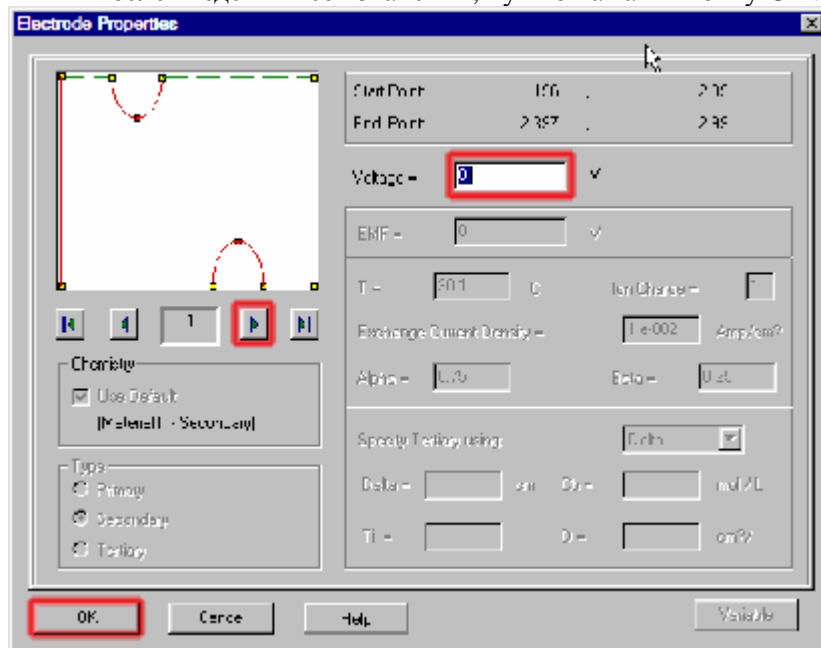


Рис. III-17

Для запуска процесса расчета нажмите кнопку **Solve**. Внизу появится индикатор завершенности процесса. Когда процесс интегрирования успешно завершится, фон в ячейке поменяет цвет на голубой.



Рис. III-18

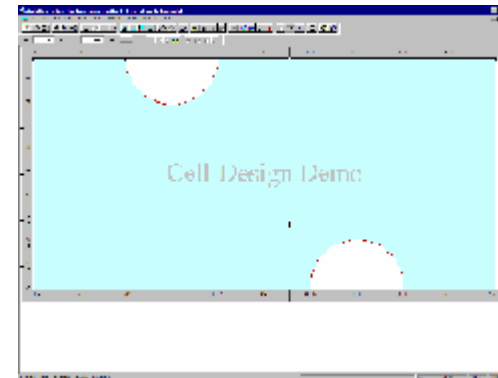


Рис. ПИ-19

Теперь можно изучать результаты интегрирования. Нажмите кнопку **Potential map** для просмотра картины эквипотенциалей.



Рис. ПИ-20

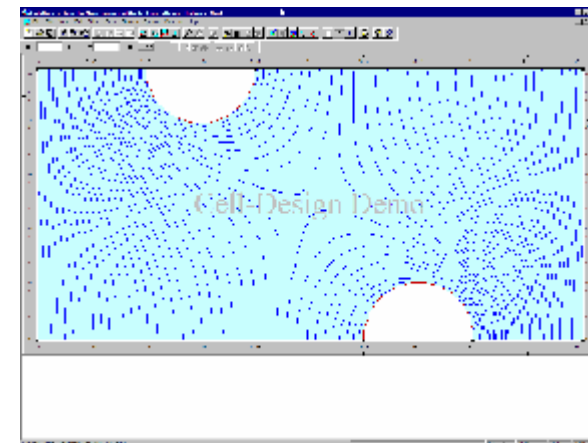


Рис. ПИ-21

Для просмотра распределения тока нажмите кнопку **Current distribution**.



Рис. III-22

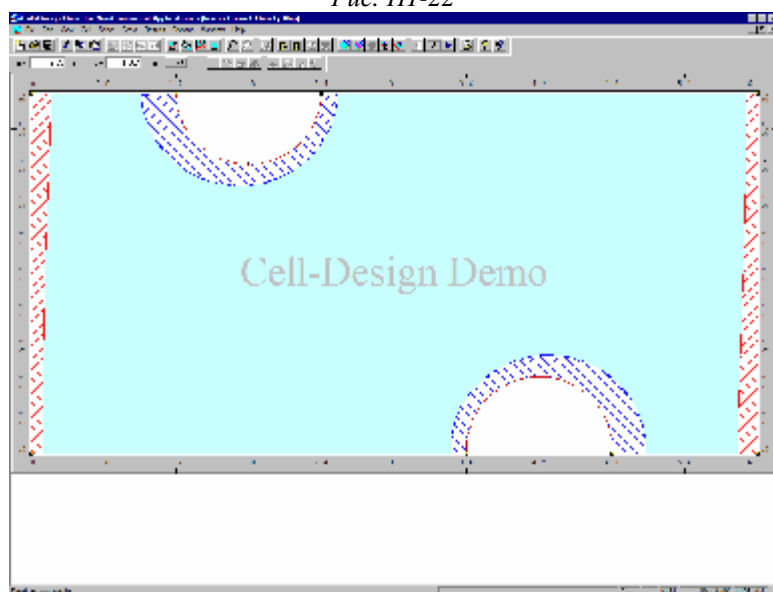


Рис. III-23

Для вывода подробных результатов нажмите кнопку **Detailed results**. В данном окне можно просмотреть подробные данные для каждого электрода. На первой закладке **General** мы видим суммарный ток на электроде, суммарный ток в ячейке, плотность тока на электроде и толщину покрытия на выбранном электроде.



Рис. III-24

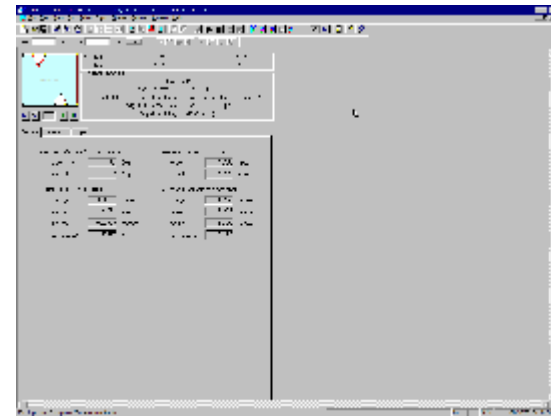


Рис. П1-25

На второй закладке **Point Values** представлены значения тока, потенциала и толщины покрытия в конкретных точках выбранного электрода.

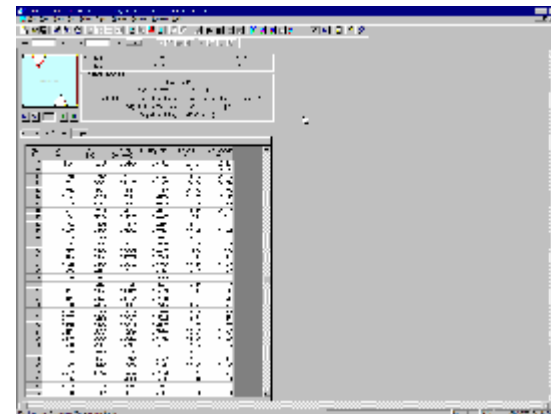


Рис. П1-26

На третьей закладке эти же данные представлены в графическом виде.

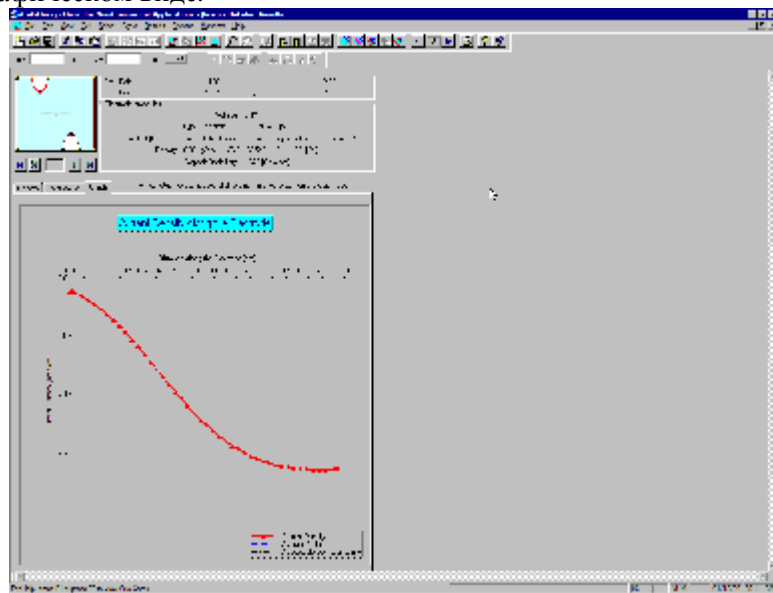


Рис. ПП-27

Более подробные сведения о возможностях пакета **Cell-Design** приобретаются по мере накопления опыта работы с ним.

Приложение 2. Приемы планирования компьютерного эксперимента для моделирования равномерности распределения тока и оптимизации параметров подвесочных устройств¹

Полный факторный эксперимент

В последнее время для моделирования и оптимизации различных процессов широко применяются методы активного планирования эксперимента. С их помощью исследователь проводит эксперимент по заранее составленному плану при минимальных затратах на получение необходимых данных об изучаемом объекте и его оптимизацию. При этом считается, что сведения о механизмах процессов, протекающих внутри объекта, отсутствуют. Модель составляется по значениям входных и выходных переменных. При решении оптимизационных задач к традиционным четырем этапам моделирования (проведение эксперимента, выбор вида модели, определение параметров модели, проверка адекватности) добавляется еще этап оптимизации. В активном эксперименте первые два этапа моделирования взаимосвязаны, т.е. план проведения эксперимента зависит от того, какая выбрана модель. Обычно математическая модель объекта в многофакторных задачах записывается в виде полинома некоторой степени (в зависимости от требуемой точности):

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{j=1}^{k-1} \sum_{l=j+1}^k b_{jl} x_j x_l + \sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2 + \dots, \quad (1)$$

где y – выходная переменная (целевая функция, или параметр оптимизации); x_j – входные переменные, или факторы ($j = 1, k$); k – число факторов. Точные значения коэффициентов уравнения (1) определить невозможно, поэтому вместо истинных значений коэффициентов b отыскиваются их оценки b . Тогда (1) переписывается в виде

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{j=1}^{k-1} \sum_{l=j+1}^k b_{jl} x_j x_l + \sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2 + \dots \quad (2)$$

¹ Подготовлено доц. Н.Н.Валеевым

Уравнение (2) называется уравнением регрессии, а коэффициенты b_0, b_j, b_{jl}, b_{jj} – коэффициентами регрессии [3]. При первоначальном исследовании объекта обычно применяют линейное уравнение регрессии

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k . \quad (3)$$

С тем чтобы коэффициенты регрессии можно было определить независимо друг от друга и по более простым формулам, эксперимент должен удовлетворять следующим требованиям:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N x_{ji} &= 0, \quad j = \overline{1, k}, \\ \sum_{i=1}^N x_{ji}^2 &= N, \quad j = \overline{1, k}, \\ \sum_{i=1}^N x_{ji} x_{li} &= 0, \quad j \neq l, \end{aligned} \quad (4)$$

где N – количество экспериментальных точек. Всем требованиям (4) удовлетворяет так называемый полный факторный эксперимент (ПФЭ), в ходе которого каждый фактор варьируется на определенном числе уровней. Для линейного планирования достаточно того, чтобы каждый фактор варьировался на двух уровнях, т.е. принимал в ходе эксперимента два различных значения.

Чтобы удовлетворить требованиям (4), присвоим факторам некоторые условные значения: на верхнем уровне – (+1), на нижнем – (–1), которые можно получить из реальных переменных x_j выбором начального значения каждого фактора x_{j0} и интервала его варьирования Dx_j :

$$\bar{x}_j = \frac{x_j - x_{j0}}{\Delta x_j} . \quad (5)$$

В дальнейшем условные переменные будем обозначать тем же символом x_j . На примере двух факторов рассмотрим, как составляется таблица ПФЭ, называемая матрицей планирования. В системе координат x_1 – x_2 два уровня каждого фактора

представляют собой две пары взаимно перпендикулярных прямых, которые имеют четыре точки пересечения (рис.1). Следовательно, число опытов $N = 4$.

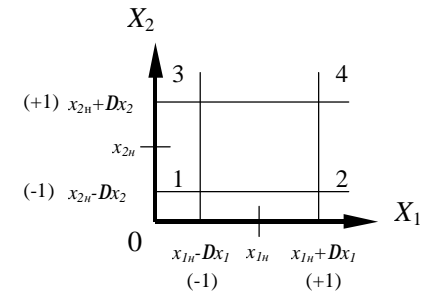


Рис.1. Геометрическая иллюстрация ПФЭ при $k = 2$

Составим матрицу планирования ПФЭ, записав координаты точек пересечения в условных переменных (табл.1). В общем случае число опытов ПФЭ $N = 2^k$.

Таблица 1

№ опыта	X_1	X_2	Y
1	-1	-1	y_1
2	+1	-1	y_2
3	-1	+1	y_3
4	+1	+1	y_4

Для составления матрицы планирования используем следующий прием. В первом столбце значения (-1) и (+1) чередуются (цифра 1 обычно опускается и остаются только знаки), а в каждом следующем – чередование знаков в два раза реже, чем в предыдущем. В результате проведения эксперимента по матрице планирования получаем соответствующие значения целевой функции y_i , ($i = 1, N$).

Расчет коэффициентов уравнения (3) – третий этап моделирования - осуществляем по формуле

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} y_i}{N}, j = \overline{1, k}. \quad (6)$$

Причем b_0 находим как среднее арифметическое всех y_i ($i = 1, N$). Полученные коэффициенты регрессии необходимо проверить на значимость, т.е. оценить величину влияния каждого фактора на значение функции цели. Если эта величина соизмерима с ошибкой эксперимента, то соответствующий коэффициент не несет дополнительной информации об объекте и его можно приравнять нулю, что упрощает полученную модель. Значимость коэффициентов проверяется с помощью t -критерия Стьюдента. Для этого с целью нахождения ошибки эксперимента – дисперсии воспроизводимости S_y^2 – проводим серию параллельных опытов в какой-либо точке, например, в центре планирования (в точке, соответствующей начальным значениям факторов x_{ji}):

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} (y_i - \bar{y})^2}{f_y}, \quad (7)$$

где N_0 – число параллельных опытов; \bar{y} – среднее значение параллельных опытов ($\bar{y} = \sum y_i / N_0$); f_y – число степеней свободы – величина, показывающая, какое число связей независимых наблюдений осталось не задействовано ($f_y = N_0 - 1$, так как одна связь использована при нахождении \bar{y}). Затем определяем значения t -критерия для каждого фактора:

$$t_j = \frac{|b_j| \sqrt{N}}{\sqrt{S_y^2}}; j = \overline{0, k}. \quad (8)$$

Полученные значения сравниваем с табличным значением критерия Стьюдента $t_{\text{табл}}$, найденным при числе степеней свободы f_y и определенном уровне значимости q – величине, характеризующей вероятность того, что решение будет неправильным (обычно $q = 0,05$). Если $t_j > t_{\text{табл}}$, то коэффициент значимо отличается от нуля, если же $t_j < t_{\text{табл}}$, то $b_j = 0$. В

результате выполнения этого этапа моделирования получаем уравнение (3), включающее d значимых коэффициентов регрессии.

Проверку адекватности уравнения регрессии (четвертый этап моделирования) проводим по F-критерию Фишера. Суть этой проверки сводится к сравнению двух дисперсий: дисперсии адекватности S_{ad}^2 и дисперсии воспроизводимости S_y^2 . Если первая величина соизмерима со второй, то можно считать, что уравнение (3) адекватно описывает экспериментальные данные; в противном случае оно неадекватно. Тогда необходимо либо уменьшить интервал варьирования x_j , либо повысить порядок уравнения регрессии.

Для вычисления критерия Фишера находим дисперсию адекватности S_{ad}^2 :

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{f_{ad}}, \quad (9)$$

где \hat{y}_i – расчетные значения, получаемые по уравнению (3); $f_{ad} = N - d$ – число степеней свободы; d – число значимых коэффициентов.

Затем определяем расчетное значение F-критерия:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}, \quad (10)$$

которое сравниваем с табличным значением $F_{табл}$, найденным при степенях свободы f_{ad} и f_y и уровне значимости q . Если $F < F_{табл}$, то уравнение адекватно, если $F > F_{табл}$ – уравнение неадекватно.

Как уже отмечалось, после получения модели объекта необходимо произвести его оптимизацию, т.е. отыскать такие значения факторов, которые приводили бы к экстремуму целевой функции. Известно, что наилучшим направлением движения к экстремуму целевой функции является направление градиента. В дальнейшем будем рассматривать только поиск максимума, учитывая, что при поиске минимума необходимо сменить направление на противоположное.

Градиентом функции называется вектор, показывающий направление максимального возрастания функции в данной точке:

$$\overline{grady} = \sum_{j=1}^k \frac{\partial y}{\partial x_j} * \bar{i}_j, j = \overline{1, k}, \quad (11)$$

где $\partial y / \partial x_j$ – проекции вектора-градиента на координатные оси; \bar{i}_j – единичные векторы, совпадающие по направлению с координатными осями. Найдем проекции вектора-градиента для линейного уравнения регрессии (3), взяв частные производные от целевой функции по факторам

$$\frac{\partial y}{\partial x_j} = b_j \quad j = \overline{1, k}. \quad (12)$$

Эти проекции равны коэффициентам регрессии. Следовательно, чтобы осуществить движение по градиенту, необходимо изменить значения факторов пропорционально полученным коэффициентам регрессии.

Шаги движения по градиенту не должны превышать соответствующие интервалы варьирования факторов. Для выполнения этого требования находим максимальный по абсолютному значению коэффициент регрессии $b_{j^*}^*$, а шаг движения по градиенту для фактора j^* выбираем равным интервалу варьирования $\Delta x_{j^*}^2 = \Delta x_{j^*}$. Тогда остальные шаги определяем по формуле

$$\Delta x_j^2 = \left| \frac{b_j * \Delta x_j}{b_{j^*}} \right|, \quad j = \overline{1, k}; j \neq j^*. \quad (13)$$

Знаки шагов движения по градиенту совпадают со знаками соответствующих коэффициентов регрессии. Движение по градиенту, или *крутое восхождение*, начинаем из центра планирования. Для наглядности составляем табл.2 движения по градиенту, в которой каждое последующее значение фактора отличается от предыдущего на шаг движения по градиенту.

Таблица 2

№ опыта	X_1	X_2	...	X_k	Y
1	x_{1n}	x_{2n}	...	x_{kn}	y_1
2	$x_{1n} + Dx_1^2$	$x_{2n} + Dx_2^2$...	$x_{kn} + Dx_k^2$	y_2
3	$x_{1n} + 2Dx_1^2$	$x_{2n} + 2Dx_2^2$...	$x_{kn} + 2Dx_k^2$	y_3
4	$x_{1n} + 3Dx_1^2$	$x_{2n} + 3Dx_2^2$...	$x_{kn} + 3Dx_k^2$	y_4

Движение по градиенту продолжаем до тех пор, пока не будет найдено максимальное значение целевой функции. Обычно это значение не сразу совпадает с искомым экстремумом, поэтому точку максимума принимаем за новый центр планирования и все этапы моделирования и оптимизации повторяем, т.е. проводим новый ПФЭ и снова организуем движение по градиенту. Метод, включающий моделирование объекта исследований с помощью ПФЭ и движения по градиенту с использованием линейной модели, называется методом Бокса-Вильсона. Критерием окончания поиска является либо незначимость всех коэффициентов регрессии при линейных членах, либо неадекватность уравнения регрессии. Если желаемые результаты регрессии при этом еще не достигнуты, переходим к уравнению регрессии более высокого порядка.

При большом числе факторов ($k > 3$) полный факторный эксперимент перестает удовлетворять требованию о минимизации числа опытов, так как количество опытов растет в степенной прогрессии, а число определяемых при этом коэффициентов уравнения регрессии равно всего лишь $k + 1$. Поэтому используем часть ПФЭ – дробный факторный эксперимент (ДФЭ), являющийся какой-то кратной долей от полного.

Число опытов ДФЭ определяем по формуле $n = 2^{k-p}$, где p – показатель дробности, принимающий значения 1, 2, 3, и т.д. Для построения матрицы планирования ДФЭ используем следующий алгоритм. Первые $(k-p)$ факторов строятся точно так же, как и в ПФЭ. Последующие факторы получаются по генерирующим соотношениям как произведения первых (независимых) факторов, например, $x_4 = x_1 * x_2 * x_3$.

Приведем пример матрицы планирования при $k = 5$, $p = 2$ (табл.3). В этом случае первые три фактора x_1 , x_2 , x_3 получаются, как и раньше, а для последующих используем следующие генерирующие соотношения: $x_4 = x_1 * x_2 * x_3$, и $x_5 = x_1 * x_2$. Дальнейшая обработка результатов ДФЭ полностью соответствует обработке результатов ПФЭ.

Таблица 3

№ опыта	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y
1	-1	-1	-1	-1	+1	y_1
2	+1	-1	-1	+1	-1	y_2
3	-1	+1	-1	+1	-1	y_3
4	+1	+1	-1	-1	+1	y_4
5	-1	-1	+1	+1	+1	y_5
6	+1	-1	+1	-1	-1	y_6
7	-1	+1	+1	-1	-1	y_7
8	+1	+1	+1	+1	+1	y_8

Пример. Рассмотрим применение метода Бокса-Вильсона на примере оптимизации химического реактора. Допустим, что производительность химического реактора зависит от трех факторов: температуры процесса X_1 , объемной скорости потока X_2 и концентрации катализатора X_3 .

Начальные значения факторов: $x_{1н}=150$; $x_{2н}=20$; $x_{3н}=0,3$. Интервалы варьирования: $Dx_1=20$; $Dx_2=4$; $Dx_3=0,05$.

Необходимо провести полный факторный эксперимент, рассчитать коэффициенты регрессии, проверить их на значимость, уравнение регрессии проверить на адекватность и осуществить движение по градиенту.

По формуле (5) находим значения верхнего и нижнего уровней каждого фактора:

$$\begin{aligned}
 x_1(+1) &= 150 + 20 = 170; & x_1(-1) &= 150 - 20 = 130; \\
 x_2(+1) &= 20 + 4 = 24; & x_2(-1) &= 20 - 4 = 16; \\
 x_3(+1) &= 0,3 + 0,05 = 0,35; & x_3(-1) &= 0,3 - 0,05 = 0,25.
 \end{aligned}$$

Составляем таблицу ПФЭ в условных и натуральных переменных (табл.4).

Значения целевой функции Y снимаем на объекте при соответствующих значениях факторов. Для определения дисперсии воспроизводимости проводим четыре параллельных опыта в центре планирования.

Таблица 4

№ опыта	X_1		X_2		X_3		Y
1	-	130	-	16	-	0,25	28
2	+	170	-	16	-	0,25	38
3	-	130	+	24	-	0,25	22
4	+	170	+	24	-	0,25	31
5	-	130	-	16	+	0,35	33
6	+	170	-	16	+	0,35	42
7	-	130	+	24	+	0,35	26
8	+	170	+	24	+	0,35	36

Результаты параллельных опытов: $y_{01} = 31$; $y_{02} = 31$; $y_{03} = 35$; $y_{04} = 31$. По формуле (6) рассчитываем коэффициенты регрессии:

$$b_0 = \frac{28+38+22+31+33+42+26+36}{8} = 32$$

$$b_1 = \frac{-28+38-22+31-33+42-26+36}{8} = 4,75$$

$$b_2 = \frac{-28-38+22+31-33-42+26+36}{8} = -3,25$$

$$b_3 = \frac{-28-38-22-31+33+42+26+36}{8} = 2,25$$

Для проверки значимости коэффициентов регрессии из результатов параллельных опытов по формуле (7) рассчитываем дисперсию воспроизводимости S_y^2 . Сначала находим \bar{Y} :

$$\bar{Y} = \frac{31+31+35+31}{4} = 32.$$

затем S_y^2 :
$$S_y^2 = \frac{(31-32)^2 + (31-32)^2 + (35-32)^2 + (31-32)^2}{3} = 4 .$$

По формуле (8) определяем значение t -критерия для каждого коэффициента:

$$t_0 = \frac{32 * \sqrt{8}}{\sqrt{4}} \approx 45;$$

$$t_1 = \frac{4,75 * \sqrt{8}}{\sqrt{4}} \approx 6,65;$$

$$t_2 = \frac{3,25 * \sqrt{8}}{\sqrt{4}} \approx 4,55;$$

$$t_3 = \frac{2,25 * \sqrt{8}}{\sqrt{4}} \approx 3,15.$$

Табличное значение t -критерия при уровне значимости $q = 0,05$ и числе степеней свободы $f_y = 3$: $t_{табл} = 3,18$. Сравниваем расчетные значения с табличными: $t_0, t_1, t_2 > t_{табл}$. Следовательно, коэффициенты b_0, b_1, b_2 значимы; $t_3 < t_{табл}$, следовательно, коэффициент $b_3 = 0$.

Для проверки адекватности полученного уравнения регрессии необходимо подсчитать расчетные значения путем подстановки в уравнение $y = 32 + 4,757x_1 - 3,257x_2$ значений факторов из матрицы планирования:

$$y_1 = 32 + 4,757(-1) - 3,257(-1) = 30,5 ,$$

$$y_2 = 32 + 4,757(+1) - 3,257(-1) = 40 ,$$

$$y_3 = 32 + 4,757(-1) - 3,257(+1) = 24 ,$$

$$y_4 = 32 + 4,757(+1) - 3,257(+1) = 33,5 ,$$

$$y_5 = y_1 = 30,5 , y_6 = y_2 = 40 , y_7 = y_3 = 24 , y_8 = y_4 = 33,5 .$$

По формуле (9) определяем дисперсию адекватности

$$S_{ель}^2 = \frac{(30,5-28)^2 + (40-38)^2 + (24-22)^2 + (33,5-31)^2 + (30,5-33)^2 + (40-42)^2}{8-3} + \frac{(24-26)^2 + (33,5-36)^2}{8-3} = 8,2.$$

Значение F -критерия находим по формуле (10):

$$F = \frac{8,2}{4} = 2,05.$$

Табличное значение критерия при уровне значимости $q = 0,05$, числах степеней свободы $f_{ad} = 5$ и $f_y = 3$: $F_{табл} = 9,0$; $F < F_{табл}$, следовательно, уравнение адекватно описывает исследуемый процесс.

Для составления таблицы движения по градиенту находим фактор с максимальным коэффициентом регрессии ($|b_1| > |b_2| > |b_3|$) и шаг движения по градиенту для него выбираем равным интервалу варьирования:

$$\Delta x_1^* = \Delta x_1 = 20.$$

Остальные шаги рассчитываем по формуле (13):

$$\Delta x_2^* = \frac{|b_2 * \Delta x_1|}{|b_1|} = \frac{3,25 * 4}{4,75} \approx 2,74;$$

$$\Delta x_2^* = -2,74, \quad \text{так как } b_2 < 0,$$

$$\Delta x_3^* = 0, \quad \text{так как } b_3 = 0.$$

Составляем табл.5 движения по градиенту и на объекте исследования определяем значение целевой функции.

Таблица 5

№ опыта	X_1	X_2	X_3	Y
1	150	20	0,3	32
2	170	17,26	0,3	37
3	190	14,52	0,3	41
4	210	11,78	0,3	43
5	230	9,04	0,3	42

Значение производительности реактора при шаге 4 является максимальным в данном направлении, поэтому координаты этой точки принимаются за новый центр планирования.

Планирование второго порядка

Если линейное уравнение регрессии не является адекватным, то переходят к уравнению более высокого порядка, в данном случае – второго. Да и вообще, для более полного исследования изучаемого процесса уравнение второго порядка

является более приемлемым. Согласно основным правилам обработки результатов эксперимента, чтобы получить второй порядок по фактору, он должен принимать в ходе эксперимента как минимум три различных значения. Следовательно, можно было бы предложить полный факторный эксперимент на трех уровнях, т.е. ПФЭ типа 3^k . Однако количество опытов в таком эксперименте при $k > 3$ явно не удовлетворяет требованиям о минимизации затрат, поэтому ПФЭ типа 3^k применяется сравнительно редко. Дробный факторный эксперимент как часть соответствующего полного также не нашел широкого применения.

При планировании второго порядка нет такого плана, который удовлетворял бы всем условиям (4) и минимизации числа опытов. Поэтому существует несколько различных планов, в которых за основу принято какое-то одно свойство. Наиболее распространены центральные композиционные ротатабельные и ортогональные планы.

В качестве примера планирования второго порядка рассмотрим центральное композиционное ротатабельное планирование (ЦКРП). Слово «центральное» в названии говорит о том, что получающийся план проведения эксперимента симметричен относительно какой-то точки, являющейся центром плана. Слово «композиционное» говорит о том, что план получается добавлением (композицией) определенных точек к плану полного или дробного факторного эксперимента. Слово «ротатабельное» свидетельствует о том, что получающееся в результате уравнение регрессии имеет свойство ротатабельности – одинаковые ошибки предсказания результатов во всех направлениях. Данное свойство позволяет интерпретировать значения целевой функции при исследовании поверхности отклика и при оптимизации одинаково, независимо от направления (в ортогональных планах при проведении оптимизации необходимо учитывать неравномерность распределения ошибок в разных направлениях от центра плана). Таким образом, ЦКРП является наиболее удобным при практических применениях получающегося уравнения регрессии.

План ЦКРП состоит из трех составных частей:

1) n_1 – ПФЭ илиДФЭ (при $k \geq 4$), т.е. $n_1 = 2^k$ или $n_1 = 2^{k-1}$;

2) $n_2 = 2*k$ – «звездные» точки;

3) n_0 – параллельные опыты в центре плана.

«Звездные» точки получаются следующим образом: все координаты, кроме одной, равны 0 (соответствуют центру плана), а одна координата равна $\pm \alpha$, где α – «плечо» «звездной» точки, равное $\alpha = n_1^{1/2}$, т.е. корень из числа опытов ПФЭ или ДФЭ.

Количество опытов в центре плана определяется таким образом, чтобы план был как можно ближе к ортогональному (в ЦКРП условие ортогональности не выполняется). Все значения параметров плана ЦКРП приведены в табл.6.

Таблица 6

k	n_1	n_2	n_0	$n_{\text{ЦКРП}}$	a
2	4	4	5	13	1,414
3	8	6	6	20	1,682
4	8	8	7	31	2,0
5	16	10	6	32	2,0
6	32	12	9	53	2,378

В качестве примера приведем план центрального композиционного ротатабельного планирования в условных переменных для $k = 3$ (табл.7).

Значения, равные 0, в этой таблице соответствуют координатам центра планирования. Условные значения переменных переводятся в натуральные значения при заданных координатах центра планирования и интервалах варьирования аналогично приведенному выше примеру.

Таблица 7

№ опыта	X_1	X_2	X_3	Y
1	-1	-1	-1	y_1
2	+1	-1	-1	y_2
3	-1	+1	-1	y_3
4	+1	+1	-1	y_4
5	-1	-1	+1	y_5
6	+1	-1	+1	y_6
7	-1	+1	+1	y_7

8	+1	+1	+1	y ₈
9	-1,414	0	0	y ₉
10	+1,414	0	0	y ₁₀
11	0	-1,414	0	y ₁₁
12	0	+1,414	0	y ₁₂
13	0	0	-1,414	y ₁₃
14	0	0	+1,414	y ₁₄
15	0	0	0	y ₁₅
16	0	0	0	y ₁₆
17	0	0	0	y ₁₇
18	0	0	0	y ₁₈
19	0	0	0	y ₁₉
20	0	0	0	y ₂₀

После реализации плана на реальном объекте проводится обработка результатов в аналогичной последовательности, а именно, сначала рассчитываются коэффициенты регрессии, затем проверяется их значимость, а затем адекватность полученного уравнения. Формулы для расчетов достаточно сложны (так как план ЦКРП отличается от ортогонального) и здесь не приводятся – существуют специальные стандартные программы для выполнения всех расчетов (см. следующий раздел «Множественная регрессия»).

Полученное в результате ЦКРП уравнение второго порядка в дальнейшем может использоваться как для предсказания результатов эксперимента при различных значениях факторов, так и для оптимизации процесса по специальным алгоритмам.

Множественная регрессия

Общее назначение множественной регрессии (этот термин был впервые использован в работе Пирсона – Pearson, 1908) состоит в анализе связи между несколькими независимыми переменными и зависимой переменной.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k).$$

Обычно математическая модель объекта в многофакторных задачах записывается в виде полинома некоторой степени (в зависимости от требуемой точности):

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{j=1}^{k-1} \sum_{l=j+1}^k b_{jl} x_j x_l + \sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2 + \dots, \quad (14)$$

где y – выходная переменная (целевая функция или параметр оптимизации); x_j – входные переменные, или факторы ($j = 1, k$); k – число факторов. Точные значения коэффициентов уравнения (14) определить невозможно, поэтому вместо истинных значений коэффициентов b отыскиваются их оценки \hat{b} . Тогда (14) переписывается в виде

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^k \hat{b}_j x_j + \sum_{j=1}^{k-1} \sum_{l=j+1}^k \hat{b}_{jl} x_j x_l + \sum_{j=1}^k \hat{b}_{jj} x_j^2 + \dots \quad (15)$$

Уравнение (2) называется уравнением регрессии, а коэффициенты b_0, b_j, b_{jl}, b_{jj} – коэффициентами регрессии, а метод получения такого уравнения – множественной регрессией.

Первый этап решения этой задачи, как и при нелинейной регрессии – выбор вида модели. В данном случае он заключается в выборе степени уравнения регрессии в зависимости от сложности решаемой задачи и требуемой точности. При первоначальном исследовании объекта обычно применяют линейное уравнение регрессии:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k. \quad (16)$$

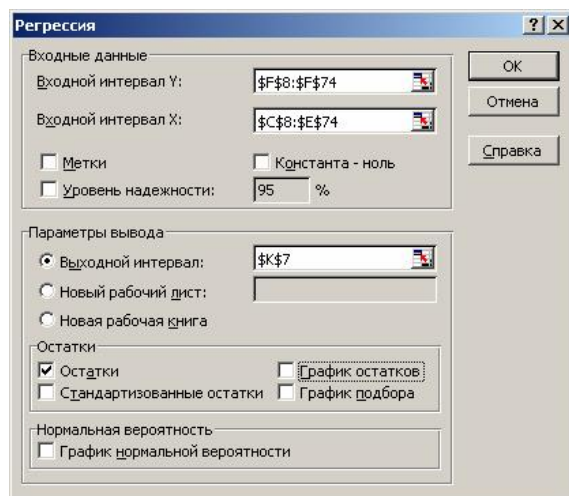
На следующем этапе переходят к уравнению второго порядка:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + \mathbf{K} + b_k x_k + b_{11} x_1^2 + \mathbf{K} + b_{kk} x_k^2 + b_{12} x_1 x_2 + \mathbf{K} + b_{k-1k} x_{k-1} x_k. \quad (17)$$

Для определения коэффициентов регрессии можно применить все тот же метод наименьших квадратов, который в данном случае вследствие линейного вида уравнения регрессии сводится к решению достаточно большой системы линейных

алгебраических уравнений (с предварительным накоплением соответствующих сумм).

Современные программные средства персональных компьютеров позволяют решить эту задачу значительно проще. В табличном процессоре **Excel** существует набор специальных процедур **Анализ данных**, включающий в себя и **Регрессию**. Чтобы использовать эту процедуру, достаточно вызвать ее из меню **Сервис** и грамотно задать параметры. Например:

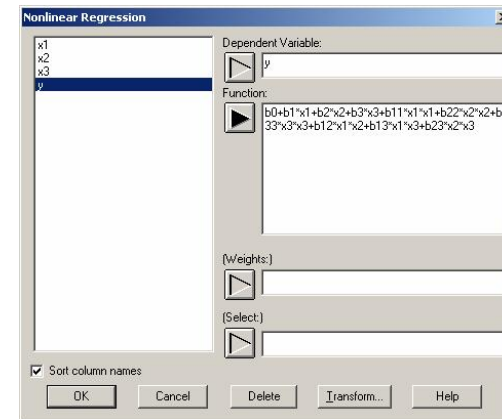


Результаты работы процедуры появляются в указанном **«Выходном интервале»** и включают в себя статистические характеристики исходных данных и полученного уравнения, коэффициенты уравнения, предсказанные значения функции Y и их разности с исходными (остатки). Наиболее важной статистической характеристикой является коэффициент детерминации «R-квадрат», принимающий значение от 0 до 1. Чем больше его величина, тем лучше полученное уравнение. Другим критерием адекватности полученного уравнения регрессии являются предсказанные значения и их остатки, т.е. разности между ними и исходными значениями.

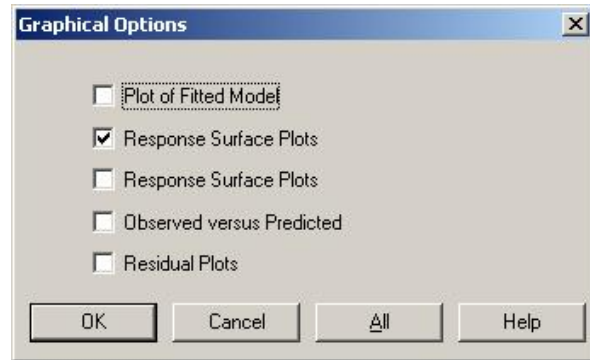
В рассматриваемом примере получают линейное уравнение регрессии для трех факторов. Чтобы получить уравнение второго

порядка с помощью **Анализа данных** необходимо создать дополнительные столбцы для квадратов и произведений отдельных факторов (например, для $k = 3$ - три столбца для квадратов и три столбца для произведений) и затем применить процедуру **Регрессия**.

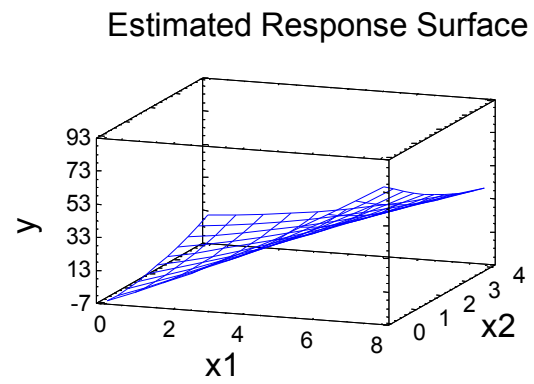
В пакете **STATGRAPHICS** после копирования данных из **Excel** и переименования столбцов необходимо вызвать процедуру **Special \ Advanced Regression \ Nonlinear Regression** и записать в появившемся рабочем окне зависимую переменную и функцию (приведен пример для $k = 3$ и уравнения второго порядка):



Результаты работы процедуры практически аналогичны. Пакет **STATGRAPHICS** позволяет представить полученное уравнение в различных графических видах, чего в **Excel** сделать практически невозможно. Так, вызвав следующую графическую опцию



можно получить зависимость целевой функции y от двух факторов в виде поверхности. Например:



Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ЧАСТЬ 1	10
Работа 1. Моделирование распределения тока на катоде с использованием ячейки с разноудаленными плоскопараллельными электродами.....	10
Работа 2. Исследование эффективности экранов на гальванической подвеске	21
Работа 3. Исследование гальванической подвески с биполярным электродом.....	36
Работа 4. Исследование распределения тока в системе с дополнительными анодами	51
ЧАСТЬ 2	62
Работа 5. Оценка равномерности распределения тока на внешних границах рабочего поля подвесок в гальванических ваннах разных типов.....	62
Работа 6. Оценка равномерности распределения тока при выборе параметров размещения деталей на подвесках внутри рабочего поля	64
Работа 7. Оценка равномерности распределения тока при выборе параметров средств оптимизации распределения тока.....	71
Работа 8. Оценка равномерности распределения тока на индикаторных электродах ячеек сравнения.....	76
Работа 9. Оценка равномерности распределения тока на электродах ячеек произвольной формы.....	81

Работа 10. Оценка влияния распределения тока на электродах на метрологические характеристики датчиков плотности тока 87

Приложение 1. Приемы работы с пакетом Cell – Design при расчете распределения тока на электродах ячеек с произвольными границами 89

Приложение 2. Приемы планирования компьютерного эксперимента для моделирования равномерности распределения тока и оптимизации параметров подвесочных устройств..... 103

Печатается с авторского оригинал-макета.
Тематический план 2005 года. Позиция 0000.
Подписано в печать 00.03.05.

Тираж 100 экз. Заказ 000.
Казанский государственный технологический университет.
420015, Казань, К.Маркса,68.
Офсетная лаборатория КГТУ, 420015, Казань,
К.Маркса,68.