

В.С. Коваленко

НЕТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ В ЯПОНИИ

*Киевский политехнический институт,
пр. Перемоги, 37, г. Киев, 252056, Украина*

1. Введение

Япония является ведущим производителем и экспортером современного оборудования для обработки материалов, значительно опережая при этом Германию, США, Италию и Швейцарию [1]. В последние десятилетия наряду с дальнейшим развитием и совершенствованием технологии и оборудования для реализации различных методов классической механической обработки все больший акцент делается на создании новейших высоких технологий и оборудования, основанных на самых последних достижениях физики, химии, биологии и других фундаментальных наук. В Украине и других постсоветских странах методы обработки, основанные на этих достижениях, до недавнего времени были объединены общим названием "Электрофизические и электрохимические методы обработки", что соответствовало общему зарубежному термину "Electromachining – электрообработка". С расширением номенклатуры методов обработки в указанных странах начал прививаться термин "Физико-технические методы" и "Специальные технологии обработки". На Западе, а также в Японии закрепились термины "Nontraditional (Nonconventional) Machining – нетрадиционная обработка". В этой области прикладной науки и технологии специалисты Японии добились очень существенных успехов, разработали ряд уникальных технологий и ставят перед собой дальнейшие амбициозные задачи на ближайшие годы. Вместе с тем наши японские коллеги постоянно отдают дань уважения и признательности основоположникам электротехнологии – нашим соотечественникам, супругам Б.Р. и Н.И. Лазаренко, которые еще в 1943 году открыли метод электрообработки материалов.

В данной статье предлагается анализ последних японских разработок в области лазерных, электроразрядных, электрохимических, биологических и других методов обработки материалов.

2. Лазерная обработка

Этот вид обработки развивается особенно динамично. В стране имеется Национальная программа, согласно которой, в частности, предусмотрено создание в 2001–2002 годах АИГ лазеров с диодной накачкой мощностью излучения до 10 кВт.

В настоящее время на заводах фирмы Мицубиси Электрик (Mitsubishi Electric) в Нагоя серийно выпускаются технологические системы для сварки материалов АИГ лазерами с диодной накачкой мощностью 1 кВт. На этих же заводах выпускаются технологические системы для сварки, раскроя материалов и упрочнения деталей излучением CO₂ лазеров мощностью 1–5 кВт с годовой программой выпуска 300 шт. Эти системы пользуются устойчивым спросом, как в Японии, так и за ее пределами. Основными потребителями этого оборудования для выполнения операций раскроя материалов являются автомобильная промышленность (24%), малые предприятия машиностроительного профиля (14%), электротехническая промышленность (12%), общее машиностроение (12%), индустрия конструкционных материалов (11%) и др. Основным потребителем для выполнения операций сварки является автомобильная промышленность (62%).

Для обработки серий микроотверстий микронных диаметров с производительностью до 700 отв./с в элементах интегральных микросхем микропроцессоров на этих же заводах выпускается специальная установка ML605GTX на базе CO₂ лазера, пользующаяся в настоящее время повышенным спросом.

Фирма Фанук (Fanuc) разработала оборудование на базе CO₂ лазера мощностью 3,5 кВт, оснащенное цифровым сервоприводом с линейными двигателями, для сверхскоростной резки материала. На этом оборудовании вырезка отверстий (путем трепанации) диаметром 10 мм в стальном листе толщиной 1 мм может производиться со скоростью до 500 отв/мин при расстоянии между осями отверстий 25,4 мм. Такая скорость резки значительно превышает производительность вырубки отверстий пуансоном на револьверном автомате. Лазерная лаборатория этой фирмы (руководитель – вице-президент компании, Др. Норико Карубе) имеет амбициозные планы по дальнейшему увеличению производительности вырезных операций при использовании "летающей оптики", лазеров на АИГ с диодной накачкой и волоконной оптикой.

Уникальные исследования по применению ультрафиолетового лазерного излучения для суперфинишной обработки поверхности проводятся в лаборатории проф. Е. Намба (университет Чубу). Эти исследования базируются на огромном накопленном опыте создания методов суперфинишной обработки оптических поверхностей и ответственных элементов оптоэлектроники абразивными нанопорошками, а также монокристаллическим алмазным инструментом. Лаборатория занимается разработкой технологии суперфинишной обработки ответственных деталей рентгеновского телескопа, создаваемого в соответствии с Национальным проектом, для поиска новых галактик и изучения высокоэнергетических астрофизических явлений. Лазерная поверхностная обработка позволяет управлять параметрами микрорельефа (вернее, нанорельефа!) поверхности в пределах от нескольких нанометров до долей нанометра! Так, при суперфинишной лазерной обработке поверхностей монокристалла кремния съем материала составляет 0,32 Å за импульс [2]. Таких уровней точности управления качеством поверхности путем прецизионного удаления материала при обработке никакими другими методами пока достигнуть не удалось.

В лаборатории проф. Е. Намба ведутся также интересные исследования по изучению возможностей использования лазерного излучения для формирования сложнопрофильных изделий из листового материала путем создания направленных термодетформаций. При необходимости изготовления единичных деталей или небольшой партии деталей разработанная технология позволяет отказаться от дорогостоящих специальных штампов и прессового оборудования. Проф. Намба предложил это необычное применение лазерного излучения еще в 1987 году для формирования металлических деталей [3], и сейчас это направление развивается в Великобритании, США, других странах, и, в частности, в ряде исследовательских центров Японии. Так, в лаборатории нетрадиционной обработки материалов Университета Окаямы проф. Е. Уно изучает возможности термического деформирования пластмасс при создании сложнопрофильных изделий.

В лаборатории проф. Уно также изучается процесс качественной микрорезки материалов импульсным излучением АИГ лазера. В сотрудничестве с НИИ лазерной техники и технологии Киевского политехнического института здесь проводятся сравнительные исследования процесса прецизионной резки пластин монокристаллического кремния для элементов солнечных батарей электроразрядным и лазерным методами [4].

Уникальные исследования механизма лазерной сварки мощным излучением CO₂ лазера в условиях глубинного проплавления материала проводятся в исследовательском институте сварки (Joint and Welding Research Institute) Осакинского университета. Здесь изучение процесса проплавления производится в динамике с помощью рентгеновской и оптической камер с высоким разрешением. Для большей визуализации турбулентных потоков в расплав вводятся частицы тугоплавкого металла – вольфрама. Полученные результаты позволяют понять сложные процессы, происходящие в зоне воздействия высококонцентрированных тепловых потоков, определить оптимальные условия лазерной обработки [5].

Значительных успехов в этом институте добились также в области высококачественной лазерной сварки алюминия и алюминиевых сплавов излучением CO₂ лазеров и лазеров на АИГ.

В институте создана установка для комбинированного процесса напыления материала с помощью плазмы низкого давления и излучения CO₂ лазера, что позволяет существенно повысить адгезионные характеристики нанесенного на матрицу материала.

Ряд интересных исследований по сварке, нанесению покрытий, упрочнению и наплавке материалов проводится с использованием широкой гаммы уникального высокоэнергетического оборудования – плазменной установки гибридного типа мощностью 100 кВт, гиротронной системы

для спекания материалов мощностью 10 кВт и частотой 28 ГГц, электроразрядной установки для точечной сварки с током разряда до 5000 А, электроннолучевой установки сверхвысокого напряжения (600 кВ, 300 кВт), мощного CO₂ лазера (15 кВт), матричного полупроводникового лазера с мощностью излучения до 100 Вт, эксимерного лазера для модификации поверхности материала, энергетической установки импульсного излучения миллиметрового диапазона (60 ГГц, 200 кВт), ионнолучевой установки для обработки композиционных материалов и др.

Перспективные разработки в области лазерной технологии выполняются в исследовательском институте фотонной техники (R&D Institute for Photonics Engineering Manufacturing, Science and Technology Center, Tokyo). Помимо создания мощного твердотельного лазера с диодной накачкой, а также твердотельного лазера с перестраиваемой частотой здесь разрабатывается компактный лазер, активной средой которого является оптическое волокно, свернутое в плотную спираль, а накачка осуществляется с помощью матрицы диодных лазеров. Эти лазеры предназначены как для традиционных технологических применений, так и для новых технологий лазерной обработки материалов.

В этом же институте развивается совершенно новое направление изготовления микрооптоэлектронных устройств – прямое печатание микро-композитных электронных плат (direct-printed micro-composite circuits). При этом создаются сверхмалые частицы определенных материалов с заданными свойствами, которые затем имплантируются в плату в соответствии с программой.

Во всех указанных разработках следует особо подчеркнуть стремление создать встроенную мониторинговую систему для обеспечения заданных параметров процесса и достижения наивысшего качества лазерной обработки.

Представляют значительный интерес исследования, проводимые в центре промышленных технологий префектуры Окаяма (Industrial Technology Center of Okayama Prefecture) по использованию излучения эксимерного лазера для микрообработки деталей. В частности, разработана технология профильного "лазерного точения" цилиндрических микрозаготовок ультрафиолетовым излучением эксимерного лазера на KrF. С помощью маски, установленной на пути лазерного излучения, последнее формируется в виде специфического "фасонного режущего инструмента" для удаления материала с вращающейся заготовки. В качестве заготовки используется графитовый стержень диаметром 0,5 мм. Этим способом изготавливаются сложнопрофильные графитовые электроды-инструменты для микроэлектроразрядной обработки материалов.

3. Электроразрядная обработка

Без преувеличения можно сказать, что в настоящее время Япония все с большим правом может претендовать на роль мирового лидера в разработке и использовании различных методов электроразрядной обработки материалов. Исследования в этом направлении проводятся практически во всех крупнейших университетах страны, а разработкой технологии и оборудования занято большое количество авторитетных фирм.

Один из крупнейших научных и производственных центров в области электроразрядной обработки фирма Содик (Sodick) выпускает широкую гамму копировально-прошивочных станков, станков для контурной вырезки проволочным электродом, обрабатывающих центров для изготовления сложнопрофильных графитовых электродов для копировально-прошивочных работ и пр. При этом используется многолетний опыт компании по созданию сложных штампов и пресс-форм, различных элементов штамповой оснастки.

Для повышения точности и производительности выпускаемого оборудования компания заменила традиционные системы приводов линейными двигателями, что позволило упростить приводной механизм, значительно снизить уровень вибраций и шума при осуществлении перемещений узлов, повысить скорости и ускорения этих перемещений. Это в свою очередь позволяет обеспечить более высокий уровень автоматизации оборудования в целом.

Другим нововведением компании является использование керамических шпинделей и направляющих, что значительно снижает вес узлов, уменьшает их инерционность. Применение керамических шариковых подшипников минимизирует термические деформации, снижая нагрузку на подшипник при высокоскоростном вращении практически до нуля, а это позволяет обеспечивать высокую жесткость шпинделя в широком диапазоне скоростей вращения. В итоге обеспечивается стабильная динамическая точность и надежность обеспечения заданных размерных параметров обработки.

Из выпускаемого оборудования особый интерес представляют станки для прецизионной прошивки отверстий. В частности, на станке K1C отверстие диаметром 0,3–3,0 мм в твердом сплаве

толщиной 20 мм прошивается за 20 с. Для получения качественных отверстий применяются трубчатые электроды из композита CuW, которые при обработке твердых сплавов обеспечивают минимальный износ.

Исследователи лаборатории нетрадиционных методов обработки университета Окаямы использовали трубчатый электрод для получения глубоких отверстий (200 мм) в монокристалле кремния. Обработка таких отверстий ведется со скоростью 1 мм/с, время обработки составляет 200 с. Эта же технология используется для обработки сложнопрофильных отверстий (О-, Н-, Х-образной формы) в фильерах для получения объемного синтетического волокна. В лаборатории также разработана технология электроразрядной обработки проволочным электродом для прецизионного разделения на тонкие пластины монокристаллов кремния [6].

В Токийском университете сельского хозяйства и технологии (Tokyo University of Agriculture and Technology) в лаборатории доктора М. Кунейды с помощью трубчатого электрода в межэлектродный промежуток подается не диэлектрическая жидкость, а воздух или кислород под высоким давлением (0,5 мПа). Этим обеспечивается практически нулевой износ электрода-инструмента, интенсифицируется удаление продуктов эрозии из межэлектродного промежутка и повышается производительность съема материала [7].

В этой же лаборатории разработана оригинальная методика моделирования и экспериментального определения пространственного распределения электрических разрядов между электродами при обработке с выводом визуальной информации на монитор. Методика позволяет изучать процесс электроэрозии в динамике и предотвращать условия его дестабилизации [8].

Оригинальная технология электроразрядной обработки изделий из титановых сплавов разработана в Технологическом исследовательском институте префектуры Осаки. При этом использован эффект изменения цвета поверхности титанового сплава в результате химико-термических реакций при электроразрядной обработке. Таким образом, одновременно с размерной обработкой детали достигается изменение цвета ее поверхности (от красного до фиолетового) в зависимости от заданных режимов обработки. Образующийся оксидный слой также обладает износостойкими свойствами.

По-прежнему одним из ведущих производителей электроэрозионного оборудования в Японии и в мире является компания Мицубиси Электрик. Здесь наряду с широкой гаммой проволочных вырезных станков выпускаются крупные копировально-прошивочные станки с максимальным весом электрода-инструмента до 150 кг и максимальным весом заготовки до 2000 кг. На заводах компании в Нагое разработана технология электроразрядного поверхностного легирования деталей на копировально-прошивочных станках. Создаваемые по этой технологии слои карбидов и нитридов титана способствуют значительному повышению износостойкости ответственных изделий машиностроения.

Технология поверхностной модификации материала при электроразрядной обработке в другом варианте предложена в Лаборатории нетрадиционных методов обработки проф. Е. Уно (Университет Окаяма). Согласно предложенной технологии для формирования карбидов титана электроразрядная обработка ведется титановым электродом, а в диэлектрическую среду (керосин) добавляется порошковый углерод, что позволяет значительно увеличить толщину легированного слоя (до 25–30 мкм) и повысить износостойкость обработанной поверхности.

В Японии широко развита сеть специализированных предприятий, которые используют электроразрядное и другие типы нетрадиционного оборудования для изготовления штампов, пресс-форм, сложнопрофильных деталей аэрокосмической техники и т.п. по заказу различных отраслей промышленности. Одним из крупнейших предприятий такого типа является компания Ходен Сеймитсу Како (Hoden Seimitsu Kako Kenkyusho Co, Ltd), которая имеет более 200 единиц электроразрядного оборудования, а также широкий спектр специальных установок для реализации методов нетрадиционной обработки материалов-лазерной, электрохимической, плазменной, газотермической и др.

Компания изготавливает штампы, пресс-формы, отдельные сложные детали для автомобильной, электронной, электротехнической и аэрокосмической промышленности, она имеет определенные успехи в модернизации электроразрядного оборудования, разрабатывает свой собственный программный продукт для повышения эффективности используемых технологий. В частности, специалисты этой компании разработали станок для вырезки проволочным электродом сложнопрофильного пера лопатки турбины длиной до 1000 мм.

Япония добилась огромных успехов в области микротехники и микротехнологии и успешно осваивает диапазон наноразмеров в технике и технологии. Учитывая важность и приоритетность для

страны развития данного научного и технологического направления, правительством утвержден грандиозный Национальный проект по разработке микротехники и микротехнологии. В рамках этого проекта в декабре 1999 г. в Токио состоялась выставка микростанков для обработки и сборки супермалых деталей и узлов. Такие детали и узлы необходимы для создания микро- и наноприборов, суперкомпактных механизмов, например, микронасосов для перекачки крови при локальной блокаде кровеносных сосудов, нанороботов для перемещения внутрикровеносных сосудов при выполнении уникальных операций и пр.

Представленные на этой выставке образцы оборудования поражают воображение. Так, габаритные размеры фрезерного станка составляют 119 x 119 x 102 мм. Мощность станка 56 Вт, диаметр концевой фрезы – 3 мм.

Размеры токарного станка 32 x 25 x 30,5 мм при весе 100 г и мощности 1,5 Вт. Минимальный диаметр заготовки 0,06 мм, а обеспечиваемая шероховатость обработанной поверхности 1,5 мкм.

Пресс для штамповки листовых заготовок при габаритах 111 x 66 x 170 и мощности 100 Вт развивает усилие 3 кН. Размеры штампа при этом равны 30 x 40 x 52 мм.

Представленный антропоморфный робот имеет высоту 100 мм, мощность привода 45 Вт и может манипулировать деталями размерами до 20 мкм.

Сборочный автомат-манипулятор, выполненный в виде цилиндрического узла диаметром 48 мм и длиной 65 мм, обеспечивает сборку деталей размерами 100 x 100 x 30 мкм с точностью 1 мкм.

В рамках указанного национального проекта фирмой Фанук разработан наноробот типа Fanuc ROBOPANO Ui для изготовления микро и наноизделий. Иллюстрацией возможностей данного робота может служить изготовленная с его помощью полость штампа диаметром 1 мм с детальным изображением человеческого лица или дифракционная решетка с шагом штрихов 1 мкм.

Хорошим примером уникальных возможностей электротехнологии при изготовлении микро- и нанодеталей является изготовленный фирмой Мацусита Электрик Индастриал (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.) уникальный микроэлектроразрядный станок MG-ED71. С его помощью удается изготовить ультрамалые отверстия диаметром 5 мкм в нержавеющей стали толщиной 10 мкм, микрощели шириной 5 мкм длиной до 150 мкм в нержавеющей стали толщиной 20 мкм и пр. Другой станок MG-ED51 разработан для получения электродов сверхмалых диаметров путем использования технологии электроразрядного микрошлифования заготовки проволочным электродом. Указанные станки разработаны на основе результатов исследований проф. Т. Масузава (Токийский университет). В лаборатории проф. Масузава также создана технология электроразрядного изготовления полости штампа для получения кузова микроавтомобиля длиной 13 мкм! Эта разработка была продемонстрирована на 48 Генеральной Ассамблее СИРПа в Афинах в 1998 г.

4. Электрохимическая обработка

В последние годы научно-техническая политика в области развития методов электрохимической обработки претерпевает серьезную трансформацию. Жесткие законодательные ограничения в области экологии, которые в последнее время особенно ужесточились в промышленно развитых странах, существенно повлияли на интенсивное развитие размерной электрохимической обработки в Японии. Связано это с определенной сложностью утилизации больших количеств отходов мощных электрохимических станков. В то же время в разработке электрохимических технологий, не влекущих за собой экологических проблем, японские ученые продолжают глубокие научные исследования.

Одна из таких разработок (Токийский университет сельского хозяйства и технологии, лаборатория доктора Кунейды) посвящена изучению возможностей повышения усталостной прочности контактных поверхностей дорожек качения шариковых подшипников с помощью струйной электрохимической обработки [9]. В этом случае на контактной поверхности в определенном порядке создаются пятна электрохимического воздействия диаметром 200–230 мкм глубиной до 5–6 мкм, то есть достигается заданная топография поверхности, обеспечивающая надежное удержание смазывающей пленки в условиях значительных динамических нагрузок. Альтернативные способы получения заданного микрорельефа (механический, электроразрядный, лазерный и др.) обычно вызывают изменения термонапряженного состояния на обработанной поверхности, что несколько снижает усталостную прочность и износостойкость обработанной поверхности. При электрохимическом же растворении материала электрода-анода дефектного слоя не наблюдается. Таким образом, получаемый заданный микрорельеф в виде регулярных "карманов" для удержания смазки на контактной поверхности и одновременное отсутствие остаточных напряжений после обработки

позволяют существенно повысить усталостную прочность дорожек качения подшипников и повысить надежность самих подшипниковых узлов.

Другая разработка лаборатории доктора Кунейды использует противоположный эффект химической реакции электролиза – электрохимическое осаждение материала на электроде-катоде. В этом случае с помощью электролитической струи, подаваемой из сопла с большим давлением (57 кПа), реализуется процесс быстрого прототипирования (Rapid Prototyping), то есть выращивание трехмерного объекта путем электрохимического осаждения (наращивания) слоя материала по определенной программе [10]. В зависимости от режимов обработки, вида электролита, условий сканирования сопла со струей электролита толщина осажденного слоя может составлять от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров. Таким образом, процесс после определенной доработки может рассматриваться как новый эффективный метод микросинтеза изделий (пока сравнительно малых размеров) из различных металлических материалов.

Одним из направлений, в котором продолжается научный поиск совершенствования электрохимической обработки, является абразивно-электрохимическая обработка. В уже упоминавшейся лаборатории нетрадиционной обработки материалов проф. Уно процесс суперфинишного абразивного шлифования и хонингования интенсифицируется за счет процесса электролиза, что позволяет повысить как производительность, так и качество обработки трудно обрабатываемых материалов. В ряде лабораторий разрабатывается процесс правки абразивных кругов на металлической связке с помощью реакции электролиза.

5. Ультразвуковая обработка

Особый акцент в развитии ультразвукового метода делается на достижении минимального управляемого съема при обработке хрупких, твердых токонепроводящих материалов типа стекла, кварца, сапфира, керамики, кремния и т.п. Получение полостей малых размеров в таких материалах обычной ультразвуковой обработкой затруднено из-за сложностей изготовления и эксплуатации ультразвукового инструмента с микроразмерами. Поэтому отверстия диаметром менее 100 мкм обработать ультразвуковым методом практически не удавалось.

Японскими исследователями из Института прикладной науки Токийского университета (Institute of Industrial Science, University of Tokyo), предложена технология обработки микроотверстий диаметром 20 мкм в кремнии с помощью вращающегося ультразвукового инструмента [11]. Дальнейшее уменьшение диаметра прошиваемых отверстий ограничено значительным эксцентриситетом при вращении массивного концентратора с инструментом (4 мкм).

Этими же исследователями разработана другая технология, при которой ультразвуковые колебания возбуждаются не в инструменте, а сообщаются обрабатываемой заготовке [12]. Заготовка закрепляется на ультразвуковом концентраторе, а вращающийся инструмент подается на заготовку. При этом эксцентриситет при вращении инструмента составляет менее 0,5 мкм.

Разработанная технология использовалась при обработке отверстий диаметром 5 мкм в кварце и кремнии. Диаметр инструмента составлял 4 мкм, материал инструмента – карбид вольфрама.

Учитывая, что коэффициент износа инструмента из карбида вольфрама составляет 0,5, исследователи предложили в качестве материала инструмента для ультразвуковой прошивки микроотверстий использовать металлоалмазный композит, что позволило снизить коэффициент износа до 0,01. Благодаря наличию металлической связки для профилирования алмазосодержащего инструмента возможно использование процесса электроразрядного микрошлифования проволочным электродом (WEDG – Wire Electro Discharge Grinding) [13].

6. Биообработка

Очень необычный метод биологической размерной обработки металлических материалов разрабатывается в лаборатории нетрадиционной обработки проф. Е. Уно. В качестве предпосылок для развития этого метода в лаборатории именно Университета Окаямы можно назвать тот факт, что этот университет был создан в XIX веке на базе известной в Японии медицинской школы. Кроме того, в университете традиционно сильны научные школы химии, биологии, а в последнее время – геной инженерии, геномики.

Суть предложенного метода заключается в использовании для сверхлокального разрушения материала особого вида бактерий, способных "перерабатывать" или "есть" металл. В природе существует целый класс организмов – литотрофы (lithotrophs), которые непосредственно из воздуха потребляют двуокись углерода как источник углерода для питания. Как подкласс среди литотрофов

различают химолиотрофы, которые в качестве источника энергии используют энергию окисления неорганического вещества (например, железа, серы). К химолиотрофам относятся микроорганизмы (бактерии) типа тиобацилус феррооксидант (*Thiobacillus ferrooxidans*) и тиобацилус тиооксидант (*Thiobacillus thiooxidans*). Так, например бактерия тиобацилус феррооксидант может получить энергию при окислении двухвалентного железа. Эта бактерия имеет очень малые размеры – диаметр около 0,5 мкм, длина 1 мкм, что является большим преимуществом при микрообработке (нано-обработке), так как объемы удаляемого материала будут очень малыми. Другим преимуществом такого вида обработки является полное отсутствие дефектного слоя или зоны термического влияния после выполнения процесса.

К настоящему времени известно семь типов бактерии тиобацилус феррооксидант, которые зарегистрированы в Американской коллекции типов культур (American Type Culture Collection – ATCC). Из них четыре типа исследованы как пригодные для размерной обработки материалов – ATCC 13598, ATCC 13661, ATCC 33020. Эти бактерии живут в специфических условия подземных рудных вод и хорошо сохраняются в концентрированных растворах кислот при pH меньше 3 [14].

При обработке поверхность материала, не подлежащая обработке, изолируется путем нанесения маски на поверхность фотолитографическим способом. При экспериментальных исследованиях обнаружено влияние различных факторов на производительность процесса (съем материала) [15]. Прежде всего, съем материала (оцениваемый по глубине обработанной полости) линейно зависит от времени обработки. Так, удельный съем при обработке чистого железа составляет 14 мкм/ч. При тех же условиях удельный съем меди составляет 20 мкм/ч.

Для интенсификации процесса образец (изделие) вместе с биологическим раствором бактерий целесообразно периодически встряхивать. Этим обеспечивается периодическое возобновление контактов "незадействованных" бактерий с обрабатываемым материалом. Вне зависимости от обрабатываемого материала оптимальная скорость встряхивания составляет 160 циклов в минуту.

Удельный съем зависит также от температуры биологической среды. Оптимальная температура среды при использовании бактерий ATCC 13598 для обработки чистого железа составляет 40°C, для обработки меди – 30°C.

Обнаружено также влияние электрического поля на процесс биообработки. Интенсивность съема можно повысить вдвое приложением электрического постоянного тока напряжением 0,5 В и силой тока 0,01 А к заготовке и вспомогательному электроду.

Помимо использования бактерий для обработки металлов в лаборатории проф. Е. Уно также изучается технология размерной обработки пластических материалов с помощью микроорганизмов [16].

Предложенный новый метод микрообработки делает лишь первые шаги, но уже сейчас видны уникальные возможности его дальнейшего использования при изготовлении микро- и наноприборов и устройств. Поэтому ряд других научных лабораторий и групп подключились к исследованиям в этом направлении (Okayama University of Science, Industrial Technology Center of Okayama Prefecture, Joining and Welding Research Institute of Osaka University, Technology Research Center of Osaka Prefecture и др.).

7. Факторы, стимулирующие развитие нетрадиционных методов обработки в Японии

а) Главным фактором, определяющим эффективное и очень интенсивное развитие высоких технологий в Японии и прежде всего нетрадиционных методов обработки материалов, является понимание на уровне общественного сознания, структур бизнеса, правительства и парламента, определяющего значение развития научно-технических исследований, инженерного образования как приоритетных направлений в закреплении лидирующих позиций страны среди других промышленно развитых стран мира. Практически каждый член общества осознает, что страна, не имеющая источников энергии, сырья, располагающая только 7% собственной территории, пригодной для использования (остальное – горы), расположенная в зоне повышенной сейсмоопасности (до 380 землетрясений в год), имеющая практически самую высокую в мире плотность населения, геополитически расположенная отнюдь не в самом лучшем месте Земли, может выжить в современной острой конкурентной борьбе в мире и, более того, быть одним из лидеров этого мира только за счет производства и экспорта наукоемкой продукции, разработки высокоэффективной техники и технологии;

б) Первый из названных факторов влечет за собой и соответствующие акценты в бюджете страны – на науку, образование, культуру госбюджет предусматривает основные объемы расходов (только на поддержку технологических инноваций в бюджете 1999 г. предусматривалось 120,6 миллиардов йен или один миллиард долларов, а в бюджете на 2000 г. эти ассигнования увеличены до

500 миллиардов йен, или 5 миллиардов долларов [17]). Огромная финансовая поддержка оказывается образованию и развитию научных исследований со стороны частного капитала;

в) В обществе социальный статус ученого, профессора, исследователя, лектора, учителя поддерживается очень высоко. Только в Японии существует особая форма уважительного обращения к ученому, очень уважаемому учителю – Сенсей (наряду с существованием принятых и в других странах различных почетных званий, наград, орденов, премий и т.п.);

г) Органами местного самоуправления, представителями бизнеса при поддержке государства практически во всех префектурах созданы Центры высокоэффективных технологий или Промышленные технологические центры, Технопарки (Advanced Material Processing Institute Kinki, Industrial Technology Center of Okayama Prefecture, Joining and Welding Research Institute of Osaka University, Institute of Laser Science of University of Electro-Communications, R&D Institute for Photonics Engineering, Institute of Laser Technology, Industrial Technology Institute of Yamaguchi Prefecture и др.), которые оснащены самым современным технологическим оборудованием, а также уникальными приборами и установками для оценки различных параметров технологических процессов. Студенты и профессора университетов могут пользоваться возможностями таких центров бесплатно, работники частных предприятий могут проводить исследования за умеренную плату. Главная цель центров – оказать профессиональную помощь в разработке новейшей техники и технологии, стимулировать наиболее быстрое воплощение новых идей и разработок в конкретный экспортный продукт;

д) Практически во всех крупных университетах страны в составе всех крупнейших промышленных компаний созданы и эффективно работают лаборатории, отделы высоких технологий, подразделения, занимающиеся разработкой нетрадиционных методов обработки материалов;

е) В стране создана целая сеть региональных общественных профессиональных ассоциаций, обществ новейших нетрадиционных технологий (Society of Electromachining Engineers, High Temperature Society, Japan Society of Precision Engineering, Laser Technology Society и др.), способствующих объединению усилий на решении актуальных проблем новых технологий, обмену информацией, обеспечивающих связь между разработчиками и потребителями новейшей техники и технологии;

ж) Япония активно и даже в определенной мере агрессивно проводит политику научно-технической экспансии. Ее специалисты очень широко представлены в различных международных профессиональных научно-технических ассоциациях и сообществах. В составе самой престижной организации в мире в области машиностроения – Международного института машиностроения – СИРПа (International Institute for Production Engineering Research) представительство Японии составляет 41 членов и 18 ассоциированных членов. Председателем научно-технического комитета СИРПа по электротехнологии (STC "E") является профессор Т. Масузава (Токийский университет). Большое количество японских ученых входит в состав Лазерного института Америки (LIA), Международного института инженеров электронщиков и электротехников (IEEE), Международного общества оптической техники (SPIE), Американского общества инженеров-механиков (ASME) и других международных профессиональных организаций.

От 5 до 15% научных докладов на крупнейших международных конгрессах и симпозиумах по новейшим технологиям (Генеральная Ассамблея СИРПа, ISEM – Международный симпозиум по электрообработке материалов, LAMP – Международная конференция по применению лазеров для обработки материалов, ICALEO – Международная конференция по применению лазеров и оптоэлектроники и др.) представлено обычно японскими учеными.

8. Выводы

1. Разработка нетрадиционных методов обработки материалов является приоритетным направлением в развитии науки и технологии Японии.

2. Для Японии как страны, не располагающей источниками сырья и энергии, но обладающей мощным интеллектуальным и промышленным потенциалом, развитие новейших технологий является единственным средством реализации высокоэффективной экспортно-ориентированной экономики.

3. Японскими исследователями особое внимание уделяется созданию новых типов лазеров для промышленного использования и разработки новейших технологий на их основе.

4. Уникальные результаты достигнуты в области микро- и нанобработки с помощью лазерного, электроразрядного, электрохимического и ультразвукового методов.

5. Разработан уникальный метод размерной микрообработки металлических материалов с помощью бактерий, что открывает новые возможности в миниатюризации создаваемых приборов и устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Gerhard Schweitzer*. Technology in Switzerland – on the Way to Intelligent Machine, CIRP Internal Documents and Reports, General Assembly, Montreux, Switzerland, 1999. P. 9–16.
2. *Yoshiharu Namba, Liming He*. An Investigation of a Unit-Machined Shape for the Three-Dimensional Micromachining of Silicon Surfaces with a Pulsed Ultraviolet Laser, Int. J. Japan Soc. Pres. Eng. Vol. 32. № 1. 1998. P. 13–18.
3. *Namba Y.* Laser forming of Metals and Alloys, Proceedings of LAMP'87, May, 1987, Osaka, Japan, P. 601–606.
4. *V.S.Kovalenko*. Research report "Material Processing with Laser Beam", JSPS, Okayama University, Dec.25, 1999.
5. *Akira Matsunawa, Naoki Seto, Jong-Do Kim, Masami Mizutani, Seiji Katayama*. Dynamics of Keyhole and Molten Pool in High Power CO₂ Laser Welding, Proceedings of SPIE International Conference "High-Power Lasers in Manufacturing, 1–5 November 1999.
6. *Akira Okada, Yoshiyuki Uno, Yasuhiro Okamoto*. A New Slicing Method of Monocrystalline Silicon Ingot by Wire/EDM, Proc. of the 12th Internat. Symposium on Electro-Machining, 1998. P. 417–424.
7. *Masanori Kunieda, Masahiro Yoshida*. Electrical Discharge Machining in Gas, Annals of the CIRP, Vol. 46/1, 1997. P. 143–146.
8. *Hiroyuki Kojima, Tetsuya Yoshida, Masanori Kunieda*. Detection of Spark Location in EDM Sinking, Int. J. Japan.Soc. Prec. Eng. Vol. 25. № 2. 1991. P. 100–101.
9. *Masanori Kunieda, Masahiro Yoshida, Yoshinobu Akatmatsu*. Influence of Micro Indents Formed by Electro-Chemical Jet Machining on Rolling Bearing Fatigue Life, PED-Vol.64, AMSE, Manufacturing Science and Engineering, Editor: K.F. Ehamann, Book. № H00861. 1993. P. 693–699.
10. *Masanori Kunieda, Ritsu Katoh, Yasushi Mori*. Rapid Prototyping by Selective Electrodeposition Using Electrolyte Jet, Annals of the CIRP. Vol. 47/1. 1998. P. 161–164.
11. *Egashira K., Masuzawa T., Fugino M., Sun X.* Application of USM to Micromachining by On-the-machine Tool Fabrication, Intern. J. of Electrical Machining, № 2. 1997. P. 31–36.
12. *Kai Egashira, Takahisa Masuzawa*. Microultrasonic Machining by the Application of Workpiece Vibration, Annals of the CIRP. Vol.48/1. 1999. P. 131–134.
13. *Masuzawa T., Fujino M., Kobayashi K., Suzuki T.* Wire Electro-Discharge Grinding For Micromachining, Annals of the CIRP. Vol. 34/1. 1985. P. 431–434.
14. American Type Culture Collection, Catalog of Bacteria and Bacteriophages, 17th ed., 1989.
15. *Yoshiyuki Uno, Toshiaki Kaneda, Seiichi Yokomizo*. Fundamental Study on Biomachining (Machining of Metals by Thiobacillus Ferrooxidans), JSME International Journal, Ser. C. Vol.39. № 4. 1996. P. 837–842.
16. *Toshiaki Kaneeda, Seiich Yokomizo, Yoshiuki Uno*. Microremoval Process of Plastic by Microorganism, Proc. of the 3rd International Conference on Ecomaterials, p. 41–44.
17. Cabinet OKs Y85 trillion budget, The Japan Times, Saturday, Dec.25, 1999.

Поступила 03.03.2000

Summary

In article the last achievements of the Japanese developers in the field of laser, electrodischarge, electrochemical, ultrasonic, biological and other nontraditional methods of material machining are considered. Some developments in the field of micro- and nano-technology are shown, the data on a number of the national programs are given, some features of organization of scientific researches at universities and firms of Japan working in the field of development of nontraditional technologies are considered. The article is based on the authors experience of work in Japan as a Visiting Professor of Okayama University in 1999.

О.Б. Гирин, В.П. Хлынецв

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ ЭЛЕКТРООСАЖДАЕМЫХ МЕТАЛЛОВ

*Украинский государственный химико-технологический университет,
пр. Гагарина, 8, Днепропетровск, 49005, Украина
Национальная металлургическая академия Украины,
пр. Гагарина, 4, Днепропетровск, 49635, Украина*

В работах [1–3] было установлено, что металлы при электроосаждении кристаллизуются из переохлажденной металлической жидкой фазы, образующейся на катоде. Как указывается в книге [4], приоритет в получении данного научного результата принадлежит авторам работ [1–3]. В этой книге, в частности, отмечается, что “исследуя дифракцию рентгеновских лучей, рассеянных металлами непосредственно в процессе их электролитического осаждения, Гирин и Воробьев пришли к нетрадиционному заключению, что металлы при электрокристаллизации проходят стадию жидкого состояния. Это необыкновенное явление было впоследствии подтверждено с использованием методов полевой ионной микроскопии и дифференциального термического анализа. Далее в этой же книге подчеркивается, что вышеуказанные авторы “разработали новый подход к объяснению формирования структуры электроосажденных металлов”. Основы этого подхода были заложены в работах [5–7], в которых был рассмотрен механизм электрокристаллизации металлов с участием металлической жидкой фазы. Данная работа является продолжением цикла исследований по обоснованию и подтверждению обнаруженной стадии электрокристаллизации металлов.

Если предположить, что электроосаждаемые металлы кристаллизуются из переохлажденной металлической жидкости, то следует ожидать неравномерного образования и роста электроосадков на поверхности катода. Действительно, многочисленные данные [8–10] свидетельствуют о том, что формирование и рост электроосадков на поверхности катода происходит крайне неравномерно, характеризуясь возникновением и развитием в локальных местах катода отдельных “островков”. Неравномерный рост таких “островков”, хаотичное прекращение роста, образование их в других местах катода и возобновление роста ранее образованных “островков” можно объяснить, исходя из того, что промежуточное жидкое состояние электроосаждаемых металлов обусловлено очень быстрым (взрывным) характером их выделения вследствие цепной реакции электрохимического образования атомов.

Как известно, характерной особенностью цепных реакций является взаимосвязанность элементарных актов, когда происшедший акт вызывает один или несколько других. Во всякой цепной реакции процесс развивается вследствие образования неустойчивых промежуточных продуктов (валентно ненасыщенных атомов или радикалов), называемых активными центрами, которые стимулируют протекание других актов реакции. Для цепных реакций характерны три следующие стадии: 1) зарождение реакции вследствие возникновения активных центров, 2) быстрое (взрывное) развитие реакции и 3) прекращение реакции вследствие исчерпания активных центров [11, 12].

Реакция электрохимического образования атомов обычно носит многостадийный характер [3]. При этом некоторые стадии реакции требуют энергии активации. Поэтому образующиеся на катоде или в непосредственной близости от его поверхности атомы электроосаждаемого металла обладают повышенной энергией и находятся в возбужденном состоянии, характеризующемся тем, что электроны в них находятся на более высоких энергетических уровнях. Время жизни таких возбуж-

денных атомов составляет порядка 10^{-8} с, передача окружающим атомам избытка кинетической энергии требует примерно такого же времени.

Образующиеся возбужденные атомы, являясь активными центрами, стимулируют протекание других актов реакции, и процесс электрохимического образования атомов приобретает черты цепной реакции. Скорость протекания такой реакции значительно превышает скорость возможной диффузии атомов осаждаемого металла по поверхности катода. Поэтому при электроосаждении металла на катоде в результате цепной реакции лавинообразно возникают атомы, не имеющие дальнего порядка в их расположении.

Кинетические уравнения, описывающие цепную реакцию электрохимического образования атомов, можно представить в виде

$$\frac{dN}{d\tau} = Q - \alpha \cdot N \cdot n_1, \quad (1)$$

$$\frac{dn_1}{d\tau} = \alpha \cdot N \cdot n_1 - \beta \cdot n_1, \quad (2)$$

$$\frac{dn}{d\tau} = \beta \cdot n_1 - \gamma \cdot n, \quad (3)$$

где N – количество ионов, приходящихся на единицу площади двойного электрического слоя электролита; Q – плотность потока ионов из объема электролита в двойной электрический слой, пропорциональная плотности тока; n_1 – количество возбужденных атомов; n – количество обычных атомов в “островке”; α – коэффициент, пропорциональный вероятности протекания реакции ион – возбужденный атом; β – коэффициент, пропорциональный вероятности перехода возбужденного атома в нормальное (обычное) состояние; γ – коэффициент, пропорциональный вероятности перехода атомов из “островка” в “одиночное” состояние.

Уравнение (1) определяет скорость изменения количества ионов в прикатодном слое электролита за счет притока ионов к поверхности катода (величина Q) и убыли их за счет образования продуктов реакции (пропорциональной $N \cdot n_1$). В уравнении (2) учтена убыль количества возбужденных атомов (вычитаемое $\beta \cdot n_1$) в связи с их переходом в нормальное (обычное) состояние. В уравнении (3) член $\gamma \cdot n$ учитывает реакцию диссоциации образовавшегося “островка”.

Решение системы уравнений (1)–(3) проводили при параметрах процесса: $\alpha = 0,01$; $\beta = 0,1$; $\gamma = 10^4$; $Q = 5 \cdot 10^5$ А/дм², наиболее полно совпадающих с реально наблюдаемыми значениями величин структуры электролитических покрытий [14]. Для учета дискретности изменения переменных N , n_1 и n при решении системы уравнений (1)–(3) счет прекращали при достижении наименьшим переменным n_1 значения “единица”. Решение возобновляли через случайно выбранный промежуток времени, что более соответствует сути реально протекающих процессов.

Результаты решения системы уравнений (1)–(3) представлены на рис. 1, из которого видно, что процесс выделения электроосаждаемого металла носит очень быстрый (взрывной) характер. После взрывного образования некоторого количества атомов процесс затухает в связи с исчерпанием ионов металла в прикатодном слое, а с образованием некоторого количества возбужденных атомов вновь быстро возобновляется (рис. 1).

Из рис. 1 следует, что время взрывного выделения некоторого количества атомов в “островок”, то есть длительность одного акта взрывного роста, составляет примерно 10^{-7} с, а длительность стадии, в течение которой прекращается рост “островка”, – примерно $2 \cdot 10^{-6}$ с. За один акт взрывного роста “островок” увеличивается в среднем на 40–60 атомов (рис. 1). В связи с очень быстрым протеканием одного акта взрывного роста, в результате которого образуется примерно 40–60 атомов, эти атомы не успевают сформировать структуру с дальним порядком в их расположении. Множество таких образований (ассоциатов) атомов, выделяющихся лавинообразно в различных местах на поверхности катода или растущего осадка, представляют собой жидкую фазу электроосаждаемого металла.

Чтобы уточнить, в каком агрегатном состоянии находятся образующиеся ассоциаты атомов (в жидком или твердом), провели анализ свободной энергии системы из таких ассоциатов. Свободную энергию системы из ассоциатов атомов, возникших на катоде в результате электрохимической реакции, F можно представить в виде

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4, \quad (4)$$

где F_1 – свободная энергия поступательного движения ассоциатов;

F_2 – свободная энергия вращательного движения ассоциатов;

F_3 – свободная энергия колебаний атомов в ассоциатах;

F_4 – свободная энергия взаимодействия ассоциатов между собой.

Поскольку вклад в полную свободную энергию, обусловленный энергией взаимодействия ассоциатов, мал, при определении остальных членов уравнения (4) воспользовались положениями классической теории зарождения новой фазы [15]. В классической теории зарождения изменение свободной энергии всей системы зародышей рассматривается, исходя из стандартного состояния “газа” подобных зародышей. “Газ” ассоциатов, упакованных достаточно плотно, может моделировать структуру жидкости. Поэтому составляющие свободной энергии “газа” ассоциатов атомов, возникших на катоде при электроосаждении, можно представить как

$$F_i = -k \cdot T \cdot \ln Z_i, \quad (5)$$

где F_i – составляющая свободной энергии “газа” ассоциатов атомов; Z_i – статистическая сумма состояний для отдельных видов движения ассоциатов атомов; k – постоянная Больцмана.

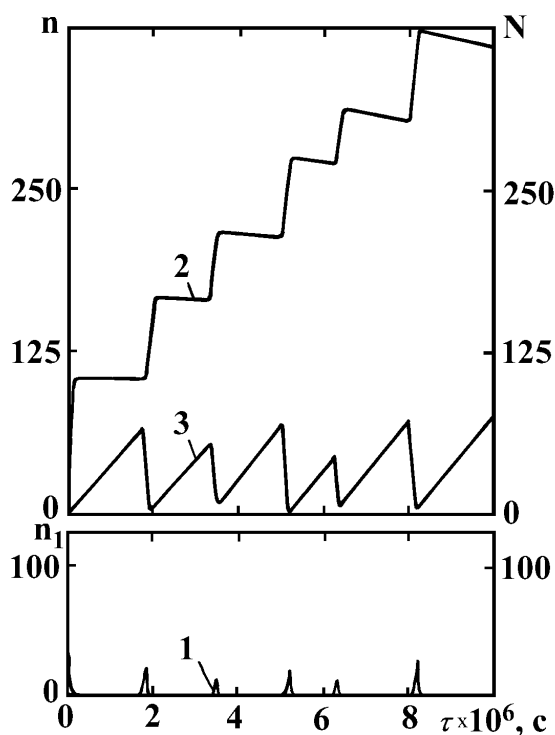


Рис. 1. Изменение количества возбужденных атомов (1), обычных атомов в “островке” (2) и ионов в прикатодном слое электролита (3) в зависимости от времени выделения электроосаждаемого металла.

Статистическая сумма состояний для поступательного движения ассоциатов:

$$Z_1 = \left(\frac{2\pi M k T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2} N_a} \cdot V_a^{N_a}, \quad (6)$$

где $M = m \cdot n$ – масса одного ассоциата; m – масса одного атома; n – количество атомов в ассоциате; V_a – объем “газа”, приходящийся на один ассоциат; N_a – количество ассоциатов; h – постоянная Планка; T – температура среды.

Полагая $N_a = \frac{N}{n}$, а $V_a = \frac{V}{N_a} = \frac{V}{N} \cdot n$, получим

$$Z_1 = \left(\frac{2\pi m k T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2} \frac{N}{n}} \cdot \left(\frac{N}{n} \right)^{\frac{N}{n}} \cdot n^{\frac{5}{2} \frac{N}{n}}, \quad (7)$$

где V – мольный объем; N – число Авогадро.

Для вращательного движения ассоциатов статистическая сумма состояний:

$$Z_2 = \left[\frac{1}{\sigma} \cdot \pi^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{8\pi^2 k T I}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \right]^{N_a}, \quad (8)$$

где I – момент инерции ассоциата; σ – число неразличимых ориентаций ассоциата.

Считая, что форма ассоциата близка к сферической, находим

$$I = \frac{2}{5} m \cdot n \cdot r^2, \quad (9)$$

где $r = \left(\frac{3\Omega}{4\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot n^{\frac{1}{3}}$ – радиус ассоциата; Ω – объем, приходящийся на один атом в ассоциате.

Подставляя (9) в (8), получим

$$Z_2 = \left[\frac{c}{\sigma} \cdot \left(\frac{2\pi mkT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \Omega \cdot n^{\frac{5}{2}} \right]^{\frac{N}{n}}, \quad (10)$$

где $c = 4,768$.

Статистическая сумма состояний для колебательного движения атомов в ассоциатах в гармоническом приближении:

$$Z_3 = \prod_{i=1}^{3n-6} \left(1 - e^{-\frac{h\nu_i}{kT}} \right)^{-\frac{N}{n}}, \quad (11)$$

где ν_i – дебаевская частота.

Полагая все частоты колебаний атомов в ассоциатах одинаковыми и равными дебаевской частоте, уравнение (11) представим в виде

$$Z_3 = \left(1 - e^{-\frac{\Theta}{T}} \right)^{-\left(\frac{3n-6}{n}\right)N}, \quad (12)$$

где Θ – дебаевская температура.

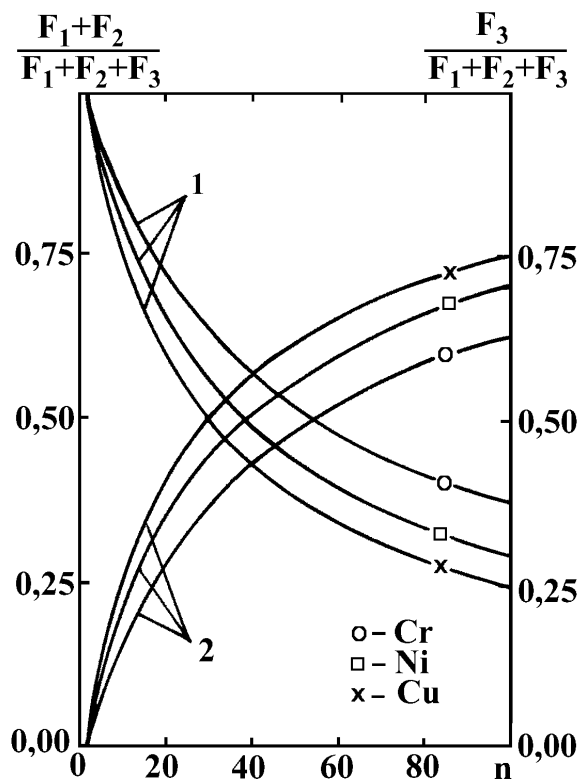


Рис. 2. Изменение вклада составляющих $F_1 + F_2$ (1) и F_3 (2) в свободную энергию “газа” ассоциатов атомов электроосаждаемых металлов в зависимости от количества атомов в ассоциатах.

Используя соотношения (7), (10) и (12), по формуле (5) определили соответствующие составляющие свободной энергии “газа” ассоциатов. Для оценки агрегатного состояния ассоциатов использовали параметр

$$\eta = \frac{F_1 + F_2}{F_1 + F_2 + F_3}, \quad (13)$$

который характеризует близость среды к газообразному состоянию, и параметр

$$\zeta = \frac{F_3}{F_1 + F_2 + F_3}, \quad (14)$$

характеризующий близость среды к твердому состоянию. Очевидно, что для газа одиночных атомов $\eta = 1$ или $\zeta = 0$, а для твердого тела $\eta = 0$ или $\zeta = 1$. Чем ближе η к 1 (или ζ к 0), тем более газообразна среда, а при стремлении η к 0 (или ζ к 1) среда ближе к твердому телу. Отсюда следует, что при равенстве величин η и ζ среда будет соответствовать жидкому состоянию.

Из рис. 2 видно, что при количествах атомов в ассоциатах электроосаждаемых меди, никеля и хрома, равных соответственно 30, 38 и 54 (когда величины η и ζ равны), агрегатное состояние таких ассоциатов будет жидким. Определенное из рис. 2 количество атомов в ассоциатах, имеющих жидкое состояние, практически совпадает по величине со средним количеством атомов, выделяющихся в результате одного акта взрывного роста (рис. 1).

Таким образом, обнаруженное в работах [1–3] жидкое состояние электроосаждаемых металлов обусловлено очень быстрым (взрывным) характером их выделения вследствие цепной реакции электрохимического образования атомов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гурин О.Б., Воробьев Г.М.* Изменение дифракции рентгеновских лучей, рассеянных металлами в процессе их электролитического осаждения // Журнал физической химии. 1988. Т.62. № 5. С. 1347–1349.
2. *Girin O.B.* Substructure Formation and Texture in Electrodeposits // J.Electronic Materials. 1995. V.24. № 8. P. 947–953.
3. *Girin O.B.* Substructure Formation and Texture in Electrodeposits // Defect Structure, Morphology and Properties of Deposits, Warrendale, PA, USA: TMS, 1995. P. 61–75.
4. *Lyakishev N.P., Gasik M.I.* Metallurgy of Chromium. New York: Allerton Press Inc., 1998. P. 537–538.
5. *Гурин О.Б., Воробьев Г.М.* Субструктура и механизм электрокристаллизации металлов // Тезисы докладов IX Всесоюз. научно-технич. конф. по электрохимической технологии. Казань, 1987. С. 109–110.
6. *Гурин О.Б., Воробьев Г.М.* Текстура, тонкая кристаллическая структура и механизм образования электролитических покрытий // Тезисы докладов V Всесоюз. конф. по текстурам и рекристаллизации в металлах и сплавах. Уфа, 1987. С. 89–90.
7. *Girin O.B.* Nonconventional X Ray Diffraction Techniques for Coating Characterization // Solidification 1998, Warrendale, PA, USA: TMS, 1998. P. 161–169.
8. *Green M.P., Hanson K.J., Carr R., Lindau I.* STM Observations of the Underpotential Deposition and Stripping of Pb on Au (111) under Potential Sweep Conditions // J.Electrochem. Soc. 1990. V.137. № 11. P. 3493–3498.
9. *Nishitani R., Kasuya A., Nishina Y.* In Situ STM Observations of Metal-Liquid Interface and Electroplating Process // Hyomen Gijutsu. 1992. V.43. № 5. P. 373–377.
10. *McVay L., Muller R.H., Tobias C.W.* Application of Videomicroscopy to In Situ Studies of Electrodeposition // J.Electrochem. Soc. 1989. V.136. № 11. P. 3384–3387.
11. *Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А.* Физическая химия. М., 1976. С. 349–351.
12. *Хмельницкий Р.А.* Физическая и коллоидная химия. М., 1988. С. 123–125.
13. *Бокрис Дж., Дамьянович А.* Механизм электроосаждения металлов // Современные аспекты электрохимии. М., 1967. С. 294–295.
14. *Поветкин В.В., Ковенский И.М.* Структура электролитических покрытий. М., 1989. С. 6–23, 50–76.
15. *Кристиан Дж.* Теория превращений в металлах и сплавах. Ч.1. Термодинамика и общая кинетическая теория. М., 1978. С. 583–594.

Поступила 03.02.2000

Summary

Mechanism of liquid phase formation in metals during electrodeposition is covered. It is shown that the liquid state of a metal being electrodeposited results from very rapid, explosion-like plating-out due to a chain reaction of electrochemical formation of atoms. Kinetic equations describing the chain reaction are put forward.

В.А. Тимощенко, Е.В. Голдыш

ИЗБИРАТЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗНАШИВАНИЮ

*Опытный завод ИПФ АН РМ,
ул. Миорица, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова*

Для устойчивой работы машин и агрегатов следует обеспечить выполнение функционального назначения их частей с учетом неоднородности условий взаимодействия, то есть их равнопрочность и равное сопротивление изнашиванию. Но поскольку эти требования чаще не реализованы, то завышается сквозная материалоемкость продукции, а конструкция работает неустойчиво вследствие местных повреждений, локального преждевременного нарушения нормированных условий работы.

Для повышения работоспособности деталей машин надо установить степень соответствия детали и ее элементов функциональному назначению в системе конструкции и отклонений от нормы в процессе эксплуатации, а затем привести техническую систему в функциональное равновесие [1]. Механизмы изнашивания зависят от механической схемы нагружения, жесткости конструкции, условий взаимодействия контактирующих поверхностей и их рельефа; контактирующих материалов и сред, их реальных свойств в конкретных условиях; физико-химических процессов, проявляющихся на границе раздела. Поскольку взаимодействие неоднородно, то важно установить локальные особенности взаимодействия деталей или деталей и контактирующих материалов, сред, с учетом которых надо назначать избирательное воздействие с целью обеспечения соответствия реальным условиям.

Упрочняющие покрытия способны обеспечить существенное повышение износостойкости поверхности при учете величины и эпюры давлений, относительной скорости перемещения контактирующих поверхностей и проявляющихся при этом локальных явлений, величины локальных температур. Избирательным нанесением покрытий с определенными параметрами [3] на взаимодействующие поверхности решалась двуединая задача: формировались выступы рельефа высокой несущей способности и поверхностный слой, предотвращающий адгезионное охватывание взаимодействующих в процессе работы поверхностей, в результате чего выравнивалось сопротивление изнашиванию всей детали.

Это видно на примерах, иллюстрирующих такие подходы к обеспечению равного сопротивления изнашиванию.

Цилиндры двигателей внутреннего сгорания испытывают интенсивное местное изнашивание. Большая часть “фрикционной мощности” расходуется на преодоление сил трения между поршневыми кольцами и цилиндрами. Силы трения увеличиваются непосредственно после верхнего и нижнего крайних положений вследствие поворота верхнего компрессионного кольца около кромки кольцевой канавки в поршне и его защемления.

Это оказывает локальное давление на гильзу цилиндра (рис. 1), способное вызвать в этих зонах ее поверхностное пластическое деформирование. Очаг пластической деформации при

закругленной рабочей поверхности кольца (рис. 1,а) ограничен областью *bacde*. На линии *ac* материал гильзы получает наибольшее приращение деформации сдвига [2]

$$\Delta \varepsilon_i = \Delta v_\tau / v_n = 2/2 \sin 2\chi,$$

где Δv_τ – разрыв касательной составляющей скорости течения деформируемого металла на линии *ac*; v_n – нормальная составляющая скорости; χ – угол между касательной к линии *ac* в точке *a* и направлением перемещения кольца.

Величина угла χ связана с коэффициентом трения и для схемы на рис. 1,б равна $\chi = 1/2 \arccos 2\mu - \varphi$, где μ – коэффициент внешнего трения, $0 \leq \mu \leq 0,5$; φ – угол поворота кольца.

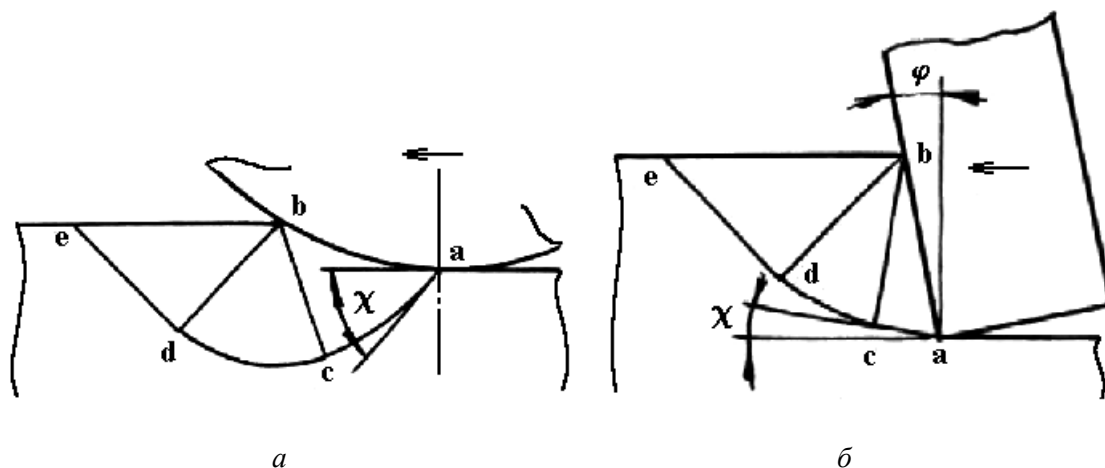


Рис. 1. Схемы деформирования стенки гильзы цилиндра при скольжении закругленной (а) и плоской (б) поверхностей верхнего компрессионного кольца.

При воздействии острой кромки кольца очаг деформации имеет вид, показанный на рис. 1,б.

Циклическое нагружение стенки гильзы цилиндра ведет к исчерпанию ресурса пластичности в поверхностном слое стенки и в результате – к отделению частиц металла, то есть к ее шелушению. Интенсивность отделения частиц и их размеры зависят от параметров рабочей поверхности верхнего компрессионного кольца, силы прижима его к стенке и пластических свойств материала гильзы. Анализ напряженного состояния в очаге деформации показывает, что для повышения несущей способности стенки необходимо снизить усилие воздействия кольца на стенку, коэффициент внешнего трения и повысить пластичность поверхностного слоя гильзы. Последнее достигается повышением сопротивления гильзы изнашиванию за счет нанесения покрытия путем гальванического хромирования с последующим местным (в зонах верхнего и нижнего крайних положений верхнего компрессионного кольца) меднением электроэрозионным легированием на мягких режимах. В качестве финишной операции лучше использовать алмазное выглаживание, так как хонингование менее эффективно.

Многие агрегаты, узлы технологического оборудования бумажного производства работают в сложных условиях. Размольные сектора, рабочие органы гидроразбивателя, вихревые очистители и другие детали подвержены интенсивному изнашиванию. Поскольку каждая деталь работает в специфических условиях, то необходимы индивидуальные анализ и выбор путей повышения устойчивости ее работы.

Так, вихревой очиститель, служащий для очистки бумажной массы от различных включений (песок, металлические частицы и др.), подвержен интенсивному изнашиванию, особенно в нижней части конического корпуса вблизи продольного сварного шва (рис. 2). Впадина наибольшего износа тянется вдоль выступа от сварного шва 1 на расстоянии *a*, определяемом зависимостью

$$a = 2f[2r(1/f - 1)]^{1/2},$$

где *f* – высота выступа; *r* – радиус рассматриваемого сечения корпуса.

Анализ условий работы, характера износа показывает, что в этой зоне изнашивание обусловлено кавитацией и истиранием. Вследствие снижения давления жидкости при переходе через порог (впадина после сварного шва-выступа) мелкие пузырьки пара схлопываются, высвобождая значительную энергию и вызывая интенсивное изнашивание поверхности. В этой же зоне усиливается и абразивный износ в силу резких ударов абразивных частиц о стенку.

Учитывая состав бумажной массы, уменьшить кавитационное и абразивное изнашивание лучше путем нанесения твердого покрытия в зоне 2 (рис. 2) электроэрозионным легированием на грубых режимах. Сформированные выступы покрытия способствуют наволакиванию на поверхность эластичной бумажной массы, защищающей стенку от вредного воздействия кавитации.

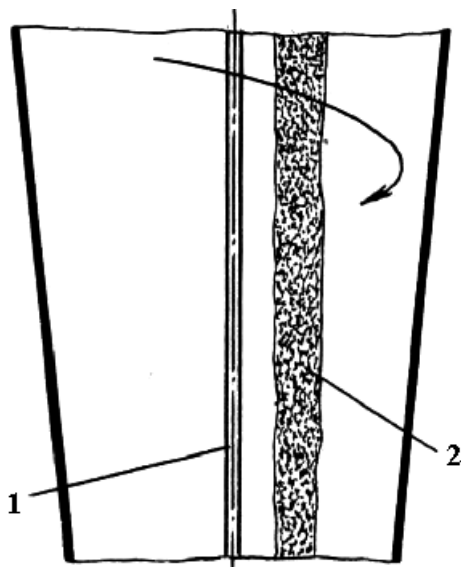


Рис. 2. Зона нанесения покрытия на стенку вихревого очистителя.

Для повышения ресурса лезвий шаберов сушильных цилиндров, верхних прессовых валов, грудного и сетководущих валов, валов каландра эффективно использование упрочняющих покрытий, наносимых электроэрозионным легированием избирательно, чтобы в процессе работы осуществлялось их самозатачивание. Покрытия наносили на мягких режимах электродами из стали, бронзы на переднюю грань клина ножа. Режимы легирования устанавливали с учетом условий работы конкретного ножа шабера [1, 3].

Поиск эффективных путей повышения устойчивости работы железнодорожного транспорта, поддержания комфортных условий при его эксплуатации требует системного подхода.

На колесную пару действуют силы, как показано на рис. 3. Здесь P_0 – статическая нагрузка от массы вагона (локомотива). Под действием сил P_1 и P_2 , смещенных относительно поверхностей опоры колес на рельсы, ось колесной пары упруго изгибается. Одновременно изгибаются шпалы, вызывая поворот рельсов. Но в силу несогласованности подсистем (колесная пара и шпалы с жесткозакрепленными рельсами) углы поворота колеса β_1 и рельса β_2 в общем случае будут неодинаковыми, то есть $\beta_1 \neq \beta_2$ (рис. 3,а). Поэтому колеса изнашиваются, как показано на рис. 4. Износ I дан в функции пути пробега колеса S . Различие и переменность углов β_i усиливаются из-за сложной пространственной деформации рельса в силу наличия стыков, поочередного прохождения по путям нагруженных товарных и пассажирских вагонов. Вследствие этих причин реализуется точечный упругопластический контакт (зоны контакта показаны стрелками на рис. 3,б, в). Причем чем меньше пятно контакта, тем больше будет степень пластической деформации. Поверхностное пластическое деформирование вызывает неуправляемое локальное пластическое течение металла колеса и рельса, образование волнистости, исчерпание ресурса пластичности и в результате микро- и макротрещины, сколы. Особенности динамического взаимодействия подвижного состава и пути усиливаются в процессе прохождения по одной колее грузовых и пассажирских составов, локомотивов и пустых вагонов, при движении на поворотах, стрелках, стыках рельсов.

Так как условия взаимодействия колеса и рельса переменны, то со временем их поверхностные слои получают значительную пластическую деформацию. Вследствие фазовых превращений, вызванных нагревом локальных слоев металла за счет тепла, выделяющегося в процессе пластической деформации, и интенсивным отводом тепла смежными холодными зонами, деформированный поверхностный слой толщиной около 10 мм приобретает высокую твердость. Под действием сжимающих напряжений он теряет продольную устойчивость, приобретая волнообразный характер с длиной волны 45–50 мм. Волнообразность рельсов и колес изменяет характер взаимодействия пары и создает постоянный источник шума при движении подвижного состава.

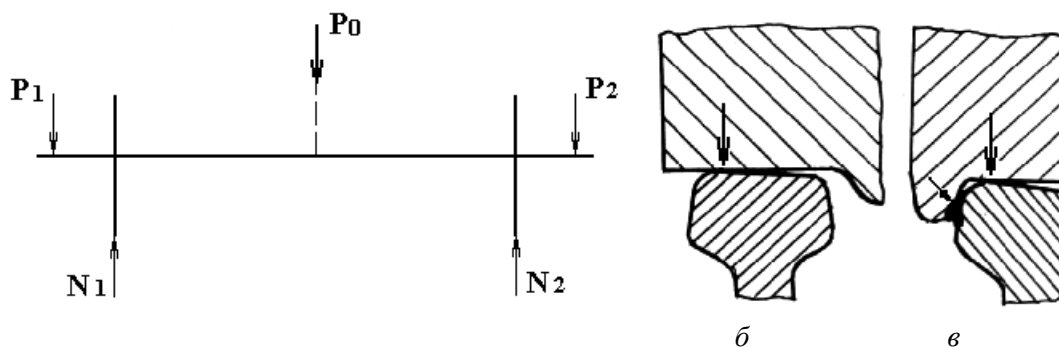
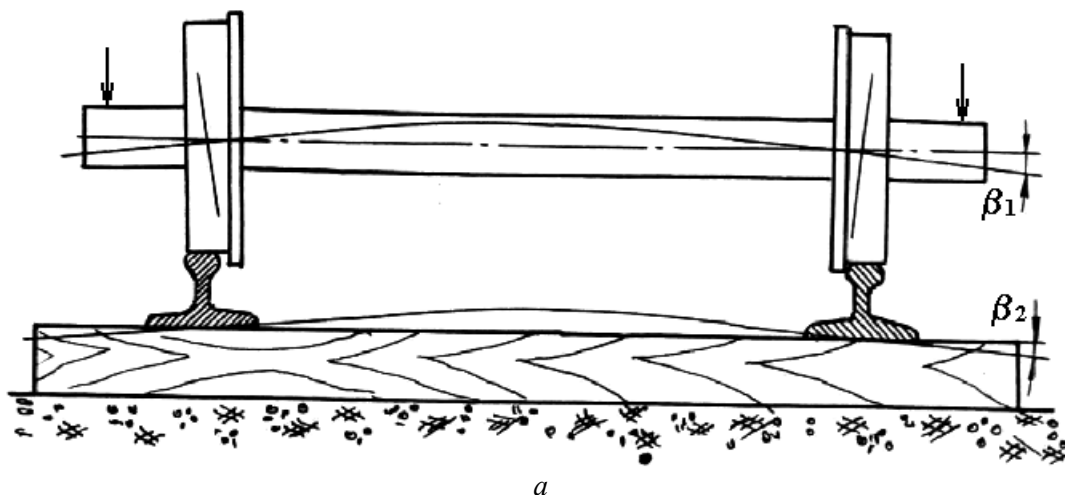


Рис. 3. Схема сил, действующих на колесную пару, повороты колеса и рельса (а), возможные зоны силового взаимодействия колеса и головки рельса (б, в).

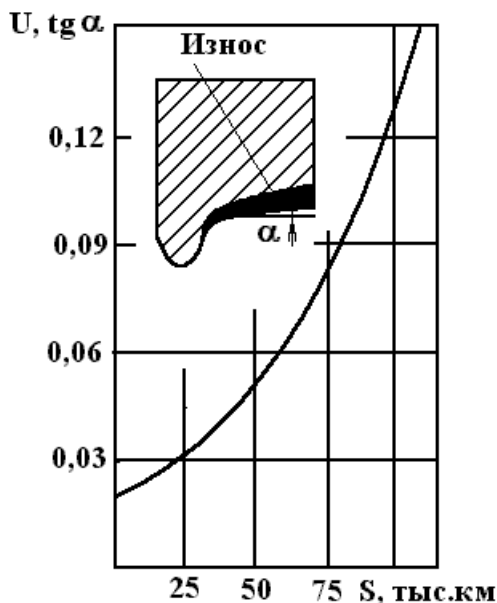


Рис. 4. Характер износа колеса в зависимости от пути пробега.

Поверхностный слой интенсивно упрочняется в местах выступов, ниже которых наблюдается зона разрыхления с микротвердостью ниже микротвердости исходного металла. В этих местах интенсивно исчерпывается ресурс пластичности металла, вследствие чего появляются трещины разрушения, перерастающие в распространенные дефекты. В числе дефектов шелушение поверхностей, выкрашивание, отслаивание и др. Локальное направленное течение металла приводит к другой группе дефектов, в числе которых ползун, навар, наплывы на фаску и гребень, волнообразование на контактных поверхностях.

Таким образом, в основу подхода к повышению ресурса пары колесо-рельс положен принцип универсальности и рациональности силового взаимодействия пары в различных реальных условиях, что ведет к увеличению опорной поверхности и глубины проникновения локальной упругопластической деформации и исключает волнообразование и “разрыхление” металла рельса. Это достигается, наряду с другими мерами, формированием на поверхности катания колеса и головки рельса определенной сетки повышенной твердости и износостойкости. Наряду с электроэрозионным легированием используются и другие методы, в том числе метод избирательного поверхностного пластического деформирования силами движущегося вагона. Параметры и характер сетки устанавливаются с учетом характера пути (климатическая зона, состояние путевого хозяйства, криволинейность пути, наличие спусков, зон торможения и т.п.), преобладающих видов перевозок. Методы и технология формирования износостойких слоев рассчитаны применительно к новым парам, а также эксплуатирующимся после капитального ремонта.

Комплексные исследования применительно к разнообразным деталям конструкций, машин, приборов и освоение результатов в производстве показали, что успех может быть достигнут при системном подходе к объекту, когда после уяснения степени соответствия детали функциональному назначению в системе конструкции и отклонений от нормы в процессе эксплуатации принимаются меры по приведению системы в функциональное равновесие. При этом особенно важным является вычленение локальных условий взаимодействия, существенно отличающихся в процессе эксплуатации от исходных. Тогда, избирательно нанося покрытия, а для этой цели лучше подходит электроэрозионное легирование, на поверхности, испытывающие неблагоприятные воздействия и изменения, обеспечивается равное сопротивление детали изнашиванию.

Важной особенностью электроэрозионного легирования является возможность формирования требуемых слоев в ограниченных зонах поверхности детали с учетом эпюры давлений, температурного поля, физико-химических явлений и трибологических условий взаимодействия. При выборе материалов электродов, режимов легирования учитывается то, что формируемый слой должен обладать расчетной несущей способностью, хорошо отводить тепло от локальных тепловых вспышек или надежно теплоизолировать контактные поверхности, снижать вредное влияние других физико-химических явлений.

Опыт использования такого подхода к повышению ресурса разнообразных деталей технологического оборудования для заготовки и переработки древесины, мебельной промышленности, стекольного и бумажного производства, а также двигателей внутреннего сгорания, сельскохозяйственных машин и технологической оснастки показал, что их ресурс можно повысить в несколько, а в отдельных случаях в десятки раз при наименьших затратах ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимощенко В.А. Повышение ресурса деталей машин и технологической оснастки. Кишинев, 1995.
2. Тимощенко В.А. Элементы теории и технологии разделительных процессов. Кишинев, 1979.
3. Тимощенко В.А., Голдыш Е.В. Износостойкие покрытия на металлических поверхностях. Кишинев, 1997.

Поступила 22.02.2000

Summary

The approaches to maintenance of equal wear resistance of metal surfaces of metal working parts are considered. It is shown, that the equal resistance to wear process and as a result sharp increase of service life of parts is provided by selective drawing of coatings by means of electroerosion alloying in zones of unfavorable conditions of parts interaction or interaction of parts and environment during construction service. The deviation of conditions of surfaces interaction from normal state is defined on the basis of the analysis of the mechanical interaction, temperature field and physico-chemical processes on interface boundary.

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ (КЭП) ЗАДАННОГО СОСТАВА С МАТРИЦЕЙ ИЗ НИКЕЛЯ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ЭЛЕКТРОЛИЗЕ

*Казанский государственный медицинский университет,
ул. Бутлерова, 49, г. Казань, Россия*

В данной работе количественно оценивается зависимость содержания дисперсных частиц (ДЧ) в никелевых покрытиях и их распределение по размерам в зависимости от параметров периодического тока. Осаждение проводилось на полированных образцах из нержавеющей стали из сульфатно-хлоридного электролита никелирования, дисперсной фазой являлся $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ дисперсностью от 0,5 до 10 мкм, концентрация – 40 г/л. Источник периодического тока описан в [1]. Растворением фольги КЭП в соляной кислоте определяли содержание никеля путем титрования раствором ЭДТА. Разница между начальной массой фольги и металлом дает количество ДЧ, включающихся в осадок. Изучение распределения частиц по размерам проводилось металлографическим микроскопом МИМ-8М. Результаты усреднялись по трем образцам.

С целью выявления влияния параметров тока был поставлен двухфакторный плановый эксперимент. Варьировалось – $X_1 = Q_k/Q_a$ – отношение количества электричества, протекающего в катодном и анодном направлениях в течение периода (данный фактор в обобщенном виде учитывает амплитудно-временные характеристики различных форм тока) и X_2 – средняя плотность тока ($i_{к.ср}$).

С учетом получения качественных осадков и обеспечения достаточной производительности процесса были выбраны следующие уровни и интервалы варьирования

	Нижний	Средний	Верхний	Интервал варьирования
X_1	5	10	15	5
X_2	1	2	3	1

В качестве выходного параметра Y принято массовое содержание Al_2O_3 в КЭП (α_m , %).

В результате реализации матрицы (табл. 1) и обработки экспериментальных данных [2] найдены значимые для уровня $P=0,05$ коэффициенты линейного уравнения регрессии, которое имеет вид:

$$Y = 7,73 + 1,61 X_2 + 1,26 X_1 \cdot X_2.$$

Проверка уравнения по критерию Фишера показала, что оно адекватно описывает исследованную область факторного пространства. Использование выражения позволяет определить режимы работы источника тока для получения КЭП заданного состава с разбросом $\alpha_m \sim 1\text{--}2\%$. По уравнению регрессии построены частные зависимости α_m от средней плотности тока и соотношения параметров прямого и обратного импульсов. Из зависимостей, показанных на рис. 1, видно с увеличением количества электричества в анодном импульсе содержание ДЧ снижается, а повышение средней плотности тока вследствие увеличения скорости выделения металла приводит к возрастанию включений в покрытие.

Сравнительная оценка α_m при различных режимах электролиза при $i_{к.ср} = 1 \text{ А/дм}^2$ показала, что наименьшее количество включений наблюдается при $Q_k/Q_a = 3$ (табл. 2). С увеличением количества электричества, пропускаемого в анодном направлении, изменяется фракционный состав ДЧ – в покрытиях (рис. 2).

Таблица 1. Матрица планирования и результаты экспериментов

x_1	x_2	y_1	y_2	y_3	y_{cp}
+1	+1	11,3	12,4	11,6	11,77
-1	+1	9,20	7,20	8,4	8,27
+1	-1	5,12	5,76	7,20	6,03
-1	-1	5,81	4,28	4,50	4,36
0	0	7,1	7,46	8,81	7,79

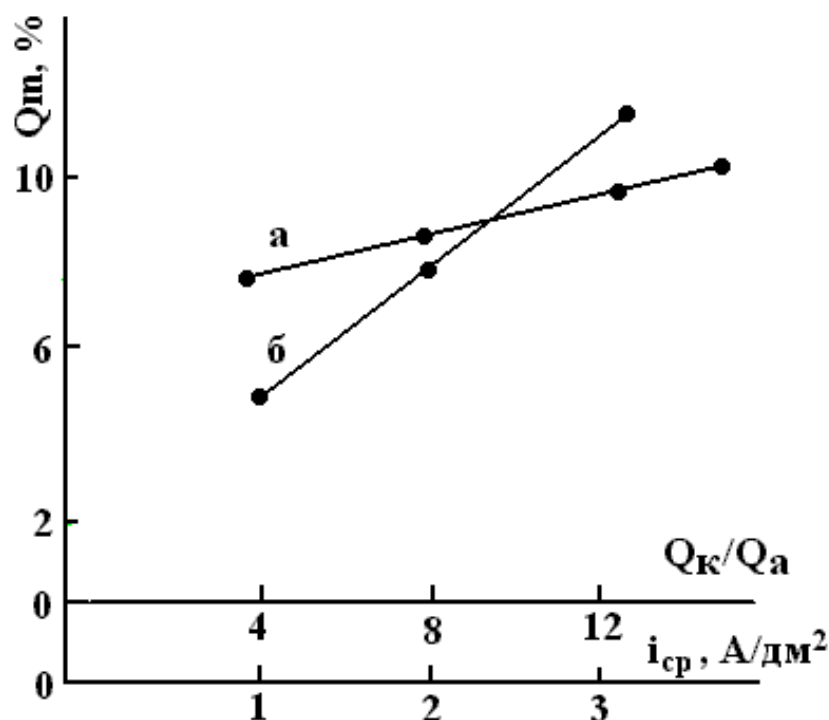


Рис. 1. Частные зависимости содержания ДЧ в покрытии а – от соотношения Q_k/Q_a ; б – от средней плотности тока i_{cp} .

Таблица 2. Зависимость массового содержания ДЧ в покрытиях от режимов электролиза

Содержание ДЧ	Постоянный ток	Q_k/Q_a			
		15	10	5	3
$\alpha_m, \%$	10	9	8	5	3

Нетрудно заметить, что в условиях периодического тока снижение содержания ДЧ связано с изменением фракционного состава в осадке.

При осаждении КЭП постоянным током состав осажденных частиц Al_2O_3 не отличается от исходного. С введением анодной составляющей заметна тенденция к уменьшению размеров включений вплоть до преимущественного захвата мелких фракций ДЧ с большей равномерностью распределения их по объему и поверхности осадка (рис. 2).

Вероятно, это связано с тем, что из-за растворения части металла в анодный полупериод возможность закрепления и зарастивания крупных частиц Al_2O_3 значительно уменьшается (табл. 3).

Таким образом, с увеличением плотности анодного импульса формируются КЭП, содержащие более мелкие и однородные фракции ДЧ. Кроме того, заданным соотношениям амплитудно-

временных параметров периодического тока должны соответствовать определенные фракции частиц, включающиеся в покрытие.

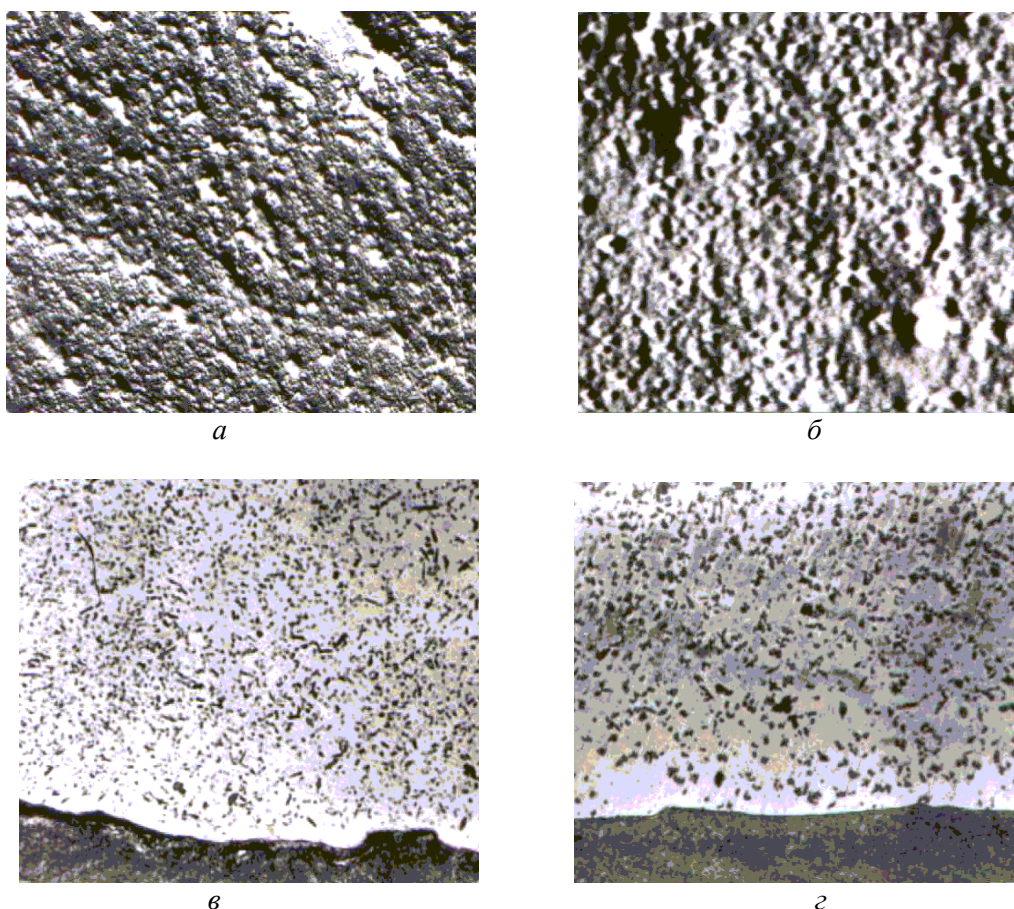


Рис. 2. Микрофотографии поверхности (а, б) и шлифов (в, г) покрытий $Ni - Al_2O_3$. Q_k/Q_a : (а, в – 3), (б, г – 5) $\times 500$.

Таблица 3. Фракционный состав ДЧ в покрытиях, полученных при различных режимах электролиза

Размеры частиц, мкм	Содержание фракций в покрытиях (%), при разных режимах			
	исходное	постоянный ток	$Q_k/Q_a = 5$	$Q_k/Q_a = 2$
25	5	10	-	-
20	18	20	8	5
15	60	61	56	15
10	7	6	20	18
5	10	3	16	62

ЛИТЕРАТУРА

1. Валеев И.М., Абдуллин И.А., Горячев А.Н. Источник питания ванн периодическим током с обратным импульсом // Вестник машиностроения. 1981. № 5. С. 71–72.
2. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экспериментальных результатов. М., 1965.

Поступила 22.02.2000

Summary

The possibility of obtaining of composite electrochemical coatings of required composition by choosing the mode of periodic current with the inverse impulse on the basis of two-factor plan experiment and experimental data is shown.

Ж.Н. Ищенко, В.В. Сидорук, П.П. Малюшевский

ИЗМЕНЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЖИДКОСТИ В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ ЛЬНЯНОГО СЫРЬЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РАЗРЯДАМИ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
Октябрьский пр-т 43-а, 54018, г. Николаев-18, Украина*

Введение

Получение волокна и ваты из льна там, где отсутствуют другие способы их получения, является актуальной задачей. Извлечение волокон из стеблей льна является несравненно более трудоемким процессом, чем процесс получения хлопкового волокна [1–3].

Трудности вызваны тем, что волокна льна, расположенные внутри стебля, прочно склеены как между собой, так и с другими соседними тканями. Причем склеивающие вещества (пектины), лигнин и др. содержатся частично также в первичной и во вторичной стенках элементарного волокна, тем самым сообщая льняному волокну грубость, жесткость и другие отрицательные качества.

Для получения льняного волокна и ваты используются различные механические приемы и химическое воздействие (мочка, мять, тербление, трепание, чесание, отбелка и др.), что делает этот процесс длительным и энергоемким. Кроме того, остается злободневным вопрос улучшения качества получаемого волокна за счет более полного удаления из него различных инкрустирующих веществ. Имеются предложения по использованию электрического разряда в жидкости для обработки льна, например, [4–6], однако данные по исследованиям процесса электроразрядной (ЭР) обработки льна практически отсутствуют.

Одним из важных факторов, влияющих на процесс обработки растительного сырья электрическими разрядами, является удельная электропроводность жидкости σ , которая изменяется при попадании в раствор продуктов очистки растительного сырья. От нее в значительной степени зависит выбор параметров разрядного контура установки, предпробивные потери энергии $W_{\text{пр}}$, вводимая в канал разряда энергия $W_{\text{к}}$, энергия первого полупериода колебаний тока W_1 , которые в свою очередь определяют параметры волны давления в жидкости в зоне обработки, размеры парогазовой полости и КПД процесса.

Цель настоящей работы – определить изменение удельной электропроводности жидкости и предпробивных потерь энергии в процессе обработки электрическими разрядами растительного сырья – льняных соломы и волокон при различной концентрации сырья и степени его предварительной обработки.

Методика эксперимента

Исследования электропроводности σ в процессе ЭР обработки растительного сырья проводились на четырех видах сырья: лен в состоянии поставки с поля (солома); лен после мочки в полевых условиях (треста); волокна льна, полученные в заводских условиях из очеса и порезанные на штапели длиной ~ 40 мм (штапельное волокно); волокно, полученное после обработки в заводских условиях штапельного волокна (коттонизированное волокно). Использование различного сырья учитывает возможность применения ЭР обработки на различных стадиях промышленного цикла получения льняного волокна и ваты с целью улучшения их качества.

Исходной жидкой средой служила отстоявшаяся водопроводная вода без каких-либо специальных добавок со значением $\sigma_0 = (3-4) \cdot 10^{-2}$ См/м. Исследования выполнялись на экспериментальной установке с использованием классической электрической схемы электрогидравлического эффекта [7, 8], когда зарядная цепь отделена от разрядной.

Экспериментальная разрядная камера представляла собой металлический цилиндр из нержавеющей стали, с внутренним диаметром 180 мм, высотой 250 мм, объемом воды 6 л, с горизонтально расположенной системой электродов типа "стержень-плоскость". Радиус закругления положительного электрода составлял 5 мм, а диаметр плоскости отрицательного электрода – 30 и 16 мм.

Исследовалось влияние на σ величины запасенной энергии W_0 , зарядного напряжения U_0 , емкости конденсаторной батареи C , времени ЭР обработки $t_{обр}$, концентрации N и расположения сырья в объеме жидкости. Сравнивалось изменение σ в процессе ЭР обработки без и после предварительного замачивания (мочки) сырья в воде.

С помощью осциллографирования разрядного тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ на межэлектродном разрядном промежутке $l_{пр}$ определялись зарядное U_0 и пробивное $U_{пр}$ напряжения, амплитуда тока I_m . Энергии W_{nn} и W_k рассчитывались как

$$\overline{W}_{nn} = C \cdot \frac{(U_0^2 - U_{пр}^2)}{2}; W_{nn} = \frac{\overline{W}_{nn} \cdot 100\%}{W_0}; W_k = W_0 - \overline{W}_{nn}. \quad (1)$$

Такие характеристики разряда, как I_m , энергия W_1 и электрический КПД $\eta_l = W_1/W_0$, амплитуда волны давления P_m в зоне расположения растительного сырья рассчитывались с помощью полуэмпирического метода [9], основанного на аналитической связи гидродинамических параметров разряда с электротехническими параметрами разрядного контура. В этом методе не учитываются предпробивные потери энергии, поэтому вместо входящих в формулы значений U_0 использовалось определенное из осциллограмм пробивное напряжение $U_{пр}$.

Электропроводность σ определялась с помощью специального прибора кондуктометрическим методом. Начальное значение σ_0 воды не было строго постоянным за время проведения серии экспериментов, поэтому изменение электропроводности σ за счет варьирования параметров эксперимента оценивалось как $\varepsilon = (\sigma - \sigma_0) \cdot 100\% / \sigma_0$. Значения σ измерялись через определенные интервалы времени. Концентрация сырья N в воде оценивалась как процентное отношение массы сырья к массе воды.

Растительное сырье располагалось либо над электродной системой вблизи свободной поверхности жидкости, либо крепилось на специальной решетке, шириной 60 мм, вокруг межэлектродного промежутка соосно с ним. В последнем случае при ЭР обработке на сырье действовали все факторы, сопровождающие электрический разряд и в той или иной мере участвующие в процессе разрушения или удаления инкрустирующих веществ. Это - ударная волна; гидропоток; кавитационные пузырьки; потоки жидкости при схлопывании парогазовой полости и волны сжатия, образующиеся при этом; отраженные волны от стенок разрядной камеры.

Эксперименты проводились при варьировании параметров разрядного контура в диапазоне: $U_0 = 14-50$ кВ, $C = 0,5-3$ мкФ, $L = 3-4$ мкГн, $l_{пр} = 5-30$ мм, $W_0 = 100-2000$ Дж. Концентрация сырья изменялась от 0,5 до 5%.

Результаты и обсуждение

О том, что электропроводность воды может изменяться в процессе обработки растительного сырья свидетельствуют данные об увеличении кислотности жидкости в процессе мочки сырья [1-3] за счет растворения в воде органических и минеральных веществ, содержащихся в тканях стебля, а также продуктов распада пектинов с образованием различных веществ в том числе кислот (молочная, уксусная, масляная и др.).

На рис. 1 и в табл. 1 приведены экспериментальные данные, характеризующие изменение электропроводности воды в процессе мочки различных видов и концентраций растительного сырья в течение времени $t_3 \geq 48$ час при температуре $T \approx 21^\circ\text{C}$. Мочка сырья осуществлялась в 2 л воды. Повышения температуры жидкости не наблюдалось.

Из графиков следует, что чем меньшей предварительной обработке подвергалось сырье и больше его концентрация, тем больше ε . Так, при $N = 0,5\%$ за время $t_3 = 48$ час величина ε для тресты, штапельного и коттонизированного волокна составила соответственно 25, 17 и 11%. А при $N = 1\%$ для штапельного и коттонизированного волокна величина ε увеличилась соответственно до 32 и 18%. Повышение концентрации волокна до 2 и 3% (см., табл. 1) привело к увеличению ε за то же время на

43 и 83%. Причем за первые 5 мин замачивания сырья величина ε увеличилась в зависимости от концентрации сырья на 4,5–28%, что составило 24–33% от его значения при $t_3 = 48$ час. Очевидно, что для остальных видов сырья увеличение ε при высоких концентрациях сырья будет еще большим.

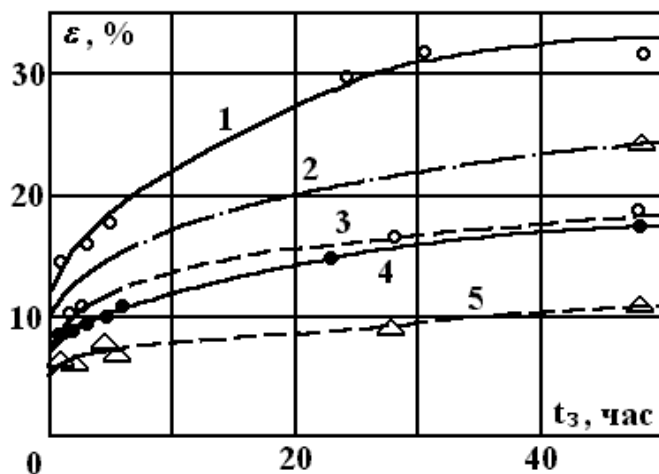


Рис. 1. Зависимость ε от времени мочки растительного сырья: 1 – штапельное волокно, $N = 1\%$; 2 – треста, $N = 0,5\%$; 3 – коттонизированное волокно, $N = 1\%$; 4 – штапельное волокно, $N = 0,5\%$; 5 – коттонизированное волокно, $N = 0,5\%$.

Таблица 1. Зависимость ε от времени мочки коттонизированного волокна

N, %	$\varepsilon, \%$										
	$t_3, \text{МИН}$			$t_3, \text{час}$							
	5	10	30	1	2	4	6	24	48	72	144
0,5	4,5	4,8	5,3	5,8	6,4	6,9	7,0	8,5	11,0	13,5	21,0
1,0	6,1	6,3	6,8	7,5	9,8	12,1	13,0	15,5	18,0	20,0	26,6
2,0	13,5	14,7	15,6	16,4	17,3	18,7	19,7	30,0	43,1	–	–
3,0	28,0	31,1	38,1	39,3	41,8	44,4	48,5	66,5	83,0	–	–

Скорость роста электропроводности воды при $t_3 > 5$ мин резко уменьшалась. За время $t_3 = 60$ мин величина ε для кривых 2–5 (см., рис. 1) составляла около 50% от ее значения при $t_3 = 48$ час. Все это свидетельствует о возможности существенного влияния процесса замачивания сырья на увеличение электропроводности жидкости при ЭР обработке.

Проведены эксперименты по ЭР обработке соломы, которая располагалась в разрядной камере над межэлектродным промежутком вблизи свободной поверхности жидкости на расстоянии $r = 50\text{--}60$ мм от электродов. Именно в этой области при взаимодействии волны давления со свободной поверхностью в воде образуется множество кавитационных пузырьков. При схлопывании этих пузырьков возникают коротковолновые локальные импульсные воздействия на растительное сырье.

Определялось изменение электропроводности жидкости на четырех режимах (табл. 2) при постоянной запасенной энергии $W_0 = 625$ Дж, $l_{pn} = 10$ мм и $N = 0,5\%$. На каждом режиме разряды с частотой $f = 1$ Гц осуществлялись в течение 60 с. Величины U_{np} , W_{mn} , W_k представлены средними значениями, поскольку увеличение ε до 15% не отразилось существенно на них и отклонение от среднего значения не превышало 10%. Увеличение ε происходило в соответствии с ростом напряжений U_0 , U_{np} и энергии W_k . Чем выше U_0 , тем меньше потери энергии W_{mn} и больше выделенная в канале разряда энергия. Увеличение емкости C в 6 раз привело к уменьшению ε . Очевидно, что определяющую роль здесь сыграло уменьшение напряжения U_0 при $W_0 = \text{const}$.

Потери энергии W_{mn} на всех режимах значительные и с уменьшением напряжения U_0 возросли от 34 до 58%. Отсюда следует, что при использовании воды с $\sigma_0 = 3\text{--}4$ См/м напряжение U_0 должно быть не ниже 35 кВ.

На рис. 2 приведены зависимости $P_m = f(r)$ для рассмотренных четырех режимов разряда. Амплитуда волны давления резко уменьшается при удалении ее от канала разряда на расстояние r до 40 мм. Чем больше напряжение U_0 , тем выше лежит кривая $P_m = f(r)$. Повышение напряжения U_0 от 20,4 до 50 кВ при $r = 50$ мм привело к увеличению давления P_m от 24,8 до 53,3 МПа. Такие значения давлений больше предела прочности на разрыв древесины в соломе льна, но на порядок меньше такого предела для волокон (500–1200 МПа [3]). Кроме того, волокно устойчиво к изгибающим нагрузкам, а древесина не выдерживает их и разрушается.

Таблица. 2. Электротехнические параметры разрядов и изменение электропроводности воды при $W_0 = 625$ Дж

U_0 , кВ	C , мкФ	U_{np} , кВ	W_{mn} , %	W_k , Дж	ε , %
20,4	3,0	13,0	58	254	9,5
25,0	2,0	18,4	45	339	10
35,4	1,0	27,6	39	381	11
50,0	0,5	40,6	34	412	15

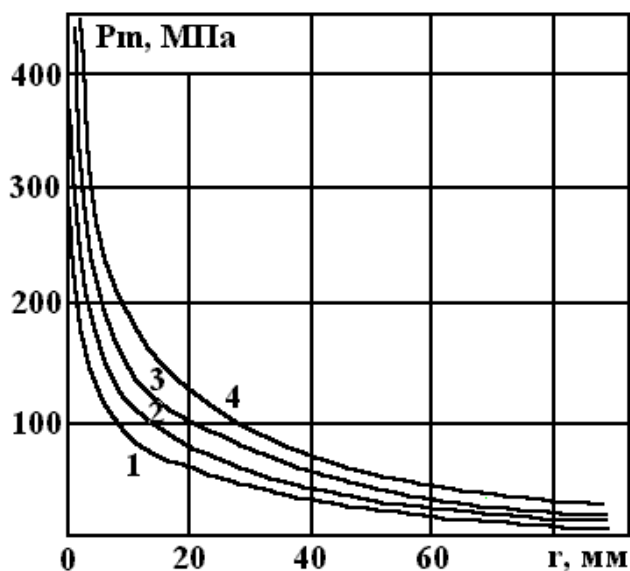


Рис. 2. Зависимость амплитуды волны давления от расстояния до канала разряда.. U_0 , кВ: 1 – 20,4; 2 – 25; 3 – 35,4; 4 – 50.

Влияние на ε увеличения энергии W_0 от 100 до 2000 Дж при обработке соломы ($N = 0,5\%$) в течение 1 мин оценивалось на семи режимах при изменении U_0 от 14 до 45 кВ, C – от 1 до 2 мкФ, l_{pn} – от 5 до 30 мм. При этом потери энергии W_{mn} изменялись от 32 до 52%, энергия W_k – от 64 до 1190 Дж, давление P_m (50 мм) – от 14,75 до 62,7 МПа. Несмотря на значительное (в 3,2 раза) увеличение энергии W_0 по сравнению с $W_0 = 625$ Дж, величина ε изменилась в этой серии экспериментов от 10 до 16%, то есть в 1,6 раза. Возможно, что одна из причин этого состоит в сравнительно небольшом отличии давлений P_m в зоне расположения сырья при изменении W_0 от 625 до 2000 Дж.

Увеличение времени обработки соломы от 1 до 5 мин при $f = 1$ Гц, привело к увеличению ε в 2 раза, до 17% (рис. 3).

Каждая экспериментальная точка кривой 1 получена при использовании новой порции сырья и воды с электропроводностью σ_0 .

Полученные данные свидетельствуют о наличии предельного значения ε для каждого типа сырья и его концентрации при ЭР обработке. Увеличение энергии W_0 и количества импульсов более определенного значения не ведет к повышению ε .

Концентрация сырья оказывает сильное влияние на ε . Так, изменение N от 0,5 до 5% при ЭР обработке льняной тресты в течение времени $t_{обp} = 60$ с при $U_0 = 25$ кВ, $C = 2$ мкФ привело к увеличению ε в 5 раз (от 4 до 21%).

Представляет интерес сравнение кривых $\varepsilon = f(t)$ при ЭР обработке соломы без предварительного замачивания (1), ЭР обработке воды без сырья (2) и замачивании соломы в воде без ЭР обработки (3) за одно и то же время (см., рис. 3). ЭР обработка соломы в течении 5 мин повысила электропроводность водной среды до 17%, тогда как замачивание сырья в течение 5 мин привело к повышению ε лишь на 5%. ЭР обработка воды без сырья за то же время привела к повышению ε воды на 7,5%. Отсюда следует, что за счет действия ЭР обработки на сырье величина ε увеличилась на 4,5%.

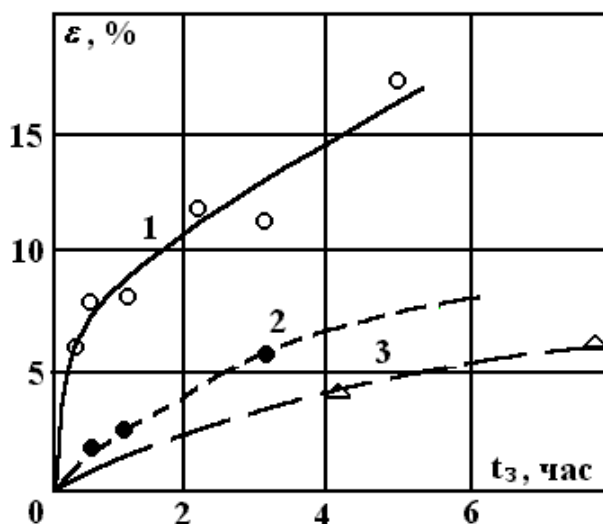


Рис. 3. Изменение удельной электропроводности жидкой среды от времени ЭР обработки и времени замачивания сырья ($N = 0,5\%$, $U_0 = 24$ кВ, $C = 2$ мкФ): 1 – $\varepsilon = f_1(t_{обр})$, среда с сырьем; 2 – $\varepsilon = f_2(t_{обр})$, среда без сырья; 3 – $\varepsilon = f_3(t_z)$, без ЭР обработки.

ЭР обработка тресты ($N = 0,5\%$) в течение 1 мин привела к такому же значению ε , как и при мочке тресты в течение 4–6 час.

Проведенные эксперименты по ЭР обработке сырья после предварительной мочки в течение времени от 0 до 24 час показали, что значительная часть веществ, влияющих на электропроводность среды, отделяется от сырья за время его мочки. Чем больше t_z , тем больше σ и меньше ее увеличение при последующей ЭР обработке сырья.

Проведена серия экспериментов, когда растительное сырье располагалось соосно с электродной системой. Значения электропроводности σ и температуры T определялись при ЭР обработке сырья после каждых 60 или 120 разрядов. Обработка соломы при этой схеме расположения сырья и $N = 0,5\%$ за 240 разрядов привела к значению $\varepsilon = 16\%$. Разрушения костры (неволокнистых тканей стебля, преимущественно древесины, а также покровных и паренхимных) при таком расположении сырья были значительно большими, чем в предыдущих экспериментах, но величины ε близки. Это подтверждает наличие предельного значения ε для каждого типа сырья и его концентрации.

На рис. 4 приведены зависимости ε от количества разрядов n при концентрации сырья 0,5 и 1% для тресты, штапельного и катонизированного волокна. Здесь же (нижняя кривая) приведена зависимость $\varepsilon = f(n)$ для ЭР обработки воды без сырья ($N = 0\%$). Эксперименты проводились при $U_0 = 30$ кВ, $C = 2$ мкФ, $L = 3,7$ мкГн, $l_{pn} = 20,5$ мм, $f = 0,33$ Гц. В отличие от рис. 1 на рис. 4 и последующих рисунках в качестве σ_0 при расчете ε использовалось значение σ после 5 мин предварительного замачивания сырья, перед началом ЭР обработки. Из графиков следует, что с увеличением n и N растет электропроводность жидкости в такой же зависимости от типа сырья, как и при мочке (см. рис. 1). Для штапельного волокна при $N = 1\%$ величина ε под действием 240 разрядов увеличилась до 27%. Сравнение кривых 1–4 с пятой, когда $N = 0\%$ (см. рис. 4), показало, что чем больше N , тем меньше влияние повышения электропроводности воды без сырья под действием разрядов на ε .

Предполагалось, что к увеличению σ при обработке воды без сырья ведет увеличение температуры жидкости под действием энергии разрядов. Для подтверждения этого определялось σ при нагревании воды (с помощью электронагревателя с постоянным перемешиванием) без ЭР обработки.

Экспериментальные точки легли на прямую линию (рис. 5), которую можно аппроксимировать зависимостью

$$\sigma = 10^{-2}(0,0786 \cdot T + 1,764) \text{ См/м.} \quad (2)$$

При нагреве воды до 70°C электропроводность воды достигает значения 7·10⁻² См/м, при котором в случае ЭР обработки могут наблюдаться беспробойные разряды, неэффективные с точки зрения гидродинамического воздействия по сравнению с разрядами с пробоем разрядного промежутка. Это ведет к необходимости увеличения напряжения U_0 , либо уменьшения длины разрядного промежутка, либо замены воды в разрядной камере.

При ЭР обработке воды ($N=0\%$) (см. рис. 4) температура воды повысилась от 21 до 25°C. В табл. 3 приведены полученные при этом значения σ (экспериментальные) и рассчитанные по зависимости (2). Экспериментальные и расчетные значения σ практически совпали. Отсюда следует, что увеличение σ при ЭР обработке воды без сырья происходит в основном за счет роста ее температуры под действием энергии разрядов. Из сравнения рис. 1 и 4 следует, что с учетом предварительного 5 мин замачивания обработка сырья под действием 240 разрядов приводит к такому же увеличению электропроводности жидкой среды, как и замачивание этого сырья в течение двух суток при одинаковой начальной температуре. Очевидно, что значения ε при $t_3 = 48-72$ час в какой-то степени соответствуют предельному значению ε для каждого вида сырья и его концентрации при ЭР обработке.

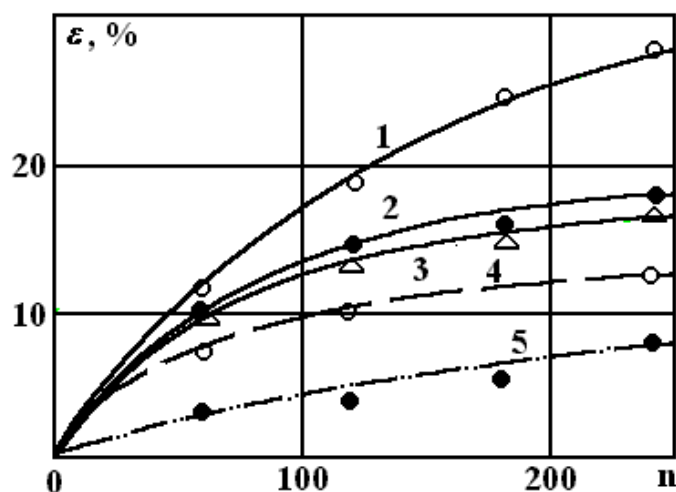


Рис. 4. Зависимость ε от количества разрядов: 1 – штапельное волокно, $N = 1\%$; 2 – коттонизированное волокно, $N = 1\%$; 3 – штапельное волокно, $N = 0,5\%$; 4 – коттонизированное волокно, $N = 0,5\%$; 5 – ЭР обработка воды без сырья.

Таблица 3. Экспериментальные и расчетные значения электропроводности воды при ЭР обработке

n, имп.	T, °C	$\sigma, 10^{-2}$ См/м	
		эксперимент	расчет
0	21	3,46	3,41
60	22	3,57	3,49
120	23	3,61	3,57
180	24	3,67	3,65
240	25	3,74	3,73

Определялось влияние энергии W_0 и W_k на ε при обработке штапельного волокна с концентрацией $N = 1\%$ (рис. 6, табл. 4). При напряжении $U_0 = 36,5$ кВ изменялись емкость C и длина l_{pn} . Меньшие значения потерь энергии наблюдались при $l_{pn} = 16$ мм. Кривые $\varepsilon = f(n)$ расположились в соответствии со значением энергии W_k для режимов, приведенных в табл. 4. Увеличение энергии W_k при $U_0 = 36,5$ кВ в 3,2 раза привело к отличию значений ε только на 8,5%. Давление P_m в зоне расположения сырья $r = 60$ мм изменилось для этих режимов от 35,2 до 42,5 МПа, то есть на 21%. Все это свидетельствует о малой эффективности значительного повышения энергии W_0 и W_k , целесообразнее увеличить число разрядов.

Однако повышение концентрации сырья до 3% может привести к увеличению σ более чем на 80%, а энергии W_{nn} – до 100%, что потребует корректировки параметров разрядного контура из-за появления беспробойных разрядов. Кроме того, к увеличению σ ведет повышение температуры водной среды под действием энергии разрядов и многократное использование одной и той же среды.

После ЭР обработки растительного сырья вода становится темно-бурой с осадком, содержащим части сырья (кусочки волокон и костры), аморфные коллоидальные вещества (пектиновые вещества) и пр. Коллоидальные вещества содержатся не только вне, но и внутри обрабатываемого слоя сырья и при высыхании сырья прилипают к нему. Поэтому требуется тщательная промывка сырья после обработки.

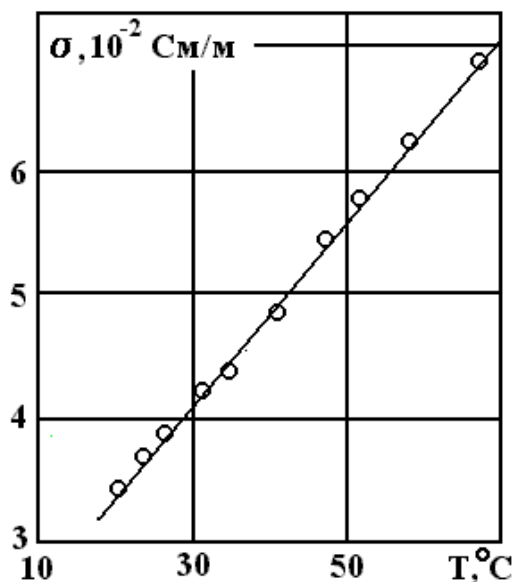


Рис. 5. Увеличение удельной электропроводности воды при нагреве электронагревателем.

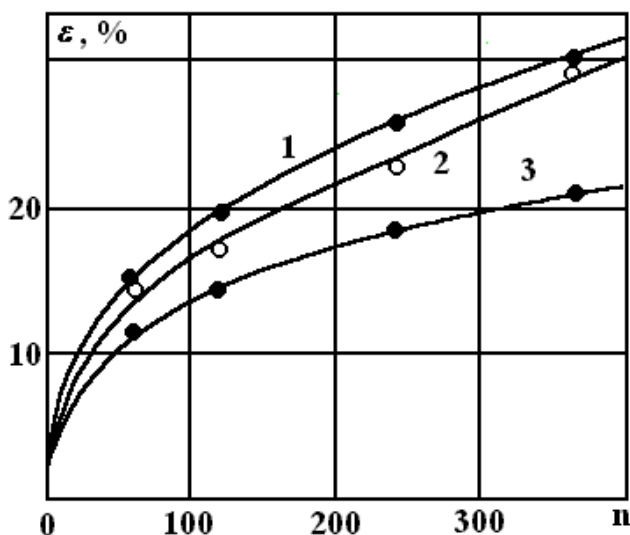


Рис. 6. Зависимость ϵ от n и W_k при обработке штапельного волокна ($N = 1\%$). W_k , Дж: 1 – 954; 2 – 800; 3 – 307.

Характерно, что электропроводность жидкости, отстоянной после ЭР обработки сырья в течение суток, возвращается к значению σ , близкому к σ_0 , приблизительно такому, как после первых 60 разрядов. Электропроводность же жидкости, отстоянной после удаления вымоченного сырья (даже после 2 час мочки) без ЭР обработки, не только не возвращается к исходному значению σ_0 , но может далее продолжать увеличиваться. Это объясняется различным характером воздействия на сырье и жидкую среду процессов ЭР обработки и мочки. Соответственно должны отличаться состав и количество выделенных из сырья веществ, особенно лигнина.

Таблица. 4. Электротехнические характеристики разрядов при обработке штапельного волокна ($N = 1\%$)

U_0 , кВ	C , мкФ	$l_{пр}$, мм	W_0 , Дж	$U_{пр}$, кВ	W_{nn} , %	W_l , Дж	W_k , Дж	I_m , кА
30,0	2	20,5	900	21,5	49,0	218,1	457	12,3
36,5	2	16,0	1332	31,0	28,5	319,7	954	17,0
36,5	2	21	1332	28,3	40,0	301,1	800	19,5
36,5	1	16	666	24,8	54,0	125,0	307	10,3

После ЭР обработки сырье становится более светлым, в нем значительно увеличивается количество прозрачных волокон и расщепленных пучков волокон.

Авторы выражают признательность З.Л. Литвину и В.Н. Синельниковой за предоставленное для экспериментов волокно и консультации по существующим технологиям обработки льна.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Соболев М.А.* Химия льна и лубоволокнистых материалов. М., 1963.
2. *Еремина К.И., Борухсон Б.В.* Текстильные волокна, их получение и свойства. М., 1971.
3. *Марков В.В., Сулов Н.Н., Трифонов В.Г. и др.* Первичная обработка лубяных волокон. М., 1974.
4. А.с. 362080 СССР. МКИ D01 C1/04 Способ получения волокон из стеблей лубяных культур // *Малюшевский П.П., Стрельцов В.А., Сысоев В.Г.* Оpubл. 13.12.72. Бюл. N2.
5. Патент 17284А Украина. МКИ6 D21 C3/00 Способ получения целлюлозы // *Тиманов В.Н., Платонов Н.А.* Оpubл. 31.10.97. Бюл.ПВ N5.
6. Патент 17136А Украина. МКИ6 D21 F11/14 Способ производства медицинской ваты // *Тиманов В.Н., Платонов Н.А.* Оpubл. 31.10.97. Бюл.ПВ N5.
7. *Юткин Л.А.* Электрогидравлический эффект. М.-Л., 1955.
8. *Гулый Г.А.* Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта. М., 1977.
9. *Шамко В.В., Кучеренко В.В.* Теоретические основы инженерных расчетов энергетических и гидродинамических параметров подводного искрового разряда. Николаев, 1991. (Препринт / НАН Украины, ИИПТ N20).

Поступила 27.01.2000

Summary

Change of the specific electric conductivity of liquid σ and prebreakdown energy losses W_{nn} at processing of vegetable raw material (flax straw, and two kinds of fibre) have been studied. Experimental data on the influence of the facility energy, discharge circuit parameters, processing time, concentration and position of raw material in the discharge chamber as well as on its preliminary treatment have been obtained. Electrical characteristics of the discharge have been determined. Pressure in the liquid medium in the domain of the raw material disposition are evaluated by calculations. The states of raw material before and after processing were under the control. Strong influence of the raw material on σ has been shown. There exists the maximum value of σ owing to extracting of different substances under processing of definite kind of the raw material, its concentration and disposition in the discharge chamber as well as the optimal value of the discharge energy when its exceeding does not cause increasing of the process efficiency. The raise of σ takes place due to powerful effect upon the raw material by accompanying factors such as raise of liquid temperature affected by the discharge energy and heating during processing time of the raw material retting.

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ И СВОЙСТВ СИСТЕМЫ ГРУНТ-МЕТАЛЛ

*Волгоградская государственная сельскохозяйственная академия,
ул. Институтская 8, г. Волгоград, 400002, Россия*

Разность потенциалов, возникающая при контакте металла с пористыми системами типа почвогрунтов, играет существенную роль во многих физико-химических и биологических процессах (коррозия металлов и бетонов, перенос влаги и питательных веществ при контакте с корнями растений, разложение промтоходов при их захоронении).

В связи с этим представляют интерес результаты опытов в модельной ячейке, состоящей из двух разнородных металлических полос (электродов) со слоем грунта переменной влажности между ними.

Ячейка представляла собой естественную гальваническую систему. Исследовалось изменение омического сопротивления R , силы тока i и разности электродных потенциалов во времени $\varphi = f(t)$. Использовались типовые почвы (суглинки и супесь) и тонкодисперсная меловая порода с большим содержанием частиц коллоидного размера. Влажность менялась в пределах пластичного состояния почвогрунтовок, то есть при коэффициенте консистенции $0 \leq J \leq 1$. Электродами служили наиболее часто используемые в практике металлы: углеродистая сталь, низколегированная сталь, алюминий.

Опыты проводились при температуре от $+20$ до -8°C . Выбор электродной пары диктовался также необходимостью получить соизмеримую разность потенциалов $\varphi = \varphi_{12} - \varphi_{23}$, где φ_{12} и φ_{23} – электродные потенциалы на границах электродов с грунтом.

Измеряемая разность потенциалов по данным [1–3] составляет 0,01–0,5 В в зависимости от вида электрода и состояния пористой среды.

При неравномерном распределении растворимых солей (и соответствующих поровых концентраций) появляется концентрационный потенциал, а в трехфазной системе (грунт – вода-воздух) – капиллярный потенциал. При капиллярном перемещении влаги возникает дополнительный потенциал течения. Величина поверхностного натяжения, определяющая величину капиллярного потенциала, в соответствии с известным уравнением Липпмана, зависит от электрического потенциала системы. Указанные потенциалы накладываются определенным образом на величину φ и поэтому в первом приближении измеряемая величина φ является некоторой интегральной характеристикой ячейки.

Цель исследования заключалась в оценке возможности влияния электрических полей, возникающих в подобных системах (при отсутствии внешнего электрического поля), на перемещение поровой влаги, связи изменения сопротивления и тока в ячейке с процессами примерзания и величиной энергетического потенциала пористых систем типа почвогрунтов.

Изменение омического сопротивления R – показатель переноса влаги к катоду. В опытах доказана возможность электроосмотического перемещения влаги в пластичных грунтах при интегральной напряженности $E = (0,01 - 0,03)$ В/см. Ряд исследователей для электроосмотического переноса влаги за счет внешнего электрического поля приводят пороговые напряженности $E = (0,05 - 0,9)$ В/см.

По мнению авторов, вопрос о нижнем пороге напряженности тесно связан с длительностью воздействия поля с учетом медленного развития реологического течения в пористых средах.

На рис. 1 показана зависимость скорости изменения омического сопротивления $\Delta R / \Delta t$ от времени t для мела. При влажности меньшей полного влагонасыщения породы, отмечались четкие периоды падения этой скорости до нуля. Подобные явления наблюдались и на суглинистых почвах.

Возможно следующее объяснение механизма протекания автоэлектроосмотического процесса и связанного с этим указанного изменения. Перенос влаги может происходить под действием

электрического, капиллярного и температурного потенциала. При температуре ниже нуля заметное влияние температуры может быть связано с большой разностью теплоемкости и теплопроводности контактных поверхностей. Это приводит к миграции влаги к более холодной поверхности. В модельных опытах этим можно пренебречь ввиду двустороннего металлического контакта.

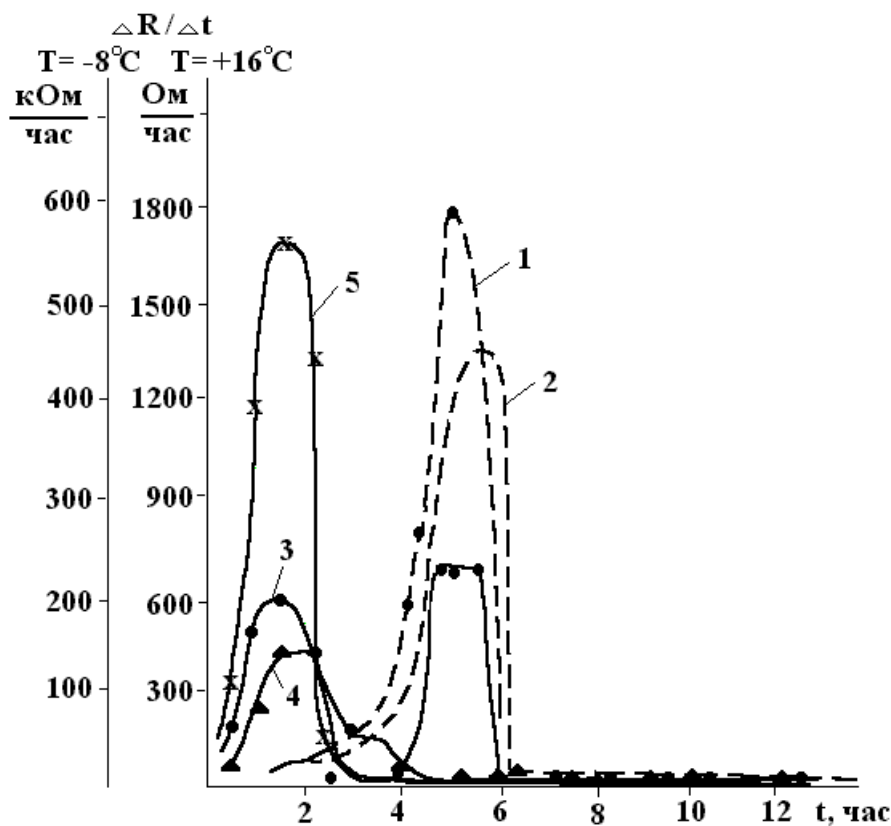


Рис. 1. Зависимость скорости изменения омического сопротивления ячейки (сталь-меловая порода) $\Delta R / \Delta t$ от времени t при температуре $+16$ и -8°C (штриховая линия) при влажности, выраженной через показатель консистенции J : 1, 3 – 0,4; 2, 4 – 0,7; 5 – 1.

По мере оттока влаги от анода, капиллярное давление (с учетом неравномерности влаги по объему) может вызвать перенос влаги, сопоставимый с электроосмотическим переносом неразрывного потока.

Как известно, имеется оптимальное соотношение толщины диффузной влаги двойного электрического слоя на границе твердой и жидкой фаз с поперечным сечением капиллярных пор, при котором электроосмотический поток достигает максимума. То есть существует оптимальная влажность пористой среды, при которой электроосмотическая скорость максимальна и осушение прианодного пространства происходит быстрее. Ввиду полидисперсности грунтов каждому значению влажности соответствует свое количество капилляров с условиями, близкими к оптимальным. Перенос влаги начинается с этих оптимальных зон. В других незаполненных зонах капиллярный потенциал может противодействовать электрическому. После достаточно резкого снижения потока влаги происходит выравнивание капиллярного потенциала по объему с одновременным заполнением пор наименьших размеров. Такой “латентный” период требует определенного времени для достижения равновесия.

В незаполненных порах возможен перенос ионов в пограничном слое, вследствие чего могут образовываться локальные участки с противЭДС. Этими, протекающими во времени процессами (до возможно близкого к оптимуму соотношения слоев диффузной и свободной влаги), можно объяснить характер скорости изменения R .

При $\Delta R / \Delta t = 0$ электроосмотический перенос отсутствует (хотя перенос ионов имеется). Можно считать, что в это время происходит структурная перестройка системы на основе отмеченных выше явлений. При температуре ниже нуля по истечении некоторого времени перестройка связана с образованием зародышей льда и кристаллизацией свободной влаги. Диффузная

влага различной энергетической связи замерзает при более низкой температуре (вплоть до (-6) – (-8) °С) и требует большего времени для кристаллизации.

Неравномерное образование льдистых кристаллов и возможность образования новых микрогальванических пар в системе влага-лед-минеральная частица нередко приводит к перезарядке системы. Это иллюстрируется рис. 2, где дана зависимость скорости изменения потенциала $\Delta\varphi/\Delta t=f(t)$ от времени для суглинка при $T = -6^\circ\text{C}$.

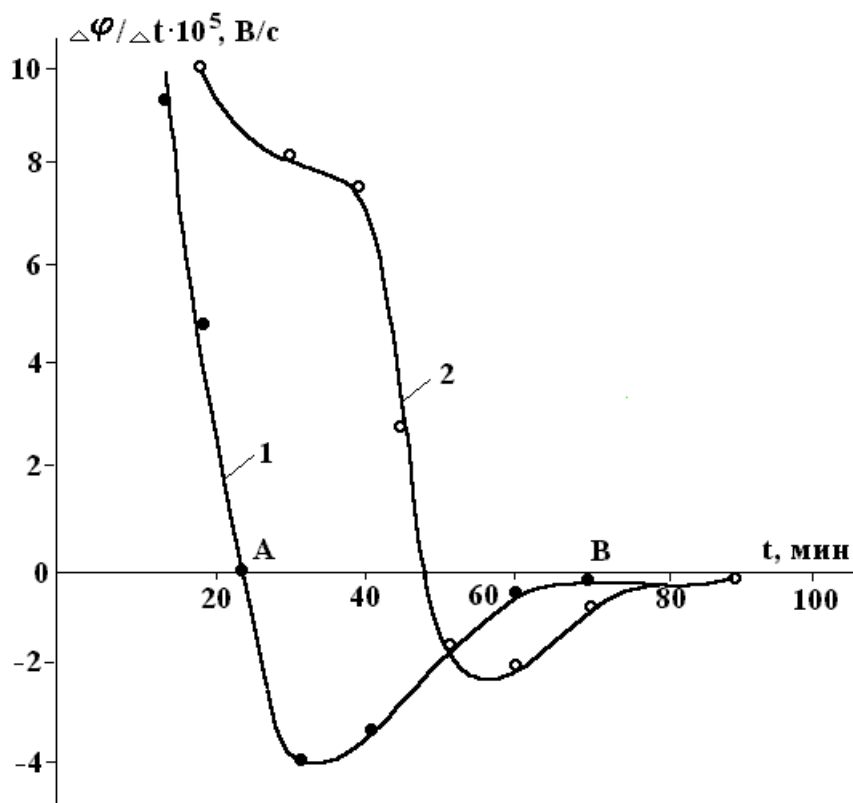


Рис. 2. Зависимость скорости изменения электрического потенциала $\Delta\varphi/\Delta t$ от времени для суглинка при температуре -6°C и влажности 20 (1) и 60% (2).

Достижение нулевых значений $\Delta\varphi/\Delta t$ и изменение знака (переход через нуль) соответствует замерзанию свободной влаги и может иметь практическое применение, например, служить сигналом для примерзания влажной массы к кузову транспортного средства при перевозке. Удельное омическое сопротивление исследованных грунтов для мела – 100–200 Ом·м, для суглинков – 30–100 Ом·м (при влажности пластичного состояния и (+16) – (-20°C). При замерзании сопротивление увеличивается на 2–3 порядка.

Опыты показали, что: максимальная начальная разность потенциалов соответствует консистенции $J = 0,4-0,7$; наибольшее количество электричества (за время до 20 часов) $Q = \int idt$ соответствует $J = 0,7 \pm 0,1$; наибольшее значение давления набухания p соответствует интервалу $J = 0,4-0,7$; изменение электрического потенциала во времени носит экспоненциальный характер и может быть выражено зависимостью $\varphi = \Phi \exp(-bt)$, где Φ – начальное значение потенциала, b – показатель, меняющий свою величину в соответствии с интервалами изменения сопротивления R . В опытах отмечаются 2–3 таких интервала, по-видимому, связанных с рассмотренными выше структурными изменениями. При $\Phi = 0,11-0,14$ В величина $b = 0,03-0,07$ при положительной температуре (в пределах 20 часов).

Интересно сопоставить энергетические параметры различных процессов в почвогрунтах, имеющих в основе ионно-молекулярное взаимодействие. Для этого сравним ориентировочные значения удельных работ в процессах набухания, капиллярного и авто электроосмотического перемещения влаги. Принимая для слабонабухающих грунтов коэффициент набухания $K = 2-5\%$ при давлении набухания $p = (2-20) \cdot 10^4$ Па [1, 2], получаем удельную работу набухания $A_n = (0,4-10) \cdot 10^{-3}$ Дж/см³.

Удельная работа капиллярного потенциала $A_k = 2\sigma/r$. Приняв радиус капилляра $r = 10^{-3}$ см, а величину поверхностного натяжения $\sigma = 0,7 \cdot 10^{-3}$ Н/см, получим $A_k = 14 \cdot 10^{-1}$ Дж/см³.

Удельная работа электрического поля $A_s = Q\varphi$. Для опытных значений $Q = (0,1-0,5)$ Кл/см³ и $\varphi = (0,1-0,15)$ В получаем $A_s = (10-70) \cdot 10^{-3}$ Дж/см³.

Очевидно, что подобные опыты с замерами электродных параметров в многофазных пористых системах помогают существенно расширить представления о их временных структурно-механических и физико-механических изменениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров Ю.И. Оценка потенциала набухания – усадки глинистых грунтов Центрального Предкавказья // Геоэкология. 1997. № 3. С. 92–99.
2. Макеева В.И., Латицкий С.А. Характер и природа давления набухания // Почвоведение. 1993. № 9. С.75.
3. Григоров О.Н. Электрокинетические явления. Л., 1973.

Поступила 26.01.2000

Summary

The experimental results of changes in time of current, potentials' difference and ohmic resistance in closed cells, simulating a contact of variously moisturized soils with steel surfaces are presented. The data on the nature of electrokinetic phenomena in similar multi-phase systems are obtained.

И.М. Панченко, М.С. Панченко, А.Л. Панасюк, А.С. Мосиевич

Часть 1. СТАТИЧЕСКИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЛАЖНЫХ СИНТЕТИЧЕСКИХ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ

*Ровенский государственный гуманитарный университет,
ул. Остафова, 39, г. Ровно, 266000, Украина*

Химия неорганических полимеров изучает неорганические соединения и разнообразные их композиции, которые достаточно распространены в природе и широко применяются на практике. Достаточно напомнить, что примерно 77% земной коры представляют полимерные соединения кислорода, кремния, алюминия, железа и других элементов.

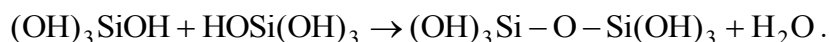
Среди неорганических полимеров встречаются вещества с исключительно ценными свойствами. Для одних характерна высокая термостойкость, твердость, ценные механические и диэлектрические свойства, иным присуща эластичность. Поэтому неорганические полимеры вызывают большой интерес у химиков и технологов [1].

К неорганическим полимерам относятся высокомолекулярные неорганические системы, макромолекулы которых состоят из неорганических главных цепей (для линейных полимеров) или неорганического основного скелета (для плоскостных и пространственных полимеров) и не имеют боковых органических радикалов. Характерной особенностью основных цепей и скелета неорганических полимеров есть наличие ковалентных связей между атомами, которые их образуют. Между цепями и скелетными структурами существуют ионные и прочие связи нековалентной природы.

© Панченко И.М., Панченко М.С., Панасюк А.Л., Мосиевич А.С., Электронная обработка материалов, 2000, № 3, С. 37–43.

За химической структурой основной цепи неорганические полимеры разделяются на гомоцепные (гомоатомные) и гетероцепные (гетероатомные). Наиболее многочисленную группу последних полимеров составляют те, которые содержат кислород (полимерные оксиды). Среди них наиболее широкую и самую разнообразную группу составляют силикаты – состоящие из кремния с кислородом.

Достаточно распространенным составом кремния с кислородом является SiO_2 – кремнезем или кварц. Это трехмерный сетчатый полимер с тетраэдрической конфигурацией. Кварц имеет полимерную структуру типа $[-\text{SiO}_2-]_n$ и содержит как ионные, так и ковалентные связи. Во время гидратации SiO_2 получается кремниевая кислота, которая в процессе поликонденсации превращается в поликремниевую кислоту. Затем она постепенно переходит в гелевый полимер трехмерной структуры с определенным количеством гидроксильных групп в цепях. При надлежащих условиях вода отсоединяется от поликремниевой кислоты, вследствие чего кислота превращается в безводный силикагель. Действительно, мономерная и полимерная кремниевая кислота, которая образовалась, например, путем нейтрализации раствора метасиликата натрия или жидкого стекла, может вступать в реакцию поликонденсации согласно схемы [2]:



В результате такого процесса конденсации получается макромолекулярная кремниевая кислота, которая постепенно растет и превращается в полимерную, или “элементарную” частичку – глобулу, которая обладает коллоидными свойствами. Эта частичка представляет собой нерегулярную трехмерную сетку из тетраэдров SiO_4 , причем каждый атом кремния связан с четырьмя атомами кислорода, а каждый атом кислорода – с двумя атомами кремния. В тех точках, где конденсация OH групп не состоялась, атомы кремния несут по одной, две или три группы OH . На определенной стадии конденсации коллоидный раствор превращается в студнеобразную массу и, наконец, возникает гидрогель. На этой стадии также происходит конденсация между OH -группами различных элементарных частичек. На обеих стадиях образуются связи Si-O-Si , тем не менее на первой стадии получаются массивные частички кремниевой кислоты, а на второй – их возрастание за счет межчастичных связей Si-O-Si , количество которых значительно меньше, чем внутри частички, поскольку соседние глобулы контактируют лишь в отдельных точках.

Поскольку конденсированные полимерные частички находятся в коллоидном растворе или в состоянии гидрогеля, очень большое число молекул воды связывается с многочисленными OH -группами, которые входят в структуру частички. Если такой гидрогель отмыть от солей и высушить (в процессе сушки конденсация продолжается), то получим ксерогель (пористый силикагель). Он представляет собой стекловидное бесцветное пористое аморфное вещество в виде механически крепких гранул. От условий приготовления силикагелей, скорости конденсации кремниевых кислот зависит пористая структура силикагелей.

Согласно данным электронно-микроскопических, рентгеновских и сорбционных исследований [3–5] скелет отдельной гранулы силикагеля состоит из частичек-глобул, сросшихся между собой. Промежутки между ними создают поры, размеры и форма которых зависят от величины глобул и плотности их упаковки. Внешняя поверхность глобул, которая образует внутреннюю поверхность пор, покрыта гидроксильными группами, валентно связанными с поверхностными атомами кремния. Кроме OH -групп, в качестве адсорбционных центров могут выступать координационно-ненасыщенные атомы Si и разные примесные атомы, привнесенные в процессе получения силикагеля или искусственно имплантированные в его структуру (центры второго порядка).

Согласно современным представлениям, взаимодействие молекул воды с поверхностью силикагеля при его увлажнении в основном происходит по механизму водородных связей. На центрах второго порядка также происходит адсорбция атомов и молекул других газов и паров за счет неспецифических взаимодействий: дипольно-ориентационных, индукционных и дисперсионных. В микропорах силикагеля при соответствующей влажности воздуха происходит также капиллярная конденсация паров воды. Поэтому различные марки силикагелей являются отличными адсорбентами.

Капиллярная конденсация протекает в местах контакта глобул обратимо, а в горлах и расширениях пор – необратимо, что и вызывает капиллярно-конденсационный гистерезис. Отличие в размерах и форме пор (везде речь идет о микропорах, поскольку стекловидные адсорбенты типа силикагелей и пористых стекол не имеют макропор) силикагелей различных марок обуславливает разнообразие форм и положений петель гистерезиса капиллярной конденсации на изотермах сорбции. Благодаря своим гидрофильным свойствам, значительной сорбционной емкости,

инертности к агрессивным средам, легкости регенерации и термостойкости, силикагели широко применяются в промышленности и технике как эффективные осушители газов и жидкостей, для улавливания паров ценных органических растворителей, как ионообменники для выделения ряда металлов, для очищения нефтепродуктов от масел и воды, для хроматографии, как наполнители органических полимеров, которые используются, в частности, в электро- и радиотехнической аппаратуре как электроэлектреты, осушители, изолирующие и герметизирующие материалы. При этом они работают в электрических полях и для эффективного их использования необходимы знания диэлектрических свойств силикагелей, поскольку электрофизические характеристики полимеров существенно изменяются под влиянием влаги [6]. Закономерности ухудшения электрофизических свойств гидрофильных высокопористых полимерных материалов в условиях высокой влажности окружающей среды изучены недостаточно и проводились в основном на высоких частотах [7]. Поэтому необходимо исследовать влияние влаги на электрофизические характеристики и, в частности, диэлектрической проницаемости, полимерных материалов, а также построить физические модели процессов, которые протекают в электростатических полях.

При изучении влияния влаги на электрические свойства силикагелей как полимерных тел необходимо выбирать такие образцы, которые будучи близкими по химическим составам, заметно отличались бы геометрией порового пространства. Для исключения действия побочных факторов имеет смысл использовать в качестве ненабухающих неорганических полимеров тела с жестким скелетом, которые не испытывают существенных деформаций при увлажнении, как например, разнообразные глины, в частности, монтмориллонитовой группы.

Этим требованиям удовлетворяют силикагели марок КСК-2, КСС-4, КСМ-5 и КСМ-6п, которые широко используются в производственной и научной практике. В последнем случае по особенностям структуры и по проявлению сорбционных, а также массопереносных свойств они относятся к модельным капиллярно-пористым телам (КПТ) [8]. Для определения изотерм сорбции, статической диэлектрической проницаемости ϵ в зависимости от влагосодержания W использовали отдельную гранулу того или другого силикагеля с диаметром $d \approx 6 \cdot 10^{-3}$ м и электровакуумные сорбционные весы [9]. Во всех опытах также использовалась бидистиллированная вода с удельной электропроводностью $3 \cdot 10^{-7}$ (Ом⁻¹ · м⁻¹).

С точки зрения физики диэлектриков, выбранные для исследования влажные силикагели относятся к неоднородным многокомпонентным и многофазным диэлектрикам. Неоднородности возникают за счет различных факторов, включая пористый характер скелета, наличие поверхностных пленок влаги, включений капиллярного конденсата, воздуха в порах, неоднородности химического состава, присутствие примесей, загрязнений в виде ионов, оксидов и иных соединений. Существенную роль играют также ионы двойного электрического слоя, а также ионы порового раствора, способные изменять объемное удельное сопротивление образцов на несколько порядков. Будучи в сухом виде диэлектриками с $\rho_V = (10^9 - 10^{15})$ Ом · м и выше, силикагели при увлажнении становятся полупроводниками, при этом значение ρ_V снижается до $(10^{-4} - 10^{-5})$ Ом · м [7]. Особенности фазового состава и пористой структуры определяют сложность пространственной картины электрического поля в образце. Это приводит к пространственной зависимости удельной объемной проводимости γ_V от напряженности электрического поля. Нужно учитывать и удельную поверхностную проводимость γ_s , вклад которой возрастает при увеличении влажности. Общая электропроводность влажного силикагеля возрастает с увеличением температуры. Заметное влияние на электропроводность оказывает и пористая структура силикагелей. Вероятно, с изменением радиуса превосходящих пор в силикагелях изменяется и соотношение между γ_V и γ_s . Для тонкопористых образцов КСМ-6п и КСМ-5, которые имеют значительную удельную поверхность, основную роль, вероятно, играет поверхностный механизм проводимости, тогда как в случае крупнопористого КСС-4 и в особенности КСК-2 сильнее проявляется движение носителей заряда в объеме пор, которые полностью или частично заполнены влагой. Отсюда следует, что большее влияние на электрофизические свойства силикагелей оказывает не только количество влаги, но и характер ее распределения, а также формы связи влаги и пористая структура образцов.

На рис. 1 представлены изотермы адсорбции и десорбции молекул воды исследуемых образцов, полученные с использованием электровакуумных сорбционных весов [9]. Их дифференциальные водоудерживающие свойства и основные характеристики пористой структуры представлены в [10, 11], определенные на основе взаимонезависимых методов [8].

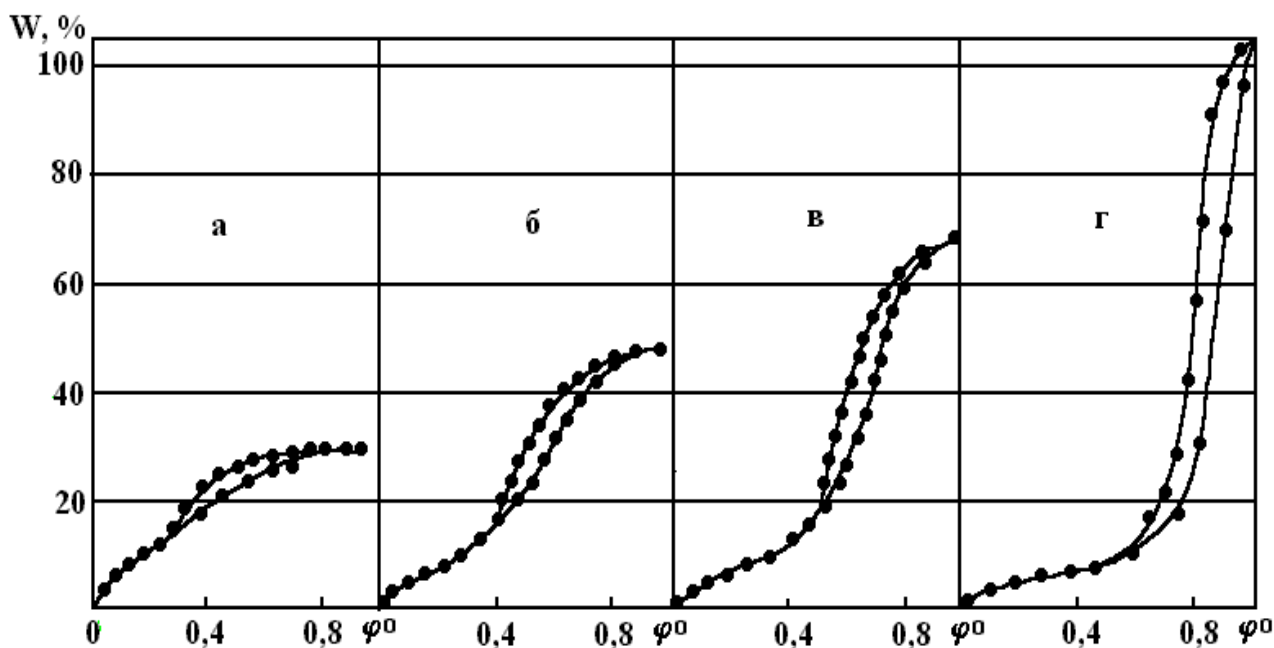


Рис. 1. Изотермы сорбции молекул водяного пара силикагелями: а – КСМ – 6п, б – КСМ – 5, в – КСС – 4, г – КСК – 2 при $T = 293$ К.

Электрофизические свойства увлажненных силикагелей изучались и ранее [7, 12]. Но все исследования были выполнены в радиочастотном диапазоне или на верхних значениях звуковых частот. Измерения на более низких частотах связаны со значительными трудностями в связи с явлениями поляризации электродов, электролиза и иными контактными процессами. В [13, 14] на низких частотах было открыто явление гигантской низкочастотной диэлектрической дисперсии при релаксации поляризации двойного электрического шара, вызванного тангенциальными потоками ионов диффузного слоя, то есть миграцией поверхностных ионов. Это явление характерно для дисперсных систем с большой емкостью ионного обмена и полимерных полиэлектролитов.

В данной работе ставилась цель получить статические значения ϵ при различных влагосодержаниях силикагелей. Зависимость ϵ (W) для них получена с помощью специальной приставки к электровакуумной установке [9]. Она представляет собой (рис. 2) цилиндрическую стеклянную трубку 1 диаметром $8 \cdot 10^{-2}$ м, нижняя часть которой припаяна к вакуумному гофру 5. К концу заостренного участка молибденовой пружины 3 с радиусом витка $3 \cdot 10^{-2}$ м, которая использовалась как электрод, крепилась гранула силикагеля 4 или эталонный образец (кварцевый шарик). Вторым электродом служила плоская пластинка 2 в форме круга диаметром $7 \cdot 10^{-2}$ м, который был размещен в нижней части приставки и соединялся с нижней стенкой вакуумного гофра с помощью стержня 8. Это давало возможность с помощью микрометрического винта 6 и микрометрической гайки 7 перемещать электрод 2 в приставке, не нарушая вакуума или заданного давления водяной пары в приставке при ее присоединении к вакуумным сорбционным весам. С другой стороны это позволяло сохранять одно и то же расстояние между электродами. За опусканием пружины и электрода 2 следили с помощью микрокатетометра КМ-6.

Гранула силикагеля находилась на одном и том же расстоянии от электрода 2, поскольку при удлинении пружины (вследствие увлажнения образца или действия электростатических сил притяжения между электродами 1 и 2) можно было на равнозначное расстояние перемещать электрод 2. Это давало возможность удерживать гранулу в положении с заданным значением напряженности электрического поля.

Величину ϵ гранулы того или иного силикагеля, который находился в равновесии с парами воды при данном значении относительного давления p/p_s и температуры, определяли методом относительных измерений. Сначала при различных p/p_s определяли растяжение пружины 3 с эталонным образцом. Это давало возможность измерять силу f_k притяжения между пружинкой 3 и плоским электродом 2. Потом кварцевый шарик заменялся гранулой силикагеля и снова определялась сила притяжения f_c при одних и тех же значениях p/p_s . Диэлектрическую проницаемость ϵ определяли из отношения f_c/f_k .

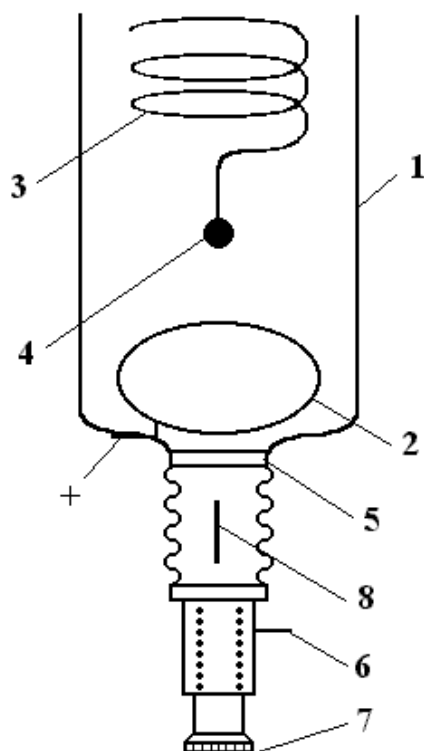


Рис. 2. Схема приставки.

Кривые зависимостей $\varepsilon(W)$, представленные на рис. 3, имеют немонотонный характер. Для всех образцов силикагелей в области влаги мономолекулярной адсорбции (на начальных участках кривых) наблюдается небольшое увеличение ε с повышением W . В области полимолекулярной адсорбции влаги наблюдается резкий подъем кривых $\varepsilon(W)$. С началом капиллярной конденсации снова наблюдается перегиб кривых $\varepsilon(W)$, с дальнейшим увеличением W следуют к максимальным значениям ε (для свободной воды) при завершении капиллярной конденсации.

Анализ кривых $\varepsilon(W)$ показывает, что характер их поведения четко определяется формами связи влаги. Незначительное увеличение ε в области влаги мономолекулярной адсорбции можно объяснить тем, что удерживаемые сильным электрическим полем адсорбционных центров молекулы дают небольшой вклад в поляризацию системы силикагель – адсорбированная влага под влиянием на несколько порядков меньшей напряженности внешнего электрического поля. Почти линейное возрастание значений ε с ростом W в области полимолекулярной адсорбции обусловлено тем, что с отдалением молекул воды от поверхности влияние электрического поля адсорбента спадает, что приводит к резкому возрастанию роли внешнего электрического поля. В области капиллярной конденсации энергия связи влаги стремительно приближается к нулю и поэтому при дальнейшем увеличении влагосодержания наблюдается быстрый переход величин ε удерживаемой влаги к значениям ε для свободной воды.

Полученные зависимости ε образцов от степени заполнения сорбционного объема пор V_3/V_6 , где V_3 – заполненный и V_6 – начальный свободный от жидкости объемы пор (рис. 4), проявляют четкую зависимость диэлектрической проницаемости от характера пористой структуры силикагелей. Особенно резкое отличие в ходе зависимости $\varepsilon(V_3/V_6)$ наблюдается для самого широкопористого силикагеля КСК-2 и самого тонкопористого – КСМ-6п. Низкие значения ε для КСМ-6п при одинаковой степени заполнения обоих силикагелей обусловлены тем, что основную часть (до 45%) поглощенной влаги составляет мономолекулярно-адсорбированная вода с низкой диэлектрической проницаемостью. Наоборот, в КСК-2 основная часть влаги находится в капиллярах. Ее диэлектрическая проницаемость близка к объемной, что вызывает резкий подъем кривой $\varepsilon(V_3/V_6)$ уже при относительно малой степени заполнения. Кривые $\varepsilon(V_3/V_6)$ для двух других силикагелей с порами промежуточных размеров размещаются между кривыми для образцов с широкими микropорами и ультрапорами.

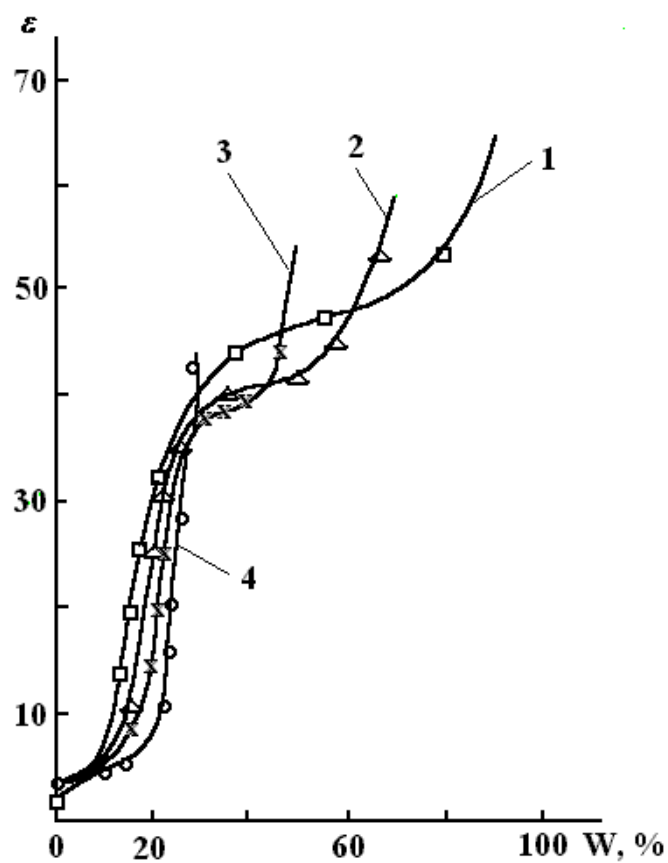


Рис. 3. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ силикагелей от их влагосодержания W .
 1 – KCK-2; 2 – KCC-4; 3 – KCM-5; 4 – KCM-6n.

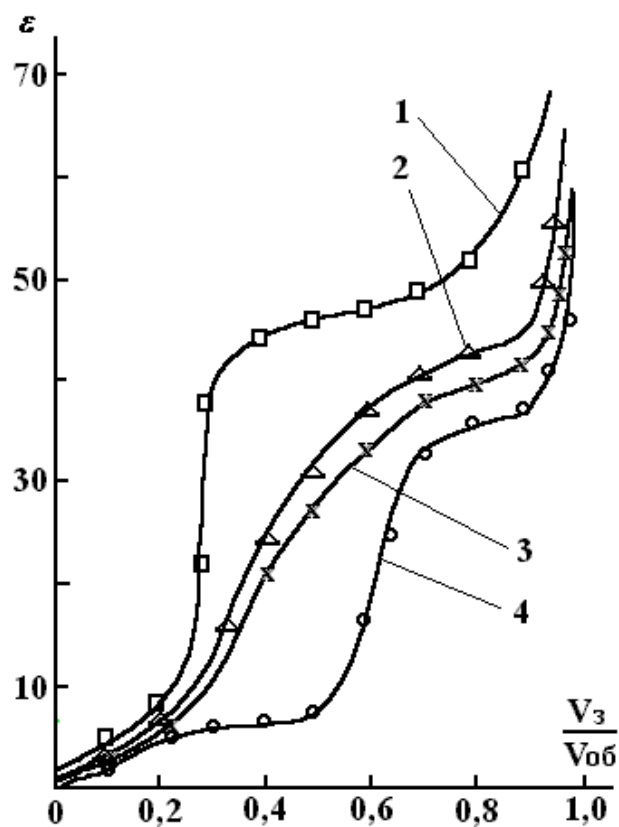


Рис. 4. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ силикагелей от степени заполнения сорбционного объема пор $V_3/V_{об}$. 1 – KCK-2; 2 – KCC-4; 3 – KCM-5; 4 – KCM-6n.

Таким образом, статические диэлектрические свойства различных марок промышленных силикагелей как типичных представителей неорганических синтетических полимеров, в значительной мере определяются влагосодержанием силикагелей различных марок, формами связи влаги и их пористой структурой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боечко Ф.Ф. Основы хімії полімерів. Київ, 1988.
2. Строение и свойства адсорбентов и катализаторов / Под ред. В.Г.Линсена / Пер. с англ. З.З. Висоцкого. М., 1973.
3. Методы исследования структуры высокодисперсных и пористых тел // Сб. научн. трудов. М., 1958.
4. Давыдов В.Я., Киселев А.В. Инфракрасные спектры поверхностных и объемных гидроксильных групп кремнезема // Журнал физической химии. 1963. Т.37. №11. С. 2593–2596.
5. Киселев А.В., Лыгин В.И. Исследование физической адсорбции воды на силикагеле методом инфракрасной спектроскопии // Коллоидный журнал. 1960. Т. 22. №4. С. 403–410.
6. Теверовский А.А. Снижение под действием влаги электрофизических характеристик пресс-материалов, применяемых для герметизации полупроводниковых приборов // Пластические массы. 1990. № 11. С. 28–36.
7. Романовский И.А. Исследование электрических свойств влажных дисперсных тел в связи с различием форм связи влаги: Автореф. дис. канд. физ.- мат. наук. Киев, 1968.
8. Панченко М.С. Комплексное использование сорбционных и калориметрических исследований применительно к решению некоторых задач внутреннего массопереноса в дисперсных телах: Автореф. Дис. канд. физ.- мат. наук. Киев, 1969.
9. Панченко И.М. Вплив електричних полів на вологообмінні процеси в металонаповнених гнучко-ланцюгових полімерах: Автореф. дисс... канд. физ.-мат. наук. Рівне, 1998.
10. Панченко И.М., Панченко М.С., Панасюк А.Л., Мосиевич О.С. Дослідження діелектричних властивостей силікагелів в умовах їх зволоження // Фізика конденсованих високомолекулярних систем: наукові записки Рівненського державного гуманітарного університету. Вип.7. Рівне, 1999. С. 11–15.
11. Панченко М.С., Панасюк А.Л., Мосиевич А.С. и др. Интенсификация адсорбционно-десорбционных процессов силикагелей наложением электрических полей // Электронная обработка материалов. 1988. №2. С. 32–37.
12. Жиленков Н.В. Физика диэлектриков // Труды Второй всесоюзной конференции. М., 1960. С. 39–43.
13. Духин С.С., Шилов В.Н. Диэлектрические явления и двойной электрический слой в дисперсных системах и полиэлектролитах. Киев, 1972.
14. Духин С.С. Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем. Киев, 1975.

Поступила 28.02.2000

Summary

It is shown, that industrial adsorbents – silicagelles KSK-2, KSS-4, KSM-5 and KSM-6P are typical synthetic inorganic polymers and simultaneously represent model capillary-porous solides. The experimental research of dielectric permeability of these polymeric solides in a constant electrical permeability of these polymeric solides in a de electrical field and in wide interval of a moisture content, including hygroscopic and damp condition is carried out. The outcomes are obtained with the help of original device added to classic sorption vacuum weight. It is shown, that the dependence ϵ on a moisture content of concrete silicagel at a constant temperature is determined by a porous structure of a sample, form of connection and condition of an absorbed moisture. The different magnitudes ϵ at characteristic moisture content silicagelles proceeding from probable mechanisms of polarization of an absorbed moisture and degree of filling of their porous space are explained.

НОВЫЙ ПРОЦЕСС ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО РАЗДЕЛЕНИЯ МЕДНО-СЕРЕБРЯНЫХ СПЛАВОВ В СУЛЬФАТНОМ ЭЛЕКТРОЛИТЕ

*Украинский государственный химико-технологический университет,
пр. Гагарина, 8, г. Днепрпетровск, 49005, Украина*

При переработке отходов радиоэлектронной и электротехнической промышленности возникает задача экономически и экологически приемлемого разделения компонентов медно-серебряных сплавов с высоким содержанием серебра (до 30% и более).

Хорошо известны электрохимические технологии рафинирования сплавов медь-серебро с малым содержанием серебра (до 0,5%, сульфатные электролиты [1]) и с большим содержанием серебра (80–90% и более, слабокислые нитратные электролиты). Первый вариант экологически чистый и был бы вполне приемлем, но в стандартных условиях практически нереализуем на сплавах с повышенной концентрацией серебра из-за быстрой и полной пассивации анодов. Представляющий же практический интерес для решения задачи второй вариант технологии имеет существенные недостатки – электролиз нитратных электролитов связан с образованием токсичных оксидов азота и необходимостью частой смены растворов.

Сплавы с промежуточным содержанием серебра подвергаются многостадийному пирометаллургическому и химическому переделу, причем из-за получения богатых по серебру лигатур почти неизбежна стадия электролиза в нитратном электролите со всеми указанными недостатками. Поэтому нами была предпринята попытка найти возможности для организации процесса рафинирования сплавов медь-серебро, богатых серебром (до 30% ат.) в сульфатном электролите.

Процесс проводили на модельных сплавах Ag-Cu, приготовленных из чистых металлов (содержание серебра 0–30%), в проточной двухкамерной ячейке, где электродные пространства разделены диафрагмой (пористая полипропиленовая ткань). Аноды и катоды площадью 60 см². В нижней части ячейки имелся карман для сбора анодного шлама, удаляемого в конце опыта через специальное сливное устройство. Катоды располагались с обеих сторон анода. Межэлектродное расстояние составляло 38 мм. В опытах по стационарному электролизу контролировали силу тока, потенциалы анода и катодов, напряжение, температуру электролита, количество прошедшего электричества, наличие ионов серебра и количество шлама в обоих пространствах. Опыты проводили при анодной плотности тока 150 А/м² и температуре 40 ± 2°С, концентрациях кислоты 50, 150, 250 г/дм³.

Стандартный процесс

При анодном растворении чистой меди на катоде осаждаются плотные равномерные осадки меди. При растворении же сплавов медь-серебро на катодах формируются дендриты с сильно развитой поверхностью. Образование дендритов коррелирует с содержанием Ag в аноде и разбавлением электролита по серной кислоте. Дендриты могут прорасти через диафрагму, вызывая короткие замыкания.

В процессе электролиза на аноде растворяется медь, а серебро выпадает в шлам. Наличие шлама наблюдается на поверхности анода, на диафрагме со стороны катодного пространства и в виде коллоидных взвесей в обоих электродных пространствах. Коллоидные частицы серебра, осаждающиеся на поверхности катода, являются причиной начала роста дендритов. На катоде содержание серебра колеблется в пределах 0,1–0,5%, в катодных дендритах 4–6%. Содержание серебра в шламе анодного пространства достигает и в ряде случаев превышает 90%.

Распределение медно-серебряного шлама между катодным и анодным пространствами, включая выделившийся на аноде, показано в таблице.

Основные параметры электролиза (стандартные условия – строки 1-6). H_2SO_4 – 150 г/л. $t = 40^\circ C$, $i = 150$ мА/см², время электролиза 24 ч

№	% Ag	E ^A , В	% шлама в анодном пространстве	% шлама в катодном пространстве	% Ag в анодном шламе	% Ag в катодном шламе	ионы Ag ⁺ в анодном пространстве	ионы Ag ⁺ в катодн. простр
1	5,69	0,504	75,0	25,0	Среднее	–80,5	–	–
2	10,68	0,640	31,7	68,3	Среднее	–60,6	+	–
3	15,66	0,616	23,3	76,7	Среднее	–75,4	+	–
4	19,82	0,620	30,8	64,2	59,1	56,2	–	–
5	25,67	0,697	29,2	70,8	85,7	53,7	+	–
6	30,74	0,701	49,3	50,7	59,3	64,0	+	–
7	10,68	0,635	98,3	1,7	95,3	90,7	–	–
8	19,82	0,856	92,5	7,5	99,5	99,8	–	–

Как видно, значительная доля шлама оказывается в катодном пространстве. И анодный, и катодный шламы содержат много меди, (15–40%), поэтому он нуждается в дальнейшей переработке. Металлографический анализ показал, что в шламе наряду с мелкими кристаллами, характерными для структуры самого сплава, присутствуют крупные трехмерные и лепестковые (плоские) дендриты с размерами, на порядок большими. Это явление однозначно указывает на протекание реакции вторичной кристаллизации серебра в растворе, что возможно, если там есть ионы серебра. Можно предположить, что при анодной поляризации в указанных условиях на аноде протекают не только реакции окисления меди $Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e$, $Cu \rightarrow Cu^+ + e$, но и реакция окисления серебра $Ag \rightarrow Ag^+ + e$. Продукты этой реакции – ионы Ag^+ – мигрируют в катодное пространство, где и восстанавливаются до металла. Наличие ионов серебра в электролите в обоих пространствах нами подтверждено аналитически. Подтверждают это и результаты измерения анодных потенциалов – в начале электролиза в растворах с разной концентрацией кислоты они практически совпадают, а в конце электролиза (через 24 часа), начиная со сплава 10,68% серебра, сдвинуты в положительную сторону на 250- 450 мВ по сравнению с начальными. Действительно, приведенные в таблице значения анодных потенциалов достигают величины потенциала равновесия реакции $Ag - e = Ag^+$ ($E = + 0,654$ В, насыщенный раствор Ag_2SO_4 , [2]), поэтому серебро с анода частично переходит в раствор. Это заключение подтверждается также результатами потенциодинамических измерений. На сплавах медь-серебро при развертке потенциала в анодную область наблюдаются два пика. Первый соответствует области активного растворения и последующей солевой пассивации участков меди на поверхности анода, второй – растворению и пассивации серебра (рис. 1). Потенциалы, возникающие при длительной стационарной работе анодов, соответствуют области активного растворения серебра (0,75–0,8 В).

В связи с обнаруженным фактом перехода части серебра в раствор и его восстановления до металла возникает вопрос о том, что является восстановителем. Из всех компонентов системы вероятным восстановителем представляются ионы одновалентной меди. Термодинамически они могут образовываться при анодной поляризации. Кроме того, у поверхности меди существует равновесие $2Cu^+ \leftrightarrow Cu + Cu^{2+}$ с константой $1,5 \cdot 10^{-6}$ (реакция диспропорционирования), которое может при расходовании ионов Cu^+ смещаться в сторону их образования. Действительно, опытами было установлено, что введение Cu^+ в пробу рабочего электролита, содержащего ионы серебра, приводит к их химическому восстановлению, то есть протекает реакция $Cu^+ + Ag^+ \rightarrow Cu^{2+} + Ag$. Однако, по-видимому, образующееся при анодном растворении богатых серебром сплавов количество одновалентной меди недостаточно для полного восстановления образовавшихся ионов серебра, поэтому последние накапливаются в анолите и проникают через диафрагму в католит, где и восстанавливаются.

В стандартных условиях через некоторое время с начала электролиза начинает пассивироваться анод – его потенциал увеличивается от первоначального значения 0,3–0,4 В (нвэ), достигая потенциала выделения кислорода 1,23 В и доходит иногда до 2–3 В. За период пассивации (0,5 часа и более) на аноде наблюдалось выделение кислорода, срыв шламовой пленки и возврат потенциала анода к исходному значению. Как показывают потенциодинамические исследования, глубокая

пассивация анодов обусловлена образованием на его поверхности солевых пленок сульфатов меди и серебра, по-видимому включающих в себя потерявшие контакт с анодом его фрагменты и восстановленное в растворе металлическое серебро, вероятно, в коллоидной форме. Эти особенности делают шламовую пленку плохо растворимой и устойчивой.

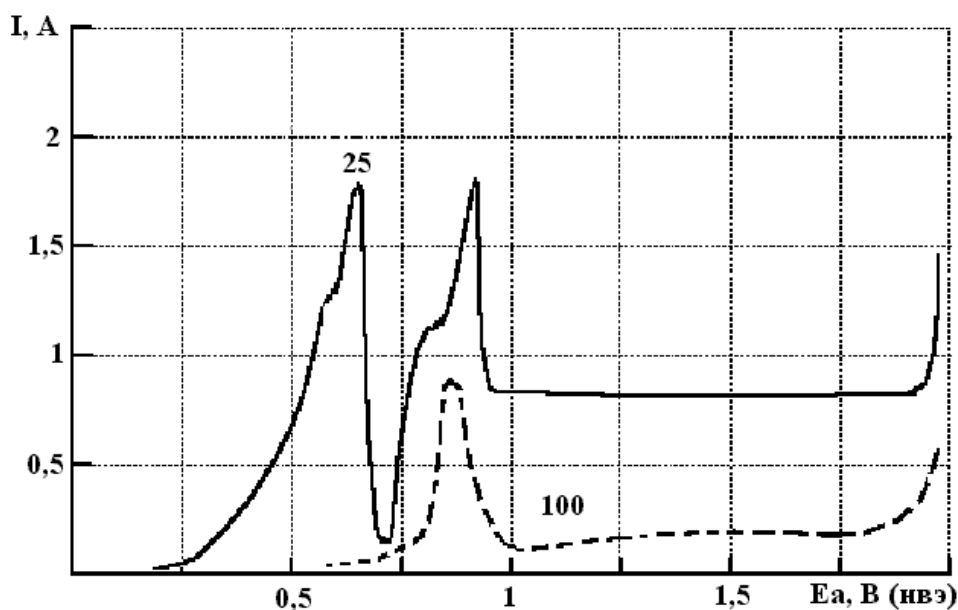


Рис. 1. Анодные потенциодинамические кривые в растворе 250 г/дм³ серной кислоты, 40 г/дм³ меди. Площадь электродов 7,1 см². Скорость развертки потенциала 4 мВ/с. Числа на кривых – концентрация серебра в сплаве, % ат.

Новый процесс

Очевидно, что задача создания более совершенной электролитической технологии рафинирования сплавов Cu–Ag в сернокислотном электролите заключается в том, чтобы предотвратить образование шламовой пленки (пассивацию анода), по возможности полностью восстановить ионы серебра в анодном пространстве, не допуская их попадания в катодное пространство. Из вышеизложенного понятно, что это было бы возможно путем более эффективного использования химического процесса $\text{Cu}^+ + \text{Ag}^+ \rightarrow \text{Cu}^{+2} + \text{Ag}$.

Известно, однако, что простые соединения Cu^+ в водных растворах неустойчивы. Тем не менее, как и другие переходные металлы, одновалентная медь может образовывать стойкие комплексы [5] с олефиновыми соединениями, содержащими двойные связи в молекулах и обладающими высокой реакционной способностью в реакциях присоединения. Действительно, в [4–6] было показано, что добавки к сернокислому электролиту меднения некоторых ненасыщенных соединений заметно повышали концентрацию ионов Cu^+ в растворе. При этом наблюдалось повышенное образование этих ионов вблизи неполяризованных пластинок меди, погруженных в электролит. Авторы использовали аллиловый спирт, акрилонитрил, акриловый альдегид, акриловую кислоту. Аналогичный эффект могут давать и другие похожие соединения, например, винилуксусная кислота, кротоновый альдегид, дибензоилэтилен, кротоновая (2-бутеновая) кислота, малеиновый ангидрид, диметилфумарат и др. За счет взаимодействия ионов Cu^+ с винильной группой молекул образуются стойкие олефиновые π -комплексы ионов Cu^+ , представляющие собой металлоорганические соединения, содержащие π -лиганды олефины или их производные.

На основании изложенного нами был разработан [7] новый эффективный процесс рафинирования богатых серебром сплавов Cu–Ag. Процесс осуществляется в проточном (из катодного в анодное пространство) стандартном сульфатном электролите с добавкой олефинового соединения, при наличии диафрагмы. Для ускорения генерации ионов одновалентной меди в анодном пространстве дополнительно размещались неполяризуемые медные пластинки или скрап.

Последние две строки в таблице показывает, насколько резко отличаются наиболее важные параметры процесса в условиях, когда в электролит вводится компонент, стабилизирующий ионы одновалентной меди. Металлическое серебро практически полностью восстанавливается из раствора

в анодном пространстве. Высокая чистота серебра косвенно указывает на то, что в серебряном шламе даже если и появляется металлическая медь (осыпание с анода), она растворяется по реакции диспропорционирования, а образующиеся ионы Cu^+ тут же восстанавливают серебро (образование дендритов в шламе). Наличие протока электролита и быстрое восстановление ионов серебра в анолите препятствуют их проникновению в катодное пространство, поэтому катодная медь также имеет высокую чистоту (марки М0 и М1). Рис. 2 подтверждает регулируемую роль олефиновых соединений в стабилизации ионов одновалентной меди в электролите: увеличение концентрации стабилизатора эквивалентно увеличению концентрации ионов одновалентной меди и, следовательно, скорости восстановления серебра, что в конечном итоге и проявляется в увеличении доли серебряного шлама, образующегося в анодном пространстве.

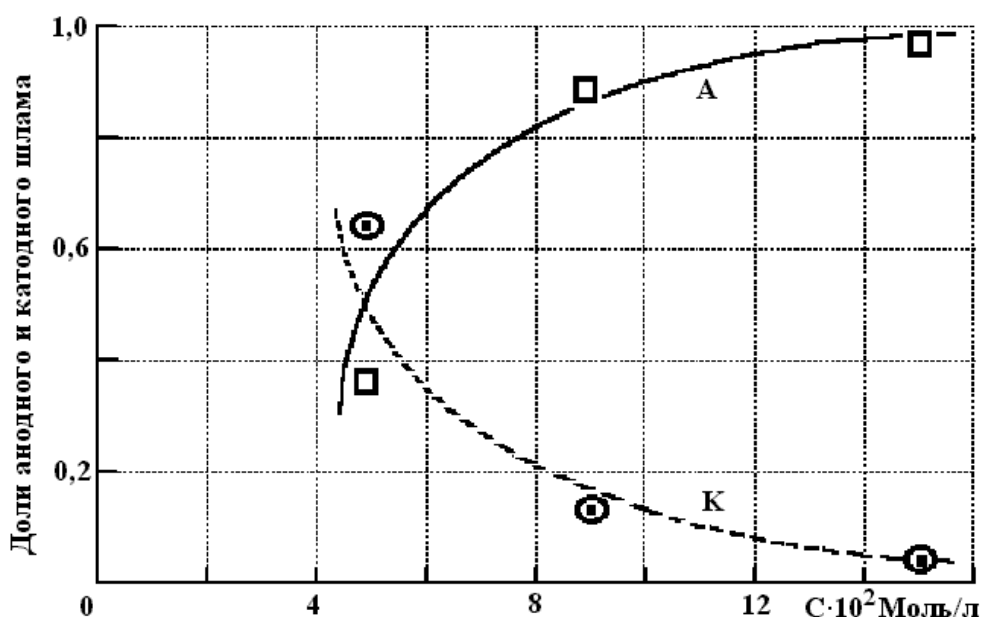


Рис. 2. Распределение шлама между анодным (А) и катодным (К) пространствами, в долях от общего количества, в зависимости от концентрации стабилизатора ионов одновалентной меди. Концентрация серной кислоты 100 г/дм^3 , меди — 40 г/дм^3 , $t = 40^\circ \text{C}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баймаков Ю.В., Журин А.И. Электролиз в гидрометаллургии. М., 1963.
2. Справочник по электрохимии / Под ред. А.М. Сухотина. Л., 1981.
3. Полинг Л. Общая химия. Пер. с англ. М., 1974.
4. Гамали И.В., Самсонов А.И. // Электрохимия. 1988. Т. XX. № 11. С. 1488–1492.
5. Варгалюк В.Ф., Лошкарев Ю.М., Полонский В.А. 1985. Электрохимия. Т. XI. № 5. С. 603–607;
6. Варгалюк В.Ф., Лошкарев Ю.М., Полонский В.А., Хорошавкина Н.В. Электрохимия. 1986. Т. XII. № 9. С. 1229–1231.
7. Гамали И.В., Чернюк О.В., Стороженко В.Н., Самсонов А.И. и др. Патент Украины. Мкл⁶ С22В 15/14, С22В 61/60, № 99127098, приоритет от 27.12.1999.

Поступила 14.03.2000

Summary

Mechanism of the anodic dissolution of copper-silver alloys with a silver content up to 30% in a sulphuric electrolyte has been studied. It has been shown that in the process of alloy dissolving silver ions transfer into electrolyte, and the ions of univalent copper are formed, resulting in the process of the secondary cristallization of silver in a slime. While adding some olefin compounds in a small quantity to a sulfate electrolyte the stable complexes of univalent copper are formed, and as a result its concentration increases, and in anolyte silver ions are completely reduced. The final effect consists in the fact that sliming of high-pure silver is observed practically in anode space only, and on cathode silver-free copper deposits.

ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

*Институт прикладной физики АН Молдовы,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова*

Совершенствование радиоэлектронной техники зачастую связано с возможностями надежной реализации термостабилизации отдельных блоков и узлов. При этом традиционные методы, в некоторых случаях, неприемлимы, из-за наличия движущихся частей и вибраций. Методы термостабилизации, основанные на электрогидродинамических явлениях (в газах, жидкостях) [1–3], лишены этих недостатков, они конструктивно просты, обладают повышенной надежностью, ресурсом и малой потребляемой мощностью.

Подобная система обеспечения температурных режимов исследована в работе [4], в которой использованы электрогидродинамические явления в диэлектрической жидкости. Недостатком ее является необходимость размещения термостатируемого блока радиоэлектронной техники в герметичный корпус по техническим требованиям, запрещающие прямой контакт элементов блока с жидкостью. Поэтому сложна организация более эффективной термостабилизации каждого или отдельного элемента блока.

Подобных недостатков лишена система электрогидродинамического термостатирования в газовой среде. Основным элементом такого термостата является электрогидродинамический насос (ЭГДНГ), создающий циркуляцию воздуха в термостатируемом объеме.

ЭГДНГ (рис. 1) состоит из диэлектрического цилиндрического корпуса 1, предназначенного для крепления электродной системы и высоковольтного ввода 2. Электродная система состоит из электрода-эмиттера 3 и электрода-коллектора 4. Эмиттер состоит из игольчатых электродов, установленных на металлической основе, изготовленной в виде решетки. Продольные оси игольчатых электродов перпендикулярны плоскости эмиттера, а их острия находятся в одной плоскости, параллельной плоскости коллектора. Последний представляет собой сетчатый электрод, натянутый на опорное кольцо и имеет возможность фиксированного перемещения внутри корпуса вдоль оси. Высоковольтное питание осуществлялось от источника напряжения АИН-70 и контролировалось киловольтметром С-100. Ток коронного разряда измерялся в заземляющей цепи после электрода – коллектора, а скорость электрического ветра – крыльчатый анемометром 5.

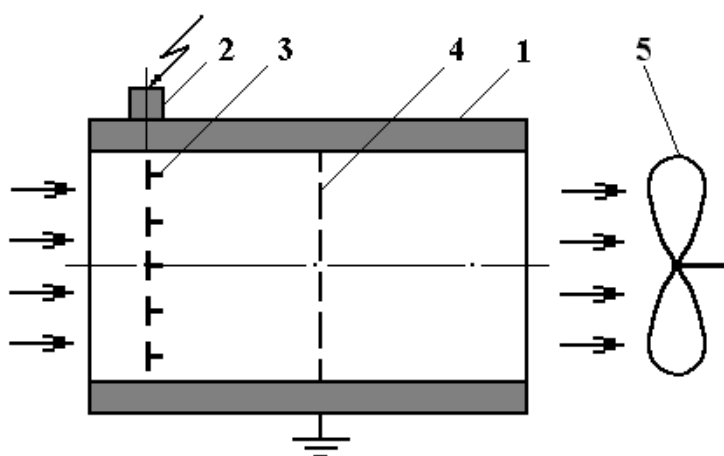


Рис. 1. Электрогидродинамический газовый насос.

При подаче высокого напряжения на электродную систему и достижении определенной величины, на игольчатых электродах зажигался коронный разряд, сопровождающийся образованием электрического ветра – газового течения, направленного от эмиттера к коллектору. Расходные характеристики насоса в зависимости от вольтамперной характеристики коронного разряда приведены на рис. 2. С ростом межэлектродного расстояния от 10 до 50 мм уменьшается максимальный ток разряда с 500 до 150 мкА и расход газа с 10 до 7 л/с.

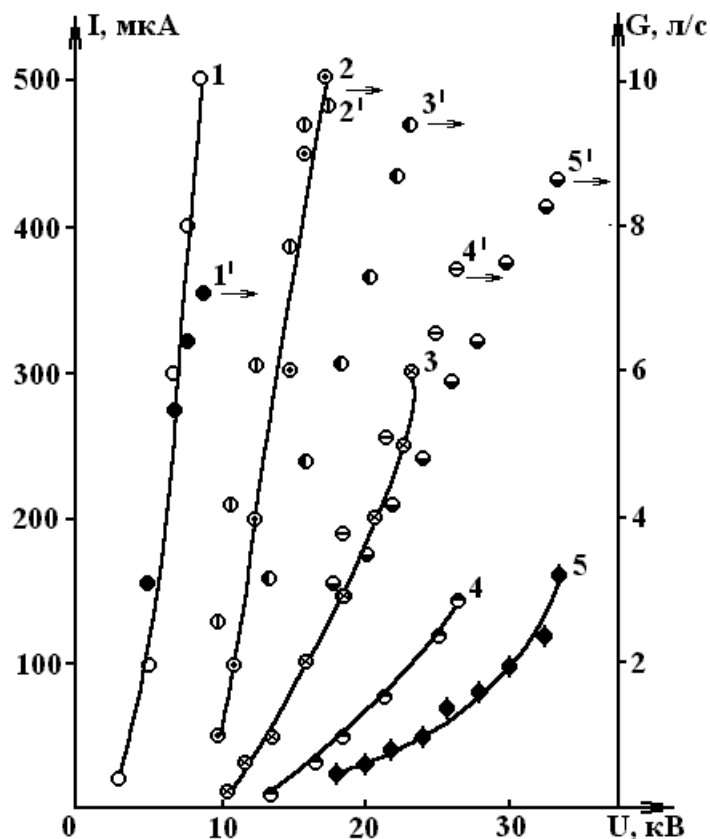


Рис. 2. Зависимость тока коронного разряда и расхода газа от напряжения на электродах ЭГДНГ. 1 – 5 – вольтамперная характеристика, 1' – 5' – расходная характеристика. Межэлектродное расстояние (мм): 10 (1, 1'), 20 (2, 2'), 30 (3, 3'), 40 (4, 4'), 50 (5, 5').

Эти результаты положены в основы выбора параметров ЭГДНГ 1, установленного на крышке 2 – газового термостата (рис. 3), выполненный в виде цилиндра 3 из нержавеющей стали. Внутри установлен имитатор радиоэлектронного блока (РБ) 4, имеющий форму параллелепипеда, со стенками из нержавеющей стали, снабженный нагревательным элементом.

В полости термостата размещается буферный нагревательный (БН) элемент 5. Наружная поверхность термостата теплоизолируется оболочкой 6 из оргстекла. Промежуток 7 между оболочками из нержавеющей стали и оргстекла заполнен охлаждающей водой, прокачиваемой через штуцеры 8.

Автоматическое поддержание температуры внутри ЭГДГ – термостата в пределах 30–35 °С с точностью 0,05 °С и выравнивание градиента температур между крышкой и гранями оболочки РБ, осуществляется, за счет водяного охлаждения и буферного нагревателя, а также перемешивания газовой среды в полости термостата электрическим ветром при коронном разряде. Электрический ветер одновременно выполняет две задачи; способствует переносу тепла от имитатора РБ и буферного нагревателя к водяному проточному холодильнику и, во-вторых, коронный разряд является источником тепловыделения. Таким образом, внутри термостата осуществляются сложные процессы комбинированного теплообмена.

На рис. 4, 5 представлены результаты испытаний ЭГДГ – термостата. Приведена динамическая зависимость температурного уровня от тепловыделения – теплопоглощения тем или иным источником или стоком тепла. Каждое изменение условий отделено поперечными пунктирными

линиями и обозначено участками с нумерацией I-IV, соответствующими определенным режимам приведенным в таблице:

Уча- сток	Мощность на РБ, Вт	Мощность на БН, Вт	Параметры коронного разряда		Охлаждение водой	Темпера- тура охлажда- ющей воды °С	Темпера- тура окру- жающей среды °С
			U , кВ	I , мкА			
I	2,8	0	0	0	–	23,9	23,9
II	2,8	0	0	0	+	25,0	23,9
III	2,8	9,6	0	0	+	25,0	23,9
IV	2,8	9,6	16,5	400	+	25,0	23,9

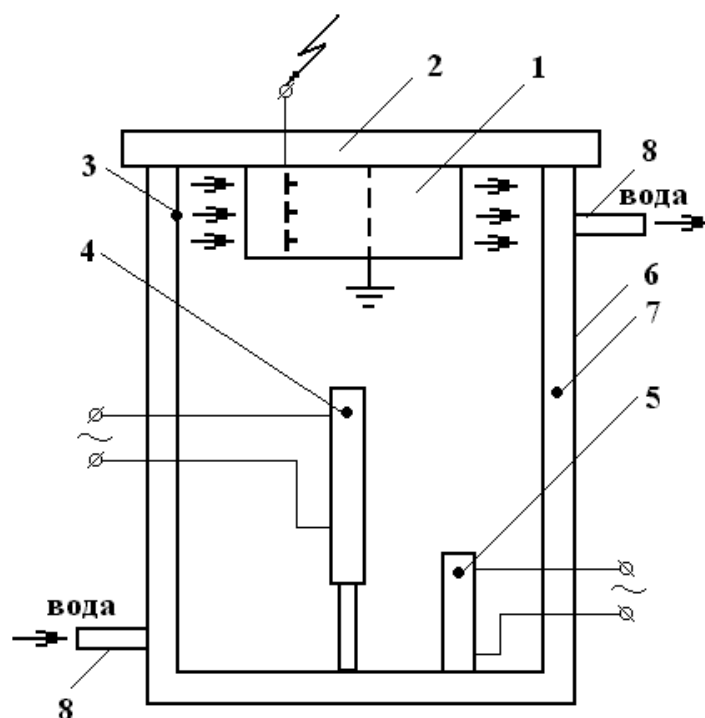


Рис. 3. ЭГД – газовый термостат.

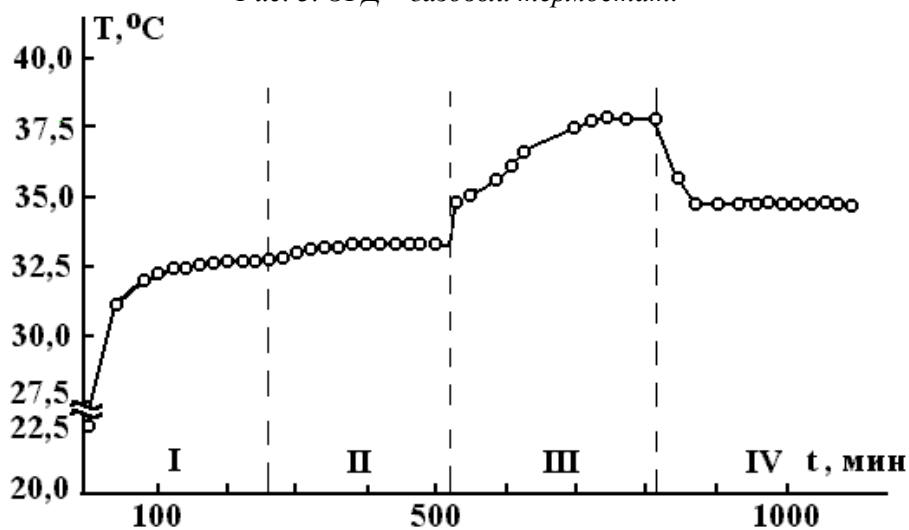


Рис. 4. Динамическая зависимость температурного уровня крышки РБ.

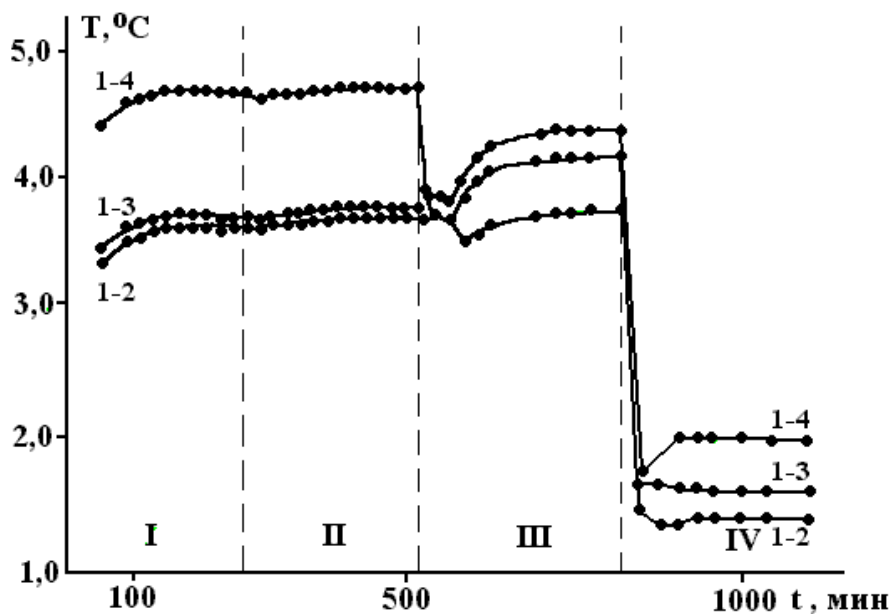


Рис. 5. Динамические зависимости температурных уровней граней РБ. Крышка обозначена индексом 1, боковые грани: 2, 3, 4.

Изменение температуры в трех гранях и крышке оболочки РБ, скоррелированные по времени с данными на рис. 4, приведены на рис. 5. Видно, что посредством воздействия электрического поля (участок IV) удается поддерживать температуру в термостате на заданном уровне $34,8^{\circ}\text{C}$ с точностью $0,05^{\circ}\text{C}$ и снизить градиент температур с $3,5^{\circ}\text{C}$ до $1,4-1,5^{\circ}\text{C}$ и с $4,5^{\circ}\text{C}$ до $2,0^{\circ}\text{C}$, то есть более чем в 2 раза. Таким образом показана способность ЭГДГ – термостата решать задачи термостабилизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. Электроконвекция и теплообмен. Кишинев, 1977.
2. Стишков Ю.К., Остапенко А.А. Электродинамические течения в жидких диэлектриках. Л., ЛГУ. 1989.
3. Рубашов И.Б., Бортников Ю.С. Электрогазодинамика. М., 1971.
4. Болога М.К., Кожевников И.В., Кожухарь И.А. Электродинамические преобразователи в системах термостабилизации // Электронная обработка материалов. 1999. № 1. С. 19–23.

Поступила 12.04.2000

Summary

The possibilities of applications of electrohydrodynamic phenomena in gases for thermostating of electronic units are investigated. The head-flow rate characteristics of electrohydrodynamic gas pump, installed in thermostat, in dependence on applied potentials difference at various interelectrode gaps are presented. It is shown experimentally that proposed method ensures an effective thermostating.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

С.Н. Маслоброд

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ОРГАНИЗМА. IV. ПРИКЛАДНОЕ И НАУЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ

*Институт генетики АН Молдовы,
ул. Пэдурий, 20, г. Кишинев, MD-2002, Республика Молдова*

1. Электрофизиологическая оценка адаптивного потенциала растений

1.1. Экспресс-оценка ростовой активности, влияние диссимметрии объекта

По нашим [1, 2] и литературным [3] данным, стационарные потенциалы и потенциалы возбуждения растительного объекта несут различную информацию о его состоянии. Активно растущие зоны объекта (растения и животного), как правило, характеризуются более высокими значениями отрицательных стационарных биоэлектрических потенциалов (БЭП) и амплитуд электрической реакции (АЭР) на стресс по сравнению с зонами, где рост закончился или еще не начался [1–4]. В частности, у растущих листьев в их средней части БЭП более положительны, чем в верхней части.

При изучении "электрической карты" листа было обнаружено, что среднеарифметические значения БЭП и АЭР листа соответствуют значениям этих показателей, измеренных в средней части листа [1, 2]. Таким образом, последние интегрально отражают некий "средний потенциал" (СП) листа. В свою очередь, БЭП и АЭР средних листьев целого растения есть мера СП всех листьев растения и всего растения (например, у кукурузы и табака) [1, 2]. Была получена четкая прямая корреляция между положительными значениями БЭП в средних зонах средних листьев растения с а) размерами, длиной или высотой листьев, б) размерами растения, в) продуктивностью растения [1, 2]. Существенно, что обнаруженная корреляция носит общебиологический характер, так как характерна для разных объектов, размеры и продуктивность которых определяются как эндогенными (генетическими), так и экзогенными (модифицирующими) факторами. Это позволило широко использовать данную закономерность при разработке экспресс-методов электрофизиологической оценки ростовой активности и продуктивности растений. Подчеркнем, что наличие в растительном организме точек "среднего потенциала" методически резко упрощает и ускоряет решение важной народнохозяйственной задачи.

Хорошим электрофизиологическим тестом состояния растения оказался и другой параметр – АЭР. Он отражает степень устойчивости растения к стрессу (менее устойчивые формы имеют большую АЭР). Поскольку растущие объекты, как правило, менее устойчивы к стрессу, чем покоящиеся, то у них выше АЭР и ниже положительный БЭП. В этом электрофизиологически проявляется известная полярность соотношения двух сторон адаптивного потенциала растения – его экологической устойчивости и продуктивности [5].

В экспериментах электрофизиологического тестирования средний лист проростков или взрослых растений отчленяли и в средних зонах объекта измеряли потенциалы [1, 2]. При использовании неотчлененных от растения листьев эффект корреляции был менее выражен из-за электромагнитного взаимодействия органов целого растения. Объем репрезентативной выборки составлял

15–30 повторностей. Расшифровка принятых сокращений дана в [6].

1.1.1. Тестирование стимуляционных доз предпосевого γ -облучения семян сельскохозяйственных растений

При анализе стационарных БЭП отчлененных средних листьев проростков и взрослых растений гибридов кукурузы, полученных от предпосевной обработки семян разными дозами [1, 2], была подтверждена прямая корреляция размера объекта (длины и ширины листа) со значениями положительных БЭП, а также совпадение максимальных значений этих параметров со значениями стимуляционных доз γ -облучения семян [5–7,5 Гр], проверенных в производственных условиях по вегетативной и зерновой продуктивности [7]. Аналогичная корреляция получена и для параметра интенсивности свечения Кирлиан (свечения листьев в поле высоковольтного разряда) (рис. 1). Значения БЭП и свечения Кирлиан также коррелируют с содержанием в листьях триптофана (предшественник ауксина). Другой параметр – АЭР на свет связан не со стимуляционными дозами, а с содержанием в листьях хлорофилла, то есть с интенсивностью фотосинтеза листьев (рис. 1). Диссимметрия семян модифицирует эффект (стимуляционные дозы для *l*, *s*, *d*-вариантов – 7,5; 5 и 5 Гр). В таком эксперименте стимуляционные дозы предпосевной γ -обработки семян можно тестировать и на уровне семян – по содержанию в них свободных радикалов (оно выше в стимуляционных вариантах) [2, 7].

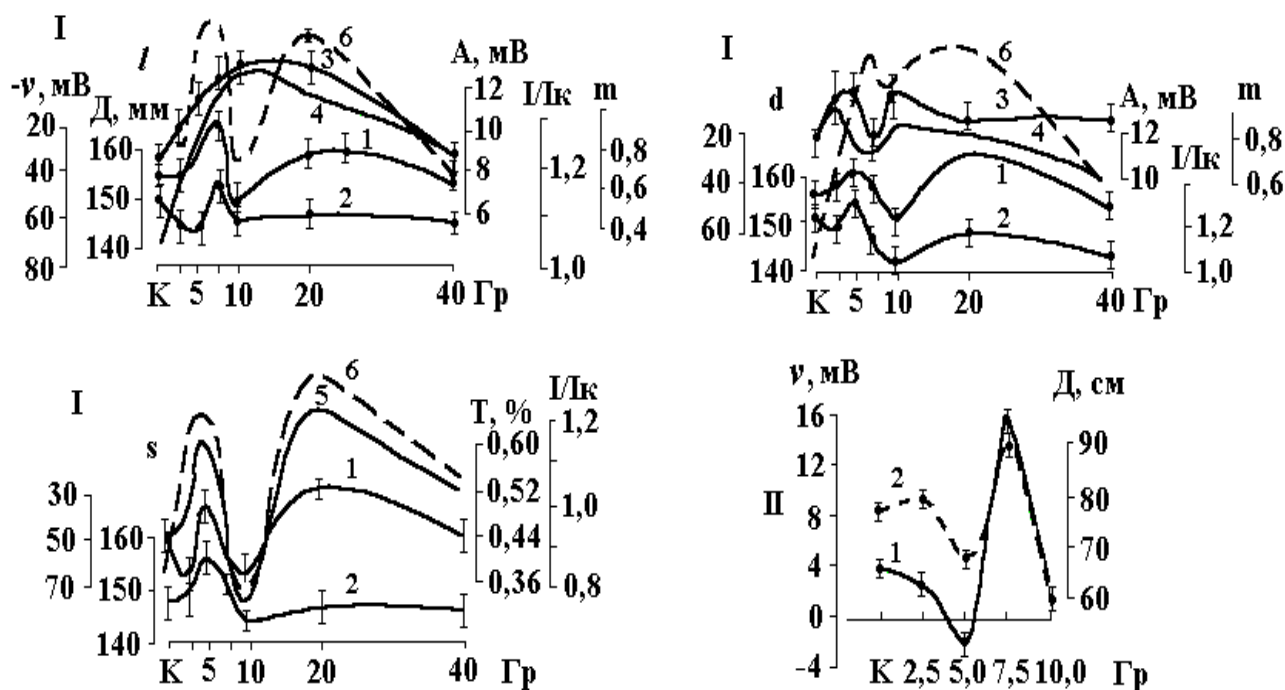


Рис. 1. Изменение электрофизиологических, морфологических и биохимических параметров средних листьев растений кукурузы под влиянием предпосевого γ -облучения диссимметричных семян.

I – 15-дневные проростки (гибрид K167M): *l*, *s*, *d* – соответственно левые, симметричные и правые семена. 1 – стационарный потенциал (V , мВ); 2 – длина (D , мм); 3 – амплитуда электрической реакции на свет (A , мВ); 4 – содержание общего хлорофилла (m , мг/г сыр.в.); 5 – содержание триптофана (%); 6 – интенсивность свечения Кирлиан (I/I_k , отн.ед.). *II* – растения в фазе молочно-восковой спелости (гибрид Югославский): 1 – стационарный потенциал (V , мВ); 2 – длина (D , см).

1.1.2. Тестирование стимуляционных доз предпосевого лазерного облучения семян сельскохозяйственных растений

У проростков и взрослых растений кукурузы, полученных из обработанных лазерным излучением семян ($\lambda = 633,8$ нм, $W = 0,01$ мВт/см²), также обнаружена прямая корреляция стационарных положительных БЭП отчлененных средних листьев со стимуляционными вариантами (5–7 мин), оцениваемыми по длине листьев и по данным полевых испытаний [2] (рис. 2), причем различия высокосущественны только на БЭП. Так, значение отрицательных БЭП листьев проростков гибрида

кукурузы К167М по вариантам облучения симметричных семян, в мин – 0, 3, 7, 15, 30, 60 распределены следующим образом, в мВ – 57 ± 3 , 37 ± 4 , 25 ± 3 , 47 ± 2 , 40 ± 3 , 32 ± 4 . Качественная модификация эффекта по экспозициям воздействия фактором на диссимметричные семена не обнаружена (рис. 2). Вместе с тем наблюдаются количественные различия по БЭП между *l*, *s*, *d* вариантами (рис. 2).

Выявлен механизм действия низкоинтенсивных излучений гелий-неонового лазера ($\lambda = 633,8$ нм) на семена кукурузы – через активацию фитохромной системы объекта [2, 9].

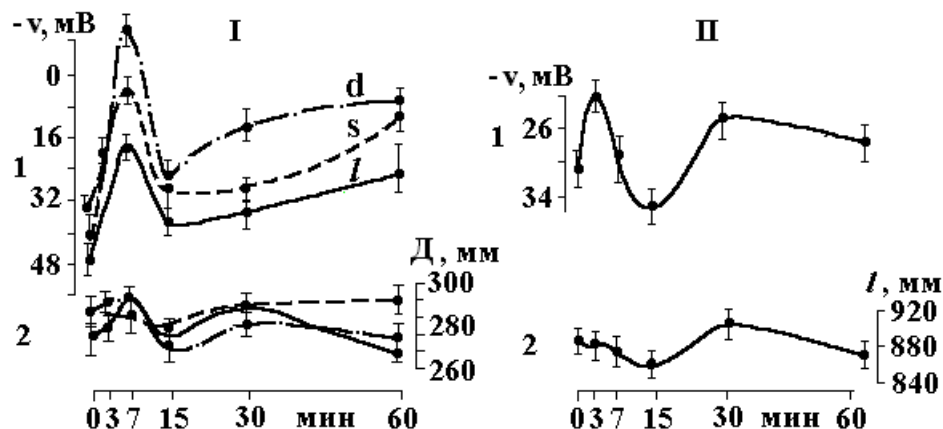


Рис. 2. Изменение электрофизиологических и морфологических параметров средних листьев кукурузы (гибрид К167М) под влиянием предпосевного лазерного облучения ($\lambda = 633,8$ нм; $W = 0,01$ мВт/см²) диссимметричных семян.

l, *s*, *d* – соответственно левые, симметричные и правые семена. I – 15-дневные проростки. II – растения в фазе молочно-восковой спелости. 1 – стационарный потенциал (*V*, мВ); 2 – длина (*D*, мм).

1.2. Экспресс-оценка устойчивости генотипов растений к абиотическим и биотическим факторам среды

1.2.1. Оценка жаростойкости линий кукурузы

Оценка проводилась по значениям АЭР неотчлененных 15-дневных листьев [9]. Вначале изучались проростки линий кукурузы с генотипически обусловленным признаком жаростойкости. На включение и выключение света на фоне $+40$ °С, а также на перепад температур $20-40$ °С на свету и в темноте амплитуда электрической реакции была ниже у жаростойкой линии. Такой же результат получен и на проростках томатов. В следующем опыте у нежаростойкой линии повышали жаростойкость путем предпосевной температурной закалки семян по Генкелю [10]. И в этом случае жаростойкая линия имела меньшую АЭР на свет на фоне $+40$ °С по сравнению с нежаростойкой линией (контролем), значения АЭР соответственно, в мВ – $3,85 \pm 0,49$ и $6,71 \pm 0,84$ [10]. Жаростойкость линии также оценивали в пределах одного генотипа, но закалке подвергали проростки (по схеме [10]). АЭР на свет на фоне $+40$ °С и в этом случае была ниже по сравнению с незакаленными проростками [10]. В завершающей серии опытов закалке вновь подвергали проростки, но по более сложной схеме ступенчатого закаливания [11], когда у объекта происходили более глубокие структурные и функциональные сдвиги. Как и ожидалось, вновь существенно откликнулась на закалку только неустойчивая форма (линия F7), резко снизившая АЭР на свет на фоне $+40$ °С и на перепад $20-40$ °С на свету и в темноте (перепад $20-40$ °С – $3,34 \pm 0,97$ мВ, контроль – $12,88 \pm 0,14$ мВ; перепад $40-20$ °С – $15,46 \pm 1,80$ мВ, контроль – $35,80 \pm 1,80$ мВ) [9]. Однозначное электрофизиологическое поведение объекта, которое характеризуется генотипическим или модифицированным внешней средой признаком жаростойкости, наталкивает на мысль, что при всем многообразии генетической и структурной "оснасти" этого признака экологической устойчивости организма, энергетическая сущность признака единообразна и выражается через строго определенный характер изменения электрических свойств объекта, то есть через биоэлектрическое поле или электрофизиологическую стереополярность.

При оценке жаростойкости линий с помощью датчиков разности температур лист-воздух (РТ) более высокую АЭР на включение и выключение света на фоне $+20$ °С и 40 °С имели жаростойкие формы [9]. Дополнительно с помощью датчиков РТ удалось четко дифференцировать эти линии в

условиях периодической подачи света на фоне +46 °С по скорости выхода кривой отклика листьев на нулевой уровень (она выше у нежаростойких форм) и по изменению формы этой кривой (у нежаростойких форм плавная кривая переходит в ступенчатую [10]).

1.2.2. Оценка холодостойкости линий кукурузы

По данным литературы, холодостойкие формы растений отличаются от нехолодостойких более низкой АЭР на холодовой стресс [12] и лучшей способностью удерживать уровень стационарных БЭП при медленном нарастании фактора [13]. Нами на отчлененных листьях проростков было дополнительно показано, что холодостойкие формы (линии кукурузы) лучше удерживают АЭР по сравнению с неустойчивыми при циклической подаче фактора [14]. Так, у холодостойкой линии F7 значения отрицательных АЭР на периодическое резкое снижение температуры от +20 °С до 0 °С составило ряд, в МВ - 25,0±4,1; 23,4±3,8; 16,5±4,2; 4,7±5,0; 8,3±4,1; 8,4±1,7; 8,6±1,8; 8,4±2,5; соответственно у нехолодостойкой линии ВИР44 - 36,7±4,1; 34,1±4,6; 20,8±4,8; 20,7±4,5; 20,6±5,1; 20,8±6,6; 20,7±7,5; 15,0±5,8. Гибриды лучше удерживают амплитуду, чем линии, что согласуется с высокой гомеостатичностью гибридов [14]. С возрастом проростков закономерность сохраняется [13]. Малоинформативным оказался параметр снижения АЭР на повторяющиеся световые воздействия на фоне +20 °С и 0 °С. Холодовая закалка существенно уменьшает АЭР на свет у нехолодостойкой линии, но не сказывается на холодостойкой [14]. Минимальный температурный перепад (со скоростью 1°/мин), при котором различия между контрастными по холодостойкости формами существенны, – 5 °С [14]. Оптимальным возрастом объекта в таких опытах являются 15-дневные проростки [13]. У линий кукурузы эффект лучше выражен у отчлененных листьев [14]. Прием постепенного повышения температуры воздуха оказался неэффективным [14]. В специальных опытах было показано, что холодостойкие формы по сравнению с нехолодостойкими имеют меньшие амплитуды отклика проростков, регистрируемые с помощью датчиков водного потока (ВП) стебля, разности температур (РТ) лист-воздух и температуры листа (ТЛ) на периодические световые и температурные воздействия [13].

1.2.3. Оценка конкурентоспособности линий и гибридов кукурузы

Нами был предложен ряд экспресс-методов оценки данного признака на основе концепции агрофитоценоза как ансамбля осцилляторов-растений, в котором конкурентоспособность (устойчивость к загущению в посевах) компонентов-растений зависит от степени жесткости связи между ними [15, 16]. Как отмечалось ранее [17, 18] параметрами оценки структурной и функциональной целостности фитоценоза являются: электрическое сопротивление (R) корневых контактов растений ценоза, коэффициент вариации (КВ) определенного параметра и его абсолютная величина (Н). У контрастных по конкурентоспособности линий и гибридов кукурузы R и КВ (по АЭР и морфобиологическим признакам – высоты и сырой массы проростков и растений, количеству их листьев, ширине листьев и др. [15]) ниже, а Н АЭР выше у конкурентоспособных форм (данные подтверждены полевыми опытами, проведенными в Молдавском Институте кукурузы и сорго). В частности R у линий РО92, МК169А и МК369А составили, в мОм – 567±44; 776±246 и 1093±175; КВ по АЭР гибридов М450, П3978, М291, М215, М377, М411 и М330 составили, в % – 1,2±0,2; 1,3±0,2; 1,4±0,2; 2,1±0,2; 2,7±0,3; 3,3±0,3; и 3,3±0,3 (формы расположены в порядке убывания их конкурентоспособности).

1.3. Электрофизиологическая оценка генотипов

1.3.1. Электрофизиологическая оценка эволюционноразличающихся форм кукурузы и томатов

Дикорастущие виды и разновидности растений обладают более высокой общей и специфической экологической устойчивостью по сравнению с культурными формами. Они являются основным источником повышения адаптивного потенциала при селекции [5]. Природа признаков устойчивости полигенна, что существенно затрудняет их идентификацию с помощью традиционных селекционно-генетических методов. По значениям АЭР отчлененных листьев 30-дневных проростков культурных форм кукурузы (линии F7 и ВИР44) и предковых форм (теосинте и коикс) получены существенные различия [19, 20]. Культурные формы отличаются более высокими АЭР на ступенчатое снижение и повышение температуры на 5 °С. Так, у F7, ВИР44, теосинте, коикс при перепаде 20°–15°С АЭР соответственно равны, в мВ – 12±0,7; 18±1,1; 6±0,3; 6±0,1 (рис. 3, А).

Аналогичные закономерности обнаружены у эволюционно различающихся форм томатов: дикая форма также имеет меньшую АЭР по сравнению с культурной формой на перепад в 5 °С. Гибрид между этими формами занимает промежуточное положение [19] (рис. 3, Б). Более четкие результаты получены в варианте снижения температуры. Следовательно, эти формы более контрастны по холодостойкости. При перепаде на 20 °С закономерности подтверждаются. По АЭР на световое воздействие на фоне разных температур у предковых форм АЭР также более низкая и такой же характер электрофизиологического соотношения между объектами опыта. Так, у F7, ВИР44, теосинте и коикс АЭР на включение света на фоне 0 °С соответственно равны, в мВ – 10,5±1,1; 9,1±0,6; 6,2±0,2; 6,1±0,1; а на фоне +30 °С – 26,7±2,4; 21,2±1,9; 11,4±0,5; 10,4±1,1 (рис. 3, В). Холодовая обработка (закалка) привела к резкому снижению АЭР только у культурных форм, что логично (рис. 3, Г).

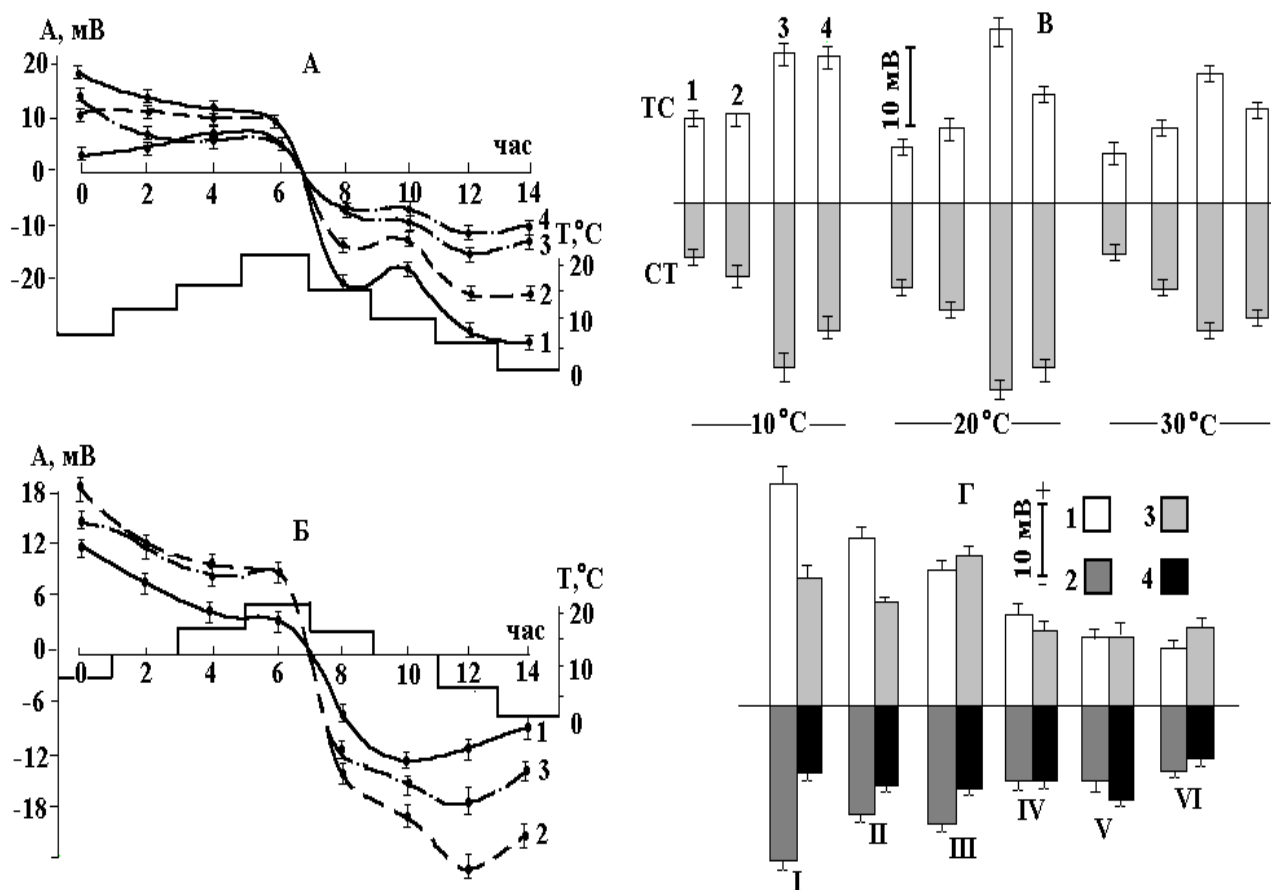


Рис. 3. Амплитуды электрической реакции средних листьев эволюционноразличающихся форм растений.

А, В – 15-дневные проростки кукурузы; Б, Г – 30-дневные проростки томатов; А, Б – температурные перепады на 5°С; В, Г – световые воздействия (ТС и СТ – включение и выключение света 5 Клк), А: 1 – культурная форма (линия ВИР44 засухоустойчивая, нехолодостойкая); 2 – культурная форма (линия F7 незасухоустойчивая, холодостойкая); 3 – предковая форма (теосинте); 4 – предковая форма (коикс), Б: 1 – дикая форма *L.hirsutum*; 2 – культурная форма (сорт Нистру), 3 – гибрид F1 (*L.hirsutum* × Нистру). В: на фоне 10 °С, 20 °С, 30 °С. 1 – коикс; 2 – теосинте; 3 – ВИР44; 4 – F7. Г: при температурной закалке проростков (+8°С в течение 6 часов), 1,2 – ТС и СТ до закалки, 3, 4 – ТС и СТ после закалки, I – культурная форма (сорт Факел); II – культурная форма (сорт Нистру), III-IV – дикие формы, соответственно *Lycopersicon esc.var.racemige*, *L.minutum* 3339, *L.hirsutum* var *glabratum*, *L.peruvianum*, *L.esc.var.pimpinellif*.

1.3.2. Электрофизиологическая оценка линий кукурузы с различной общей комбинационной способностью

При скрещивании самоопыленных линий кукурузы наблюдается гетерозис – увеличение жизнеспособности и продуктивности гибридов первого поколения по сравнению с родительскими

формами (линиями). Общая комбинационная способность (ОКС) линий определялась по величине гетерозиса во всех исследованных гибридных комбинациях с участием этих форм. Получена положительная корреляция между степенью ОКС линий кукурузы и положительными значениями БЭП колеоптилей и отчлененных листьев проростков этих линий (коэффициент корреляции $r = 0,51$). Еще выше связь ОКС с размерами (длиной) объекта ($r = 0,72$) [21].

1.3.3. Электрофизиологическая оценка маркерных форм томатов в расщепляющейся популяции

В этом опыте предпринята попытка электрофизиологической оценки эффектов экспрессии генов на организменном уровне. На 30-дневных проростках томатов с четко маркированными морфофизиологическими и биохимическими признаками, обусловленными работой конкретных генов [21], получена прямая корреляция положительных стационарных БЭП неотчлененных листьев с размерами проростков для всех объектов. Подтвержден вывод о единообразии проявления энергетического состояния объекта, задаваемого разными генетическими факторами и внешней средой. С другим параметром экспрессии генов – пигментацией листьев – получена, как и ожидалось, корреляция со значениями АЭР на свет (рис. 4).

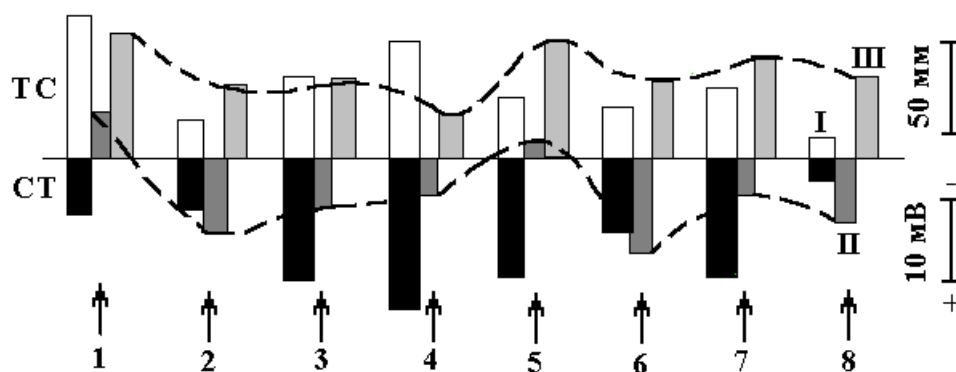


Рис. 4. Электрофизиологические и морфологические параметры 30-дневных сеянцев одно- и много-маркерных мутантных форм томатов.

I – амплитуда электрической реакции листьев на включение (ТС) и выключение (СТ) света (2 Клк), мВ; *II* – стационарные потенциалы листьев, мВ; *III* – высота сеянца, мм (с маркерными признаками генов: 1 – "a"; 2 – "a+ful"; 3 – "ful"; 4 – "e"; 5 – "a+e"; 6 – "e+hl"; 7 – "hl"; 8 – "e+ful"); a – отсутствие антоциана во всех вегетативных частях растения; ful – ярко-желтые листья, позднее становятся зелеными; e – средняя жилка листа деформирована, сегменты листа уменьшены; hl – отсутствие опушения, стебли хрупкие (по [22]).

2. Электрофизиологическая регуляция роста и развития растений

2.1. Электрофизиологическая регуляция через механизм электрофизиологической полярности

Прием основан на пропускании через растения слабого постоянного электрического тока, соизмеримого с их собственными токами и совпадающего по направлению с их осевой электрической полярностью. При этом наблюдается существенная стимуляция роста и развития растений, а также их устойчивости к экологическим стрессам [23, 24]. Функция внешнего тока заключается в поддержании исходной осевой электрической полярности растения, которая снижается под влиянием неблагоприятных факторов, и восстановлению этой полярности до уровня нормального или оптимизированного состояния. Поскольку параметры экологической факторов даже не в экстремальной обстановке не являются оптимальными (из-за чего генотип не полностью реализует свою потенциальную продуктивность), мы изучали действие тока на растения как в стрессовых, так и в обычных условиях среды [25].

В предварительных экспериментах была получена четкая импульсная реакция растения на подачу и выключение слабого постоянного тока ("минус" – на верхушке растения, "плюс" – у основания) с использованием датчиков различных физиологических процессов [25]. Для тестирования оптимальных величин подаваемого на растения тока наиболее подходящими оказались датчики БЭП и роста, с помощью которых был выбран в качестве оптимальной величины ток 1 мкА.

Первая серия опытов – электростимуляция устойчивости растений кукурузы к засолению NaCl и повышенной температуре (+45 °C). В контроле (без тока) в растения в избытке поступали ионы натрия и хлора, угнетающе действующие на рост растений, и хуже поступали микроэлементы, повышающие устойчивость растений к неблагоприятным факторам [26]. Ток ("минус" – на верхушке, "плюс" – у основания растения в течение 7 дней) ускорял поступление в растения калия, кальция и микроэлементов в 1,4 раза, одновременно резко снижая поступление стронция и натрия. Рост растений при этом ускорялся в 1,7 раза. Аналогичные результаты получены на проростках в нормальных условиях.

В последующем ток подавали на растения кукурузы (гибрид ПЗ978) в фазе цветения в течение 30 дней сразу после опыления ("минус" – на початке, "плюс" – в почве и обратный вариант). Получена существенная стимуляция роста и развития растений (увеличение вегетативной и зерновой продуктивности на 17% в "минус" – варианте) и снижение продуктивности (в "плюс" – варианте по сравнению с контролем). Шунтирование (закорачивание) электрического осевого градиента показало промежуточный результат (рис. 5, В). Стимуляционный вариант отличался резким усилением поступления в растения (например, в листья и зерно) элементов минерального питания (кроме натрия и стронция). Превышение над контролем – в несколько раз [25] (рис. 5, А,Б).

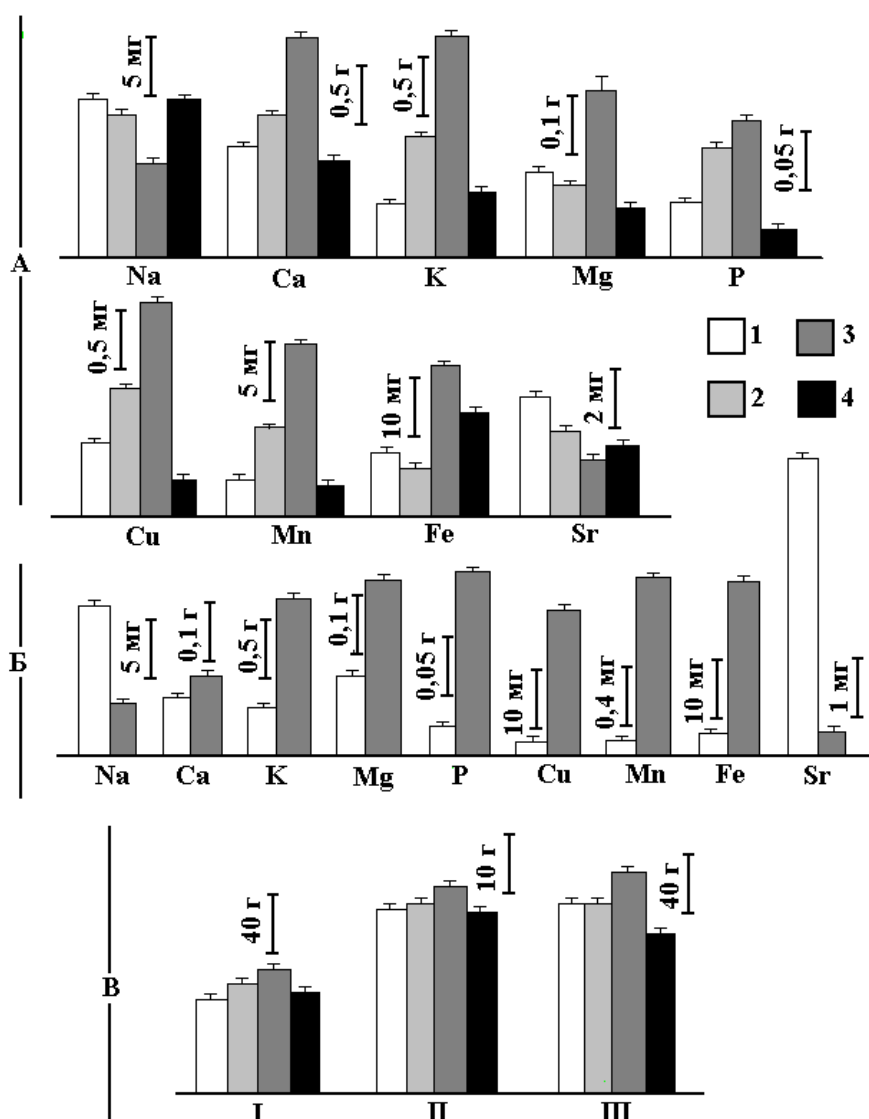


Рис. 5. Влияние слабого электрического тока (1 мкА) на содержание элементов минерального питания в листьях (А) и зерне (Б) и на продуктивность (В) растений кукурузы (гибрид ПЗ978). I – контроль (без тока); 2 – "шунт"-вариант (алюминиевая фольга от основания до верхушки растения); 3 – "минус"-вариант ("минус" на верхушке початка, "плюс" – у основания растения); 4 – "плюс"-вариант (вариант, обратный "минус"-варианту), I – сухая вегетативная масса; II – вес 1000 зерен; III – продуктивность в зерне (при 14% влажности).

В опыте в теплице на томатах стимуляционный вариант по сравнению с контролем показал увеличение общей продуктивности примерно вдвое. В "плюс" – варианте продуктивность по сравнению с контролем снизилась (в контроле, "минус" – варианте и "плюс" – варианте вес плодов на одно растение составил соответственно, в кг – $1,12 \pm 0,07$; $2,05 \pm 0,25$; $0,69 \pm 0,03$). При продолжительном действии тока "минус" – варианта (в течение 40 дней) наблюдалось увеличение общей длины растения, числа плодов с одного растения и снижение веса плодов и общей продуктивности до уровня контроля ($0,93 \pm 0,20$ г/раст) (рис. 6). По-видимому, при продолжительном токовом воздействии навязываемая растению электрическая полярность уже не соответствовала новой фазе развития организма, когда доминирующий центр аттракции веществ переместился на плоды. Вместе с тем при продолжительном вегетационном периоде, если плоды успеют набрать вес, и такой вариант может оказаться перспективным.

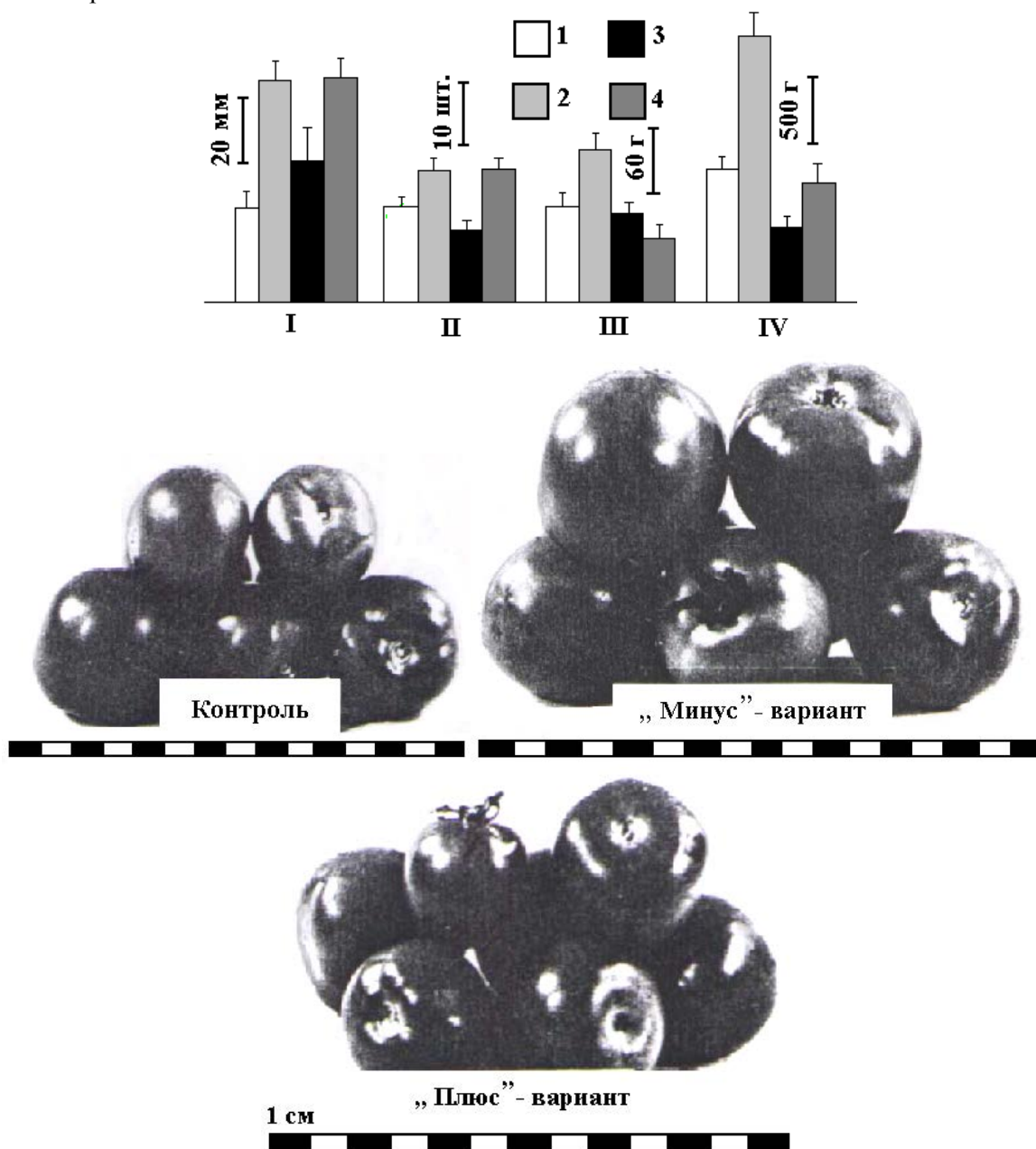


Рис. 6. Влияние слабого электрического тока (1 мкА) на рост (I) и продуктивность (II-IV) томатов (сорт Ариадна) и внешний вид плодов.

I – длина сеянцев после электрообработки в течение 15 дней; II – число плодов на 1 растение; III – вес плода; IV – общий вес плодов на 1 растение. 1 – контроль (без тока); 2 – "минус"-вариант I ("минус" на верхушке растения, "плюс" на основании в течение 15 дней); 3 – "плюс"-вариант I (обратный варианту 2); 4 – "минус"-вариант II (как вариант 2, но в течение 45 дней).

Стимуляционное действие "минус" – варианта (экспозиция – 14 дней) подтверждено на картофеле в полевых условиях, в особенности, при подаче тока только в дневное время (в контроле, в "минус" – варианте а / круглосуточно, б / только в дневное время вес клубней с одного растения составил соответственно, в г – 269 ± 116 ; 353 ± 147 ; 394 ± 150).

По нашему мнению, эффект слабого постоянного электрического тока на растениях обеспечивается по механизму электрофореза и электроосмоса. При этом, благодаря интенсивному поступлению в растения элементов минерального питания происходит стимуляция одновременно двух, зачастую полярных в естественных условиях, характеристик адаптивного потенциала культурных растений – их продуктивности и экологической устойчивости. Первая обеспечивается за счет макроэлементов, среди которых кальций играет дополнительную важную роль как фактор инициации осевой полярности у растений [27, 28], вторая – за счет микроэлементов [26].

2.2. Электрофизиологическая регуляция через механизм электрофизиологических осцилляций

Электрическое управление растениями через механизм осцилляций заключается в воздействии на электрофизиологическую систему регуляции растений внешним фактором с частотой, резонансной частоте эндогенных колебаний БЭП растения. Как отмечалось, электрический ток, подаваемый на растения в резонансе с основным электрофизиологическим осциллятором растений (циркадианный ритм биологических часов), стимулирует их продуктивность. Световой фактор был реализован на другой резонансной частоте колебаний БЭП ($0,0034$ рад/с или периоде 30 мин), которая соответствует максимуму АЭР и фотосинтеза [29, 30]. Получена стимуляция: 1 – прорастания семян кукурузы и ячменя (рис. 7, I); последнее важно в технологии солодоращения (длина колеоптилей ячменя на 5 день при периодах светового воздействия 24 ч, 300 мин, 30 мин и 3 мин составила соответственно, в мм – $3,25 \pm 0,22$; $3,46 \pm 0,18$; $5,57 \pm 0,56$ и $3,76 \pm 0,25$) [30]; 2 – роста проростков фасоли (рис. 7, II); 3 – регенерации корней фасоли и томатов в среднем для всех вариантов на 60–70% [29] (рис. 7, III).

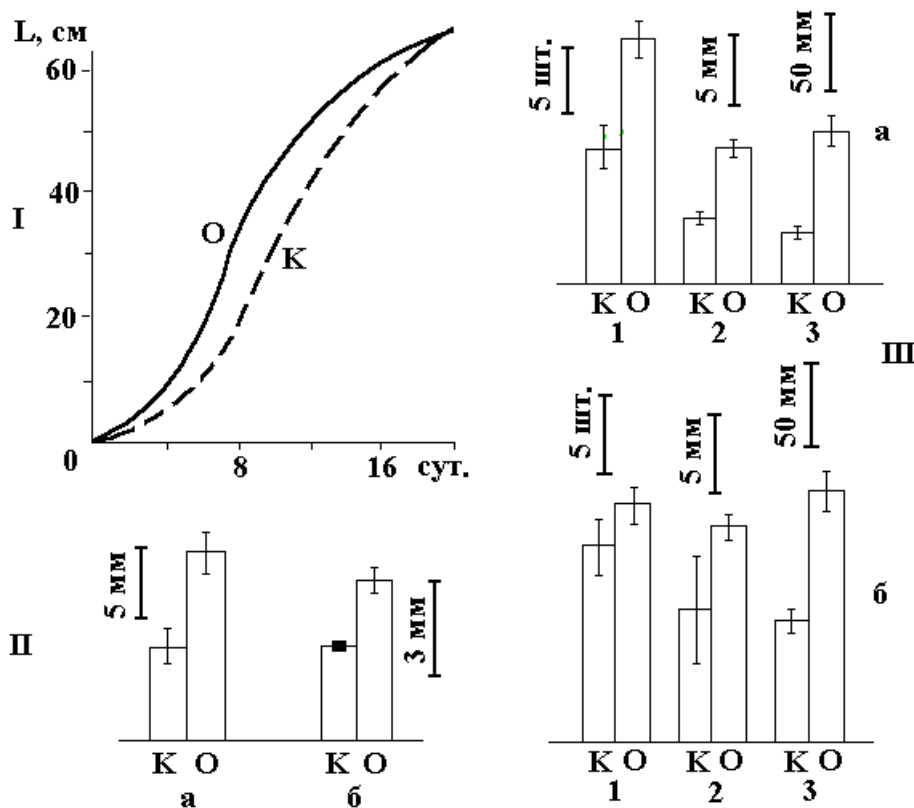


Рис. 7. Рост (I, II) и регенерация (III) растений под влиянием периодического светового воздействия на резонансной частоте эндогенных колебаний потенциалов растений (период 30 мин).

I – длина проростка фасоли; II – длина колеоптиля кукурузы (а) и ячменя (б); III – число корешков (1), длина корешка (2) и общая длина корней (3) одного растения томата (а) и фасоли (б). К – контроль; О – опыт.

3. Научная новизна исследований по проблеме

Описанная в [6, 18, 31] динамическая топография БЭП (электрическая "карта") растительного организма позволяет составить достаточно полное представление о пространственно-временной организации его поверхностных биоэлектрических потенциалов - интегральной электрофизиологической стереополярности и электрофизиологических осцилляциях. Изучены не только феномены, но и природа, механизмы и функциональная роль этих явлений. Оригинальность использованного в работе подхода заключается в том, что электрофизиологическая полярность растительного организма была рассмотрена как трехмерный феномен, а не одномерный – осевой, на что до сих пор в литературе обращается основное внимание. Показано, что и другие виды электрофизиологических полярностей (в дополнении к осевой) – билатеральная, дорсовентральная, радиальная, круговая – самоценны с точки зрения их морфогенетической роли. Поэтому методологически более правильно оперировать понятием общей полярности или стереополярности организма. Такой подход позволил выявить глубокую и специфическую связь биоэлектрогенеза организма с его структурой (архитектоникой), а также с природой фактора воздействия. Это дало возможность обнаружить новые элементы электрофизиологической стереополярности и вскрыть их механизмы, а также объяснило наличие в растении двух типов стереополярности, которая формируется двумя стереоспецифическими системами генерации и проведения электрического возбуждения. Все варианты "электрофизиологической архитектуры" растений удалось приурочить к двум геометрически контрастным структурам объекта – плоской и полый и "привязать" их дополнительно к фундаментальной проблеме структурно-функциональной диссимметрии растений (левизна-правизне).

Использованный подход усилил эвристическое значение исследований как диссимметрии, так и биоэлектрогенеза, в частности, способствовал идентификации геометрии, точнее стереометрии энерго-информационного канала у растений (на примере прорастающих семян показана левоспиральность и правоспиральность их биоэлектрических полей).

Кроме того, феномен электрофизиологической стереополярности при разных вариантах ее индукции позволяет говорить о матричном принципе ее формирования, а ее структуросозидающее (морфогенетическое) значение – о ее функции как некоего энерго-информационного "образа" растения.

Дополнение стационарной электрической карты растения ее кинетическим аспектом – электрофизиологическими осцилляциями – привело к развитию представления о растении как ансамбле нелинейных связанных между собой осцилляторов. Удалось частично идентифицировать спектр таких осцилляторов по критерию резонансной частоты колебаний биопотенциала, индуцированных внешним фактором.

С этих позиций постулируется, что свойственное растению состояние постоянного возбуждения, по-видимому, обеспечивается его постоянной осцилляторной активностью – эндогенной или вынужденной, а наблюдаемая в эксперименте стационарность потенциала у растений в нормальных условиях является результатом суперпозиции элементарных электрофизиологических осцилляторов.

При такой интерпретации пространственную организацию биопотенциалов растительного организма можно тесно увязать с его временной организацией.

Использованный подход к целому растению как системе осцилляторов оказался перспективным и для ценотического уровня, где осцилляторами являются растения, входящие в ценоз. Разработанные представления позволяют по новому подойти к решению сложного вопроса конкурентоспособности растений и оценить ее по степени синхронизации динамических (электрофизиологических и морфофизиологических) параметров растений ценоза.

Поскольку эндогенная ритмика потенциалов растений запрограммирована генетически, по-видимому, необходимо функцию генов, ответственных за какой-либо признак или признаки, рассматривать с точки зрения работы электрофизиологического осциллятора с определенным набором частот или структурный ген одновременно представлять и как своеобразный "волновой" ген, что согласуется с гипотезой волновой функции генной активности [32-34].

Динамизм растительного биоэлектрогенеза – следствие функционирования электрофизических систем (медленной и быстрой) регуляции организма и передачи информации между организмами [31]. Эти системы впервые идентифицированы в "чистом" виде – без примеси водно-ионного потока, считавшегося до сих пор неперменной компонентой электрического сигнала. Медленная система реализуется через квазистационарное биоэлектрическое поле, быстрая – через переменное биоэлектрическое поле. Регистрируемые при этом потенциалы (стационарные, действия, вариационные, градуальные) – скаляры указанных полей.

Получены новые факты, расширяющие представления о функциональных возможностях электрофизиологической регуляции: показана их причастность к важнейшей для жизнедеятельности растений проблеме связи процессов углеродного и минерального питания, к индикации неспецифического фактора – γ -излучения.

Впервые показан экспериментально еще один путь осуществления надежного взаимодействия между пространственно разобченными частями растения и фитоценоза – посредством распространяющихся эндогенных и вынужденных колебаний биопотенциалов. Синхронность колебаний по всей линии связи – от передатчика до приемника – свидетельствует о чрезвычайно высокой скорости передачи информации между ними. Кроме того, согласно теории колебаний, между взаимодействующими осцилляторами происходит и обмен энергией.

Состояние тотального синхронного электрического возбуждения растения, индуцированного локальным внешним фактором, ковариантно электрическому состоянию растения в нормальных условиях, определяемому работой "биологических часов". С такой точки зрения обобщенное биоэлектрическое поле растения (и ценоза) играет роль мгновенного синхронизатора событий, о чем еще в 1953 году высказали смелую догадку Розен и Лунд [35].

В свете вышеизложенного становится обоснованной правомочность использования стационарных потенциалов для тестирования ростовой активности и продуктивности растений, а также для тестирования экологической устойчивости растений. Становится также логически оправданным прием электрического управления адаптивным потенциалом растений путем имитации, коррекции и оптимизации их электрофизиологических параметров.

Резюмируя, можно сказать, что становление, поддержание и совершенствование пространственно-временной организации поверхностных биоэлектрических потенциалов растительного организма обеспечивается за счет электрофизиологических систем регуляции, осуществляющих в организме функции передачи вещества, энергии и информации, в том числе и о стереоспецифической структуре растительного организма.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Маслоброд С.Н.* Электрофизиологическая полярность растений. Кишинев, 1973.
2. *Маслоброд С.Н., Лысиков В.Н., Духовный А.И., Олоер Ф.Г.* Электрофизиология кукурузы. Кишинев, 1978.
3. *Опритов В.А., Пятыгин С.С., Ретивин В.Г.* Биоэлектрогенез у высших растений. М., 1991.
4. *Протасов В.В., Сердюк О.А.* Биолетрические поля: источники, характер, назначение // Успехи современной биологии. 1982. Т.93. В. 12. С. 270–286.
5. *Жученко А.А.* Адаптивный потенциал культурных растений (экологические основы). Кишинев, 1988.
6. *Маслоброд С.Н.* Пространственно-временная организация поверхностных биоэлектрических потенциалов растительного организма. I. Электрофизиологическая стереополярность растительного организма // Электронная обработка материалов. 1999. № 6. С. 49–64.
7. Предпосевное γ -облучение семян сельскохозяйственных растений. Под ред. *А.И. Кузина, Д.А. Каушанского*. М., 1974.
8. *Краснобаев Е.Н., Маслоброд С.Н.* Влияние диссимметрии семян кукурузы на характер дозовой кривой выхода γ -индуцированных свободных радикалов // Радиобиология. 1979. Т. 19. № 3. С. 451–455.
9. *Девятков Н.Д., Лысиков В.Н., Маслоброд С.Н., Макеева Н.С., Боярских Г.В.* Исследование лазерного излучения как фактора, изменяющего электрическое состояние растений. В сб: Проблемы фотоэнергетики растений. Кишинев, 1975. В. 3. С. 142–158.
10. *Балденкова С.И., Маслоброд С.Н., Мустафаев Т.Г.* Оценка линий кукурузы с различной жаростойкостью по биоэлектрической реакции проростков // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 1989. В. 5. С. 88–95.
11. *Генкель П.А.* Физиология жаро- и засухоустойчивости растений. М., 1982.
12. *Гунар И.И., Паничкин Л.А., Маслов А.П.* Биоэлектрическая ответная реакция проростков кукурузы // ДАН СССР. 1990. Т. 195. С. 186–188.
13. *Тхаканов А.К.* Зависимость биоэлектрических потенциалов от понижающейся температуры корней // Физиология растений. 1972. Т. 19. № 6. С. 1211–1214.

14. *Маслоброд С.Н., Пирожок Е.Ф., Лыиков В.Н.* Электрофизиологическая характеристика линий и гибридов кукурузы с различной холодостойкостью // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 1989. В. 4. С. 76–86.
15. *Шабала С.Н., Маслоброд С.Н.* Экспресс-методы оценки устойчивости растений на загущение // Кукуруза и сорго. 1991. № 5. С. 32–34.
16. *Шабала С.Н., Маслоброд С.Н.* Некоторые биофизические особенности функционирования фитоценоза. В сб: Биоэлектрогенез и транспортные процессы у растений. Нижний Новгород, 1991. С. 58–65.
17. *Маслоброд С.Н.* Динамика формирования функциональной и структурной целостности фитоценоза (на примере группы проростков кукурузы). В сб: Lucrarilor congresului al VII-lea (Jubilar) a Societatii stiintifice a geneticienilor din Republica Moldova. 1988. P. 96–98.
18. *Маслоброд С.Н.* Пространственно-временная организация поверхностных биоэлектрических потенциалов растительного организма. II. Электрофизиологическая ритмическая активность растительного организма // Электронная обработка материалов. 1999. № 6. С. 49–64.
19. *Кузнецова И.И., Маслоброд С.Н., Кравченко А.Н.* Сравнительное изучение электрической реакции проростков некоторых форм кукурузы и томатов при температурном воздействии // Известия АН МССР, серия биол. и хим. наук. 1984. № 6. С. 68–70.
20. *Маслоброд С.Н., Кузнецова И.И., Пирожок Е.Ф., Балденкова С.И.* Оценка стрессоустойчивости генотипов кукурузы и томатов с помощью динамических параметров целого растения. В сб: Применение проблемно-ориентированных информационно-измерительных комплексов в эколого-генетических исследованиях. Кишинев, 1986. С. 19–21.
21. *Маслоброд С.Н., Беженарь Я.В., Присяжная В.Г.* Электрофизиологическое изучение мутантов кукурузы с различной комбинационной способностью. В сб: Количественные признаки мутантов кукурузы. Кишинев, 1975. С. 3–6.
22. *Бочарникова Н.И., Козлова В.М.* Мутантные формы томатов: каталог. Кишинев, 1992.
23. *Каменская К.И., Третьяков Н.Н., Шогенов Ю.Х., Третьяков Н.Н.* Функциональная роль градиентов потенциалов в растениях. В сб: Электрофизиологические методы в изучении функционального состояния растений. М., 1988. С. 3–14.
24. *Каменская К.И., Третьяков Н.Н., Шогенов Ю.Х.* О роли биоэлектрической полярности в жизнедеятельности растений кукурузы в условиях гипорапитации // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 1986. В. 6. С. 118–121.
25. *Мустафаев Т.Г., Маслоброд С.Н., Воронцов В.И., Боагэ М.И., Бочарникова Н.И.* Слабый электрический ток как фактор стимуляции процессов минерального питания и роста растения // Физиология и биохимия культурных растений. 1991. Т. 23. № 6. С. 534–542.
26. Микроэлементы. Поступление, транспорт, физиологические функции в растениях. Киев, 1987.
27. *Медведев С.С.* Физиологические основы полярности растений. Санкт-Петербург, 1996.
28. *Медведев С.С.* Электрофизиология растений. Санкт-Петербург, 1998.
29. *Шабала С.Н., Маслоброд С.Н.* Частотные характеристики вынужденных колебаний биопотенциалов растений. В сб: Биоэлектрогенез и мембранный транспорт у растений. Горький, 1989. С. 78–83.
30. *Шабала С.Н., Маслоброд С.Н., Жакотэ А.Г.* Влияние периодического светового воздействия на резонансной частоте колебаний биопотенциалов на рост и развитие растений // Физиология и биохимия культурных растений. 1989. Т. 21. № 1. С. 27–31.
31. *Маслоброд С.Н.* Пространственно-временная организация поверхностных биоэлектрических потенциалов растительного организма. III. Системы электрофизиологической регуляции // Электронная обработка материалов. 2000. № 2. С. 56–67.
32. *Чиркова Э.Н.* Волновая природа регуляции генной активности. Живая клетка как фотонная вычислительная машина // Успехи современной биологии. 1994. Т. 114. № 6. С. 659–678.
33. *Гаряев П.П.* Волновой генетический код. М., 1997.
34. *Гаряев П.П.* Волновой геном. М., 1994.
35. *Rosene H.F., Lund E.L.* In: Growth and Differentiation in Plant, Ames Iowa. 1953. P. 219–250.

Поступила 05.09.1999

Summary

The present work concludes the study on the electric map of the plant organism in ontogenesis. The applied portion comprised the development electrophysiologic techniques of traits (tomato marker forms), total combining capacity (maize stocks) thermoresistance (maize stocks and hybrids), unspecific ecological resistance (wild, ancestor and cultivated forms of tomato and maize) competing capacity (maize stocks and hybrids). The electrophysiologic express-methods of stimulation modes of presowing treatment of farm plant seeds by physical factors (γ and laser irradiation) are elaborated. The effects of the stimulation of plant growth, development and productivity when a weak electrical current is allowed to pass through the plants according to their native and optimized electrophysiologic polarity, as well as when the plants are exposed to outer periodic factors at the resonancing frequency of the endogenic oscillations of plant bioelectric potentials, have been discovered. The results presented in previous papers regarding the problems of the plant electric map (I-III) are generalised. The identification of the energy-information canal geometry, the evidence of the constant electric activity presence, the matrix principle of the electrophysiologic stereopolarity formation, the presentation of the plant electric map as its energy-information "image" transmitted to a distance and the electrophysiologic oscillator as a "wave gene", the capacity of electric signals to transmit the information about the stereospecific structure of the objects and their other problems have been underlined among the key ones.

И.О. Растимешина

УСТОЙЧИВОСТЬ *STREPTOMYCES CANOSUS* 71 К ВОЗДЕЙСТВИЮ КОМБИНИРОВАННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

*Институт микробиологии АН Молдовы,
ул. Академией, 1, Кишинев, Молдова, MD – 2028*

Введение

В последнее время ведется широкий поиск физических и химических факторов, усиливающих реакцию клеток на облучение ионизирующей радиацией [1–3]. Исследование закономерностей модификации радиобиологических реакций важно и в теоретическом аспекте при интерпретации полученных данных и выявлении первичных механизмов действия [4].

Для получения любого типа мутаций необходимо подобрать оптимальную дозу излучения, дающую высокий процент выхода мутантов при относительно высокой выживаемости облучаемого организма. Необходимость выбора оптимальной дозы требует предварительного анализа летального и мутагенного действия излучений. При этом установление зависимости выживаемости и частоты мутаций от дозы излучений дает ценную информацию об организации генетического аппарата клетки, характере действия мутагена и работе репарационной системы клетки [5].

Анализ радиочувствительности бактерий представляет интерес не только потому, что позволяет объяснить механизмы потери или приобретения устойчивости к действию радиации, но и потому, что на его основе могут быть сделаны определенные выводы относительно общности и различий в механизмах действия ультрафиолетовой (УФ) и проникающей радиации [6, 7].

Целью данной работы было изучение устойчивости стрептомицета *Streptomyces canosus* 71 к γ - и УФ- облучению, а также к комбинированному воздействию этих факторов.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлся стрептомицет *Streptomyces canosus 71* из Национальной коллекции микроорганизмов АН Молдова.

В качестве мутагенных факторов использовали γ - и УФ-лучи. γ -облучение проводилось в Институте генетики АН Молдовы на радиационно-химической установке РХМ- γ -20 с активностью 12750 Кюри и мощностью 0,67 Гр/с. Источником γ -лучей являлся радиоактивный Co^{60} . Дозы γ -облучения составляли 200, 400, 600, 800 и 1000 Гр.

Обработку культуры ультрафиолетовым излучением проводили на установке, дающей УФ-лучи с длиной волны 260 нм, в дозах 300, 900, 1800, 3600, 5400 и 7200 эрг/мм².

Для проведения комбинированного облучения были выбраны две дозы γ -излучения (800 и 1000 Гр) и три дозы УФ-излучения (1800, 3600 и 5400 эрг/мм²). Исследуемую культуру обрабатывали γ -, а затем УФ-лучами в указанных дозах.

Облучению подвергали водную суспензию воздушных спор стрептомицета, которую готовили по методике Кузнецова [8]. После облучения суспензию рассеивали на плотную среду Чапека с глюкозой и на 7–10 сутки учитывали выживаемость и морфологическую изменчивость.

Выживаемость спор определяли визуально путем подсчета относительного числа колоний, образованных выжившими после обработки спорами. Мутагенный эффект облучения определяли по появлению морфологических мутаций.

Результаты исследований и обсуждение.

В результате изучения морфологической изменчивости *Streptomyces canosus 71* на среде Чапека с глюкозой обнаружено 3 типа колоний: I – круглые, $d = 4–5$ мм, воздушный мицелий белый, в центре аспорогенный кратер (1,5–2 мм), II – круглые, $d = 2,5–3$ мм, воздушный мицелий белый, в центре выпуклые, III – карликовые, $d = 0,5–1$ мм. Вариант I преобладал в популяции (69,77–78,2%).

Использование мутагенных факторов привело к увеличению количества морфологически измененных вариантов и появлению новых форм. После обработки спор стрептомицета γ - и УФ-лучами в популяции было выявлено 12 типов колоний, различающихся размером, формой, цветом воздушного мицелия и степенью его образования. Применяя классификацию и терминологию Кузнецова [9], их можно сгруппировать в 4 варианта и 8 подтипов варианта IV (альтерколерного).

Результаты исследований показывают, что при сочетании действий двух факторов (γ - и УФ-лучей) частота морфологически измененных форм возрастает по сравнению с частотой этих форм, возникших от действия одних только УФ- или γ -лучей. Так, после γ - облучения у *S. canosus 71* было выявлено 8, а после УФ- облучения – 7 типов колоний. В результате комбинированного облучения были получены 10 типов колоний, 4 из которых ранее не встречались; тогда как колонии VII и VIII типов, появившиеся после обработки штамма γ - и УФ-лучами в отдельности, не были обнаружены в популяции стрептомицета после комбинированного воздействия этих факторов.

Обычно частота морфологических мутаций, индуцируемая только УФ-лучами, достигнув пика на определенном уровне гибели спор, начинает падать [10]. Этот же эффект наблюдался в наших опытах и для γ -облучения (рис. 1). Однако при сочетании действий γ - и УФ-лучей частота морфологически измененных форм не только не падает, но и намного превосходит частоту мутаций, вызванную одними лишь УФ-лучами (рис. 2), что согласуется с литературными данными, полученными для комбинации УФ-лучей и химических мутагенов [11]. Нашими исследованиями было обнаружено, что при используемых дозах γ -излучения от 200 до 1000 Гр зависимость выживаемости спор *S. canosus 71* от дозы выражена в форме сигмоидной кривой, которая может быть интерпретирована как многоударная, то есть гибель клетки вызвана поражением нескольких чувствительных участков, либо существует некоторая гетерогенность по радиочувствительности в популяции клеток (рис. 3). Сходный результат был получен при обработке данной культуры высокими дозами γ - излучения [14].

Было обнаружено, что при используемых дозах УФ-облучения до 7200 эрг/мм² зависимость гибели клеток от дозы носит экспоненциальный характер. Как видно из рис. 4,а, выживаемость штамма довольно низкая при малых дозах облучения.

Изучение летального эффекта комбинированного облучения показало, что гибель спор изучаемого штамма при сочетании действий γ - и УФ-лучей возрастает по сравнению с гибелью спор при воздействии одного лишь УФ- излучения (рис. 4,б). При сочетании УФ- облучения с γ -облучением в дозе 1000 Гр отмечено более резкое убывание количества выживших клеток *S. canosus 71*, чем для дозы 800 Гр.

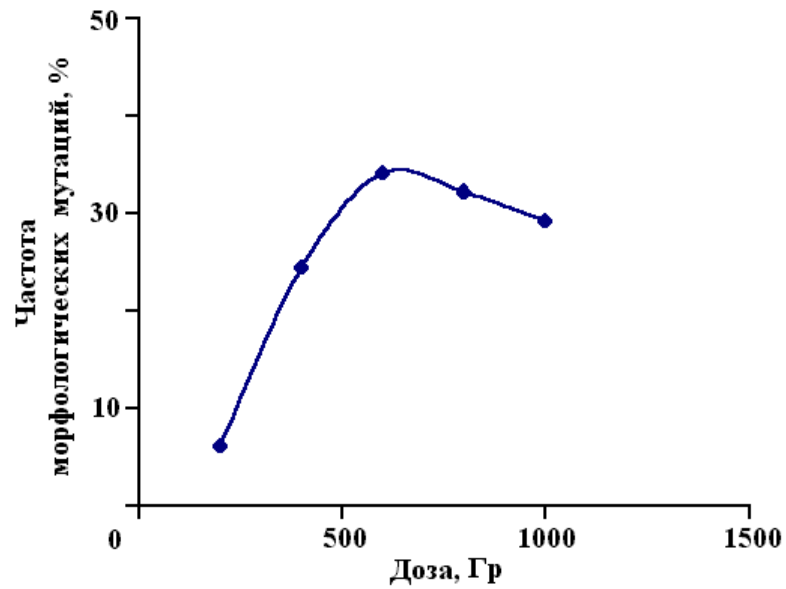


Рис. 1. Зависимость частоты морфологических мутаций в клетках *S. canosus* 71 от дозы γ -облучения.

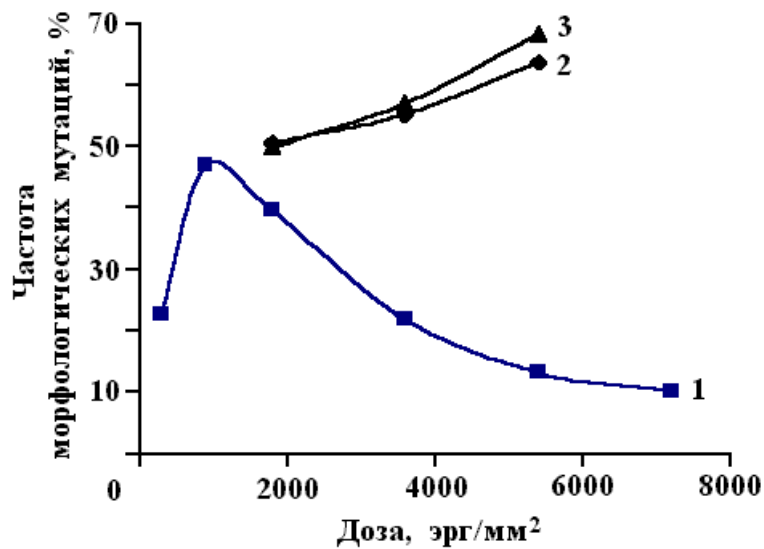
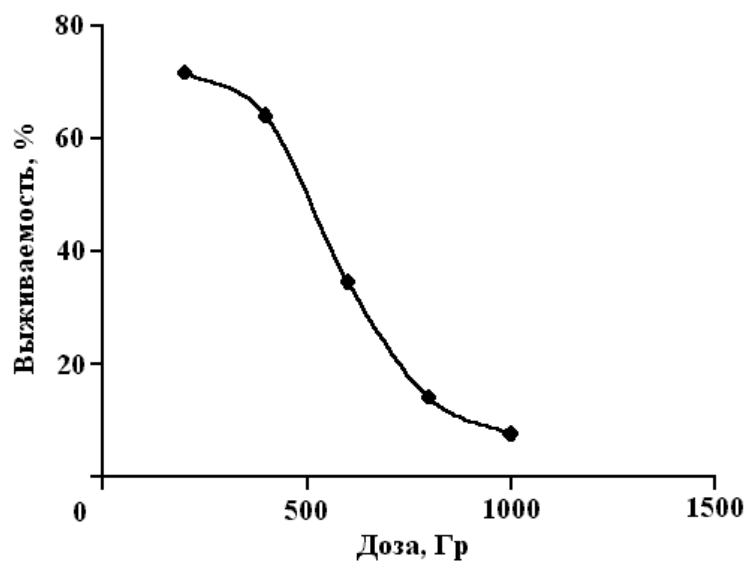


Рис. 2. Зависимость частоты морфологических мутаций в клетках *S. canosus* 71 от характера и дозы облучения. 1 – УФ-лучи; 2 – γ - (в дозе 800 Гр) + УФ-лучи; 3 – γ - (в дозе 1000 Гр) + УФ-лучи.



а

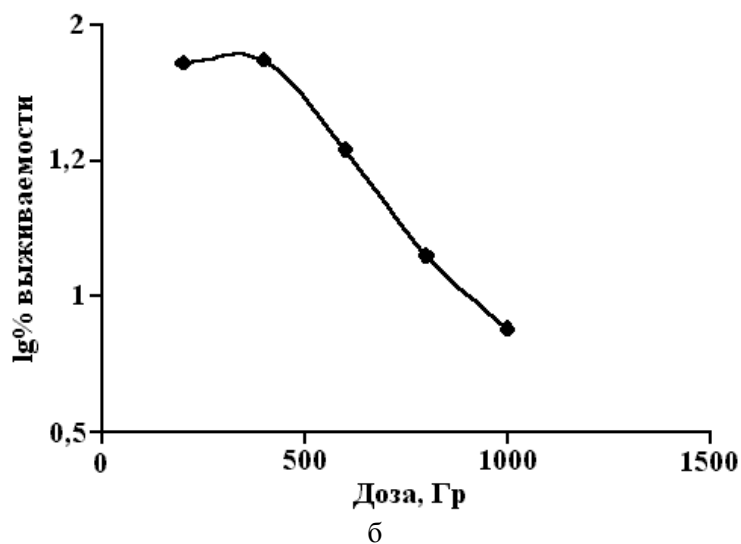


Рис. 3. Зависимость выживаемости (а) и логарифма выживаемости (б) спор *S. canosus* 71 от дозы γ -облучения.

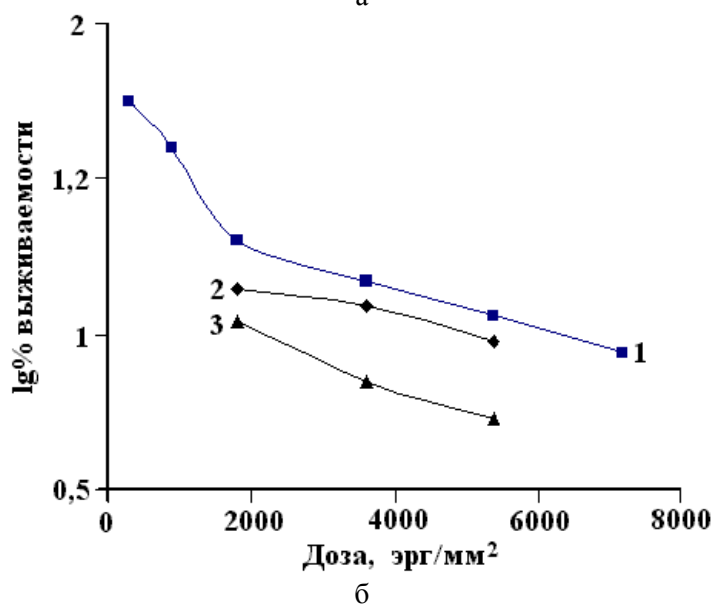
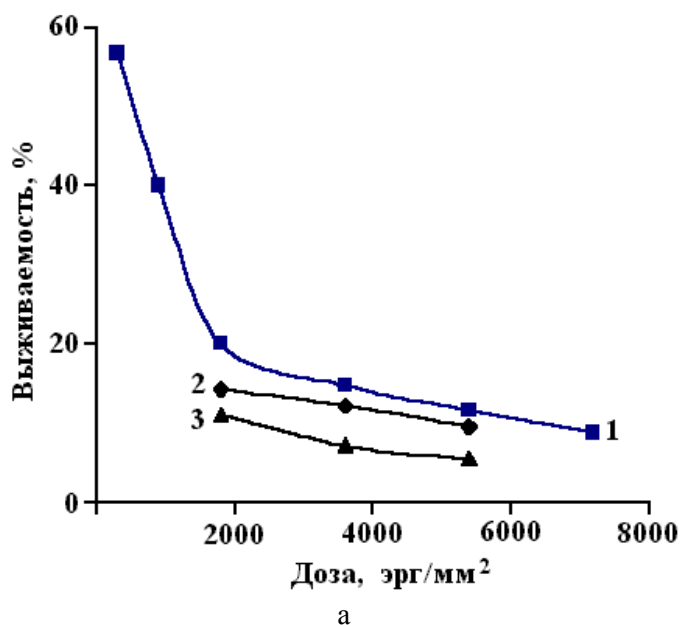


Рис. 4. Зависимость выживаемости (а) и логарифма выживаемости (б) спор *S. canosus* 71 от характера и дозы облучения. 1 – УФ-лучи; 2 – γ - (в дозе 800 Гр) + УФ-лучи; 3 – γ - (1000 Гр) + УФ-лучи.

Известно, что по кривой выживаемости можно оценить дозы, вызывающие гибель любой доли клеток [15]. Данные по выживаемости спор стрептомицета были обработаны при помощи пробит-анализа, в результате были получены значения для летальных доз – LD₁₀, LD₃₇, LD₅₀, LD₉₀.

Из таблицы видно, что при комбинированном воздействии γ - и УФ-лучей на споры стрептомицета летальные дозы обнаруживаются на более низких уровнях облучения. Так, средняя летальная доза LD₃₇ составляет 244,9 эрг/мм², 33,1 эрг/мм² и 24,5 эрг/мм² для УФ-лучей и комбинированного воздействия соответственно. На уровне LD₁₀ различие между летальными дозами значительно, так, величина LD₁₀ для УФ-облучения в 19–22 раза превосходит эту величину для комбинированного облучения. На уровне LD₉₀ величина летальной дозы УФ-облучения превышает таковую для комбинированного воздействия лишь в 1,7–3,1 раза.

Летальные дозы радиации у Streptomyces canosus 71 при γ -, УФ-облучении и комбинированном воздействии

Летальные дозы	Тип облучения			
	γ -облучение, Гр	УФ-облучение, эрг/мм ²	Комбинированное воздействие	
			УФ (эрг/мм ²)+ + γ (800 Гр)	УФ (эрг/мм ²)+ + γ (1000 Гр)
LD ₁₀	245,5	34,7	1,8	1,5
LD ₃₇	407,4	244,9	33,1	24,5
LD ₅₀	467,7	457,1	83,2	56,2
LD ₉₀	901,6	6456,5	3715,4	2187,8

Таким образом, была изучена устойчивость штамма *Streptomyces canosus 71* к воздействию γ -, УФ- и комбинированного облучения. Обнаружено увеличение мутабельности штамма по морфологическим признакам, а также снижение уровня выживаемости стрептомицета под действием комбинированного облучения, по сравнению с γ - и УФ-облучением в отдельности. Различия в летальном действии УФ-лучей в отдельности и в сочетании с γ -лучами относительно штамма *S. canosus 71* резко проявляются в диапазоне низких доз и гораздо менее – при высоких дозах облучения.

Автор выражает благодарность сотруднику Института генетики, к.б.н. И.М. Романовой и сотруднику МолдГУ, к. б. н. М.И. Караману за содействие в проведении эксперимента, а также сотруднику Института микробиологии, к. б. н. С.А. Бурцевой за помощь в подготовке статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жураковская Г.А., Петин В.Г. Влияние мощности дозы на синергизм комбинированного действия ионизирующего излучения и гипертермии // Радиобиология. 1987. Т. 27. Вып. 4. С. 487–492.
2. Юров С.С., Шелкаева Н.В. К вопросу о механизмах синергизма при действии на биологические объекты-радиации и химических веществ // Проблема синергизма в радиобиологии. Мат. всесоюз. конф. Пущино, 1990. С. 53–62.
3. Кару Т.Й., Пятибрат Л.В., Календо Г.С. Влияние излучения He-Ne лазера на выживаемость клеток *HeLa*, подвергнутых действию ионизирующей радиации // Радиобиология. 1992. Т. 32. Вып. 2. С. 202–206.
4. Комаров В.П., Петин В.Г., Скворцов В.Г. Роль последовательности воздействия ультразвука и ионизирующей радиации на выживаемость дрожжевых клеток // Радиобиология. 1981. Т. XXI. Вып. 1. С. 9–13.
5. Ладыгин В.Г., Ладыгина О.Н. Летальное и мутагенное действие γ -излучения на клетки двойных пигментных и нефотосинтезирующих мутантов *Chlamydomonas reinhardtii* // Радиобиология. 1985. Т. XXV. Вып. 2. С. 267–270.

6. Скавронская А.Г. Мутации у бактерий. М., 1967. С. 120–188.
7. Никитин Д.И., Таштемирова М.А., Питрюк И.А., Сорокин В.В., Оранская М.С., Никитин Л.Е. Высокая устойчивость к ионизирующей радиации некоторых олиготрофных бактерий // Микробиология. 1993. Т. 62. Вып. 6. С. 1064–1071.
8. Кузнецов В.Д. Спонтанная изменчивость актиномицетов – продуцентов антибиотиков и стабилизация их биосинтетической активности и таксономических свойств. Автореф. дис. М., 1975.
9. Дриняев В.А., Стерлина Т.С., Березкина Н.Е. и др. Авермектины: естественная изменчивость штамма-продуцента *Streptomyces avermitilis* ВКМ Ас 1301 // Биотехнология. 1993. № 11–12. С. 21–25.
10. Захаров И.А., Кривиский А.С. Радиационная генетика микроорганизмов. М., 1972. С. 150–153.
11. Алиханян С.И. Селекция промышленных микроорганизмов. М., 1968. С. 201–205.
12. Сборник методик по генетике микроорганизмов. М., 1970. С. 20–25.
13. Кудряшов Ю.Б., Беренфельд Б.С. Основы радиационной биофизики. М., 1982. С. 45–56.
14. Растимешина И.О., Рудик В.Ф., Бурцева С.А. Изменение физиолого-биохимических свойств *Streptomyces canosus* 71 под воздействием γ -излучения // Анналы МолдГУ, Кишинев, 1997. С. 127–129.
15. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М., 1985. С. 313–316.

Поступила 16.02.2000

Summary

The resistance of *Streptomyces canosus* 71 against γ -, UV- and combined radiation was studied. Under the combined irradiation the frequency of morphological mutations rose strongly as compared with frequency of morphologically changed forms caused by the γ - and UV- rays. The cell death of *S. canosus* 71 caused by the combined irradiation also increased. Under the influence of combined irradiation the lethal doses were discovered on much lower levels of radiation.

Ф.И. Кукоз*, С.В. Кирсанов**, В.А. Зибров**

УСТАНОВКА СЕЛЕКТИВНОГО ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ СЛОЖНО-ПРОФИЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

** Южно-Российский Государственный технический университет (НПИ),
ул. Просвещения, 147, г. Новочеркасск, 346500, Ростовская область, Россия*

*** Южно-Российский Государственный технический университет экономики и сервиса,
ул. Шевченко, 147, г. Шахты, 346500, Ростовская область, Россия*

В настоящее время интенсивно развиваются две разновидности электрохимического осаждения металлов и их сплавов [1]:

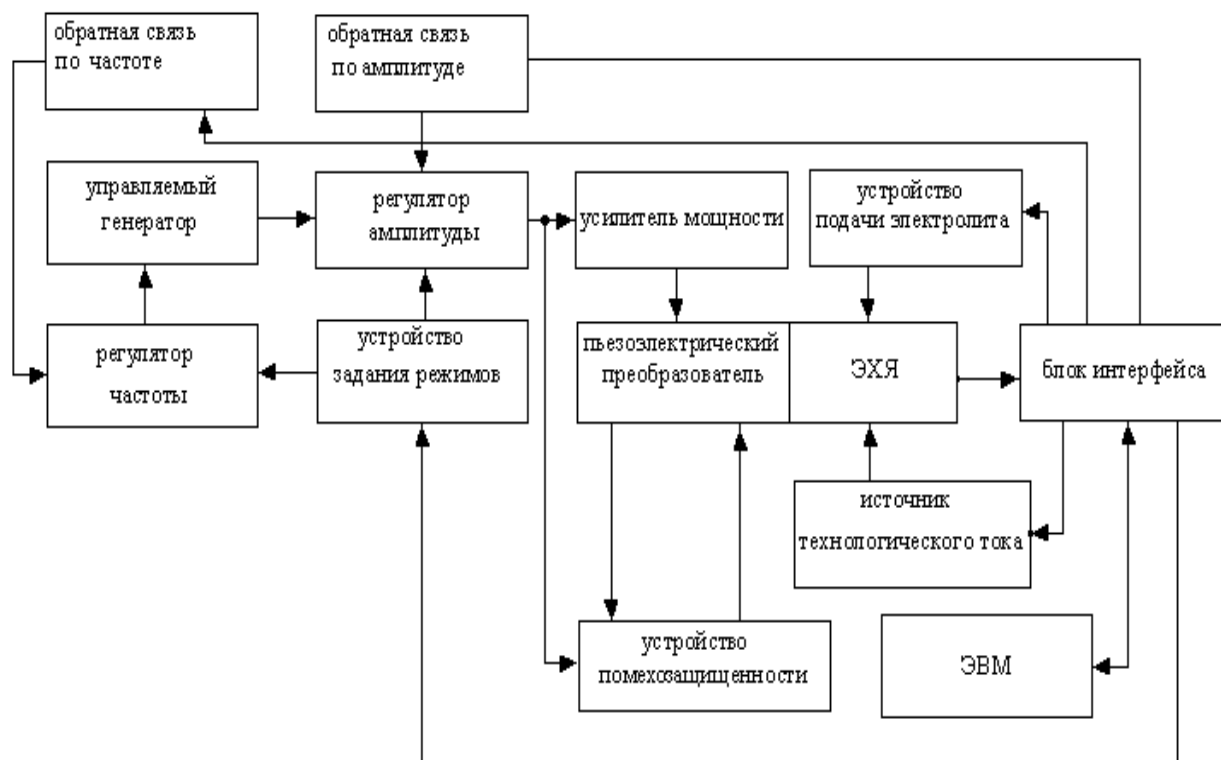
- методы струйного электрохимического наращивания металлов, основанные на интенсивной прокатке электролита и ведении процесса при плотностях тока 100-400 А/дм²;
- методы электролитического натирания покрытий, основанные на скоростном осаждении металлического покрытия в локальной гальванической системе – контактном электрически нейтральном взаимодействии тампона анодной головки и обрабатываемой поверхности с интенсивным обновлением электролита.

Эти разновидности электроосаждения металлов одновременно существенно расширяют возможности электрохимической размерной обработки (ЭХРО) деталей машин и приборов, позволяют полнее охватить технологические возможности процесса электролиза, используя в одних случаях анодные процессы при съеме металла ЭХРО, а в других случаях катодные процессы при осаждении металла. Основными выходными параметрами технологического процесса селективного электроосаждения являются: твердость покрытия, прочность сцепления покрытия с подложкой, структура и толщина покрытия, точность и производительность процесса селективного электроосаждения. При этом контролируемые параметрами являются: плотность тока, температура, химический состав и кислотность электролита, концентрация различных газов, и пр., которые сопутствуют процессу и определяют его экологические особенности. Непрерывный контроль данных параметров в процессе обработки и электроосаждения весьма затруднен, чем и объясняется в настоящее время низкая степень управления этой технологической операцией.

Обычно необходимые входные воздействия подбирают экспериментально по требуемым значениям выходных параметров. Управление входными воздействиями на электрохимическую ячейку (ЭХЯ) осуществляется в настоящее время по разомкнутому циклу, что приводит к дрейфу выходных параметров в процессе электролиза и, в конечном счете, может привести к неповторяемости процесса при его реализации на другой установке. Отсутствие контроля за текущими параметрами, доступными измерению в ходе эксперимента, часто не позволяют исследовать его динамику и сформировать закон управления процессом, близкий к оптимальному. Поэтому возникает необходимость использования многофункциональных преобразователей, позволяющих контролировать и управлять выходными параметрами в ходе процесса размерной электрохимической обработки и селективного электроосаждения сложнопрофильных изделий.

В статье описывается установка селективного электроосаждения и размерного электрохимического формообразования сложнопрофильных изделий с использованием свойств многофункционального пьезоэлектрического преобразователя.

На рисунке приведена структурная схема установки селективного электроосаждения и электрохимического формообразования (СЭ и ЭХФО) сложно-профильных изделий с использованием многофункциональных свойств пьезоэлектрического преобразователя.



Структурная схема установки СЭ и ЭХФО сложно-профильных изделий.

В установке ЭВМ формирует задающие сигналы, обрабатывает измерительную информацию и реализует программы управления приводом электрода – инструмента. Задание программы по частоте и амплитуде происходит от ЭВМ через устройство задания режимов (УЗР), позволяющее также выполнять ручную установку требуемых величин. Сигналы с УЗР поступают на регулятор частоты и амплитуды. Стабилизация резонансного и амплитудного режимов осуществляется с помощью цепей обратной связи по частоте и амплитуде. Блок интерфейса включает в себя коммутатор, аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи.

Электрод-инструмент состоит из диэлектрического корпуса и активного слоя (графит, металл, и т.п.), к которому посредством проводника подводится положительный полюс источника тока. По наружному диаметру электрода располагается полимерный слой, являющийся источником макро-радикалов. Источник макро-радикалов (диэлектрический слой) выступает над поверхностью активного слоя на величину межэлектродного зазора. Активный и полимерный слой контактирует с рабочей поверхностью сложно-профильного изделия.

При электролитическом натирании слой из полиметилметакрилата (ПММА) фрикционно контактирует с обрабатываемой поверхностью. В результате этого под действием механических напряжений происходит механодеструкция полиметилметакрилата. Образующиеся реакционно-способные макро-радикалы адсорбируются на обработанной поверхности и препятствуют процессу электролитического наращивания покрытия на обработанной поверхности за пределами активной зоны электролитического натирания при низкой плотности тока или исключают осаждение. Это обеспечивает обработку при постоянной плотности тока и, как следствие, высокую точность, класс шероховатости и однородность рельефа поверхности.

Пьезоэлектрический преобразователь регистрирует силу инерции электрода-инструмента, колеблющегося при воздействии импульсного напряжения, подаваемого в ЭХЯ. В этих условиях уравновешивающей силой является реакция электрода-инструмента на стремление его поверхностного слоя сократиться в размерах. С утолщением электрода-инструмента уменьшается его деформация, а также увеличивается его масса, что частично компенсирует убыль силы инерции, вызванной уменьшением деформации.

Внутренние напряжения в объеме пьезоэлектрического преобразователя изолированы, благодаря тому, что диффузия в твердом теле не успевает следовать за колебаниями скачка потенциала на его поверхности. Джоулев нагрев электролита квадратичен по току, меняется с удвоенной частотой переменного тока и потому не рассматривается на частоте измерения технологических параметров.

Установка обладает: простотой конструкции, высокой производительностью, сокращением технологических затрат, большой точностью изготовления сложнопрофильных изделий, контролем и коррекцией технологических параметров в процессе СЭ и ЭХФО, а также совмещает в одном технологическом решении процессы электроосаждения и размерной электрохимической обработки [2,3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобразования РФ по программе “Фундаментальные исследования в области химических технологий” (шифр гранта 98-8-5.4-131).

ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов А.Д., Козак Е. Высокоскоростное электрохимическое формообразование. М., 1990.
2. Кукоз Ф.И., Кирсанов С.В., Зибров В.А. Нелинейная модель электрохимической ячейки в системах регулирования межэлектродного зазора. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 1999. № 3. С. 52–53.
3. Зибров В.А. Динамическая модель пьезоэлектрического преобразователя при измерении поверхностного натяжения. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 1999. № 3. С. 58–60.

Поступила 14.02.2000

Summary

The installation for selective electrochemical deposition and electrochemical machining of complex-profile products with use of properties of the multifunctional piezoelectric converter is considered. The block diagram of installation for selective electrochemical deposition of complex-profile products in which a piezoelectric converter is used as a electrode-tood drive and a sensor of physical and chemical machining parameters, is presented.

Г.И. Бумагин, В.А. Иванов

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ В СТУПЕНИ ЭГД-ГЕНЕРАТОРА-ДЕТАНДЕРА БОЛЬШОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

*Омский государственный технический университет
пр. Мира, 11, г. Омск – 50, 644050, Россия*

Во всех ранее опубликованных работах принципиальная схема ЭГД – генератора-детандера (ЭГД-Г-Д), как правило, строилась на системе электродов: эмиттер-игла, вытягивающий электрод – кольцо и коллектор – кольцо. И все теоретические и экспериментальные исследования проводились на этой модели. Основной недостаток этой схемы – малые токи на эмиттере и как следствие малые мощности одной ступени (до 50 Вт). В результате для развития больших мощностей и производительности строились многоступенчатые модели с параллельным и последовательным включением ступени.

Внутренние напряжения в объеме пьезоэлектрического преобразователя изолированы, благодаря тому, что диффузия в твердом теле не успевает следовать за колебаниями скачка потенциала на его поверхности. Джоулев нагрев электролита квадратичен по току, меняется с удвоенной частотой переменного тока и потому не рассматривается на частоте измерения технологических параметров.

Установка обладает: простотой конструкции, высокой производительностью, сокращением технологических затрат, большой точностью изготовления сложнопрофильных изделий, контролем и коррекцией технологических параметров в процессе СЭ и ЭХФО, а также совмещает в одном технологическом решении процессы электроосаждения и размерной электрохимической обработки [2,3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобразования РФ по программе “Фундаментальные исследования в области химических технологий” (шифр гранта 98-8-5.4-131).

ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов А.Д., Козак Е. Высокоскоростное электрохимическое формообразование. М., 1990.
2. Кукоз Ф.И., Кирсанов С.В., Зибров В.А. Нелинейная модель электрохимической ячейки в системах регулирования межэлектродного зазора. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 1999. № 3. С. 52–53.
3. Зибров В.А. Динамическая модель пьезоэлектрического преобразователя при измерении поверхностного натяжения. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 1999. № 3. С. 58–60.

Поступила 14.02.2000

Summary

The installation for selective electrochemical deposition and electrochemical machining of complex-profile products with use of properties of the multifunctional piezoelectric converter is considered. The block diagram of installation for selective electrochemical deposition of complex-profile products in which a piezoelectric converter is used as a electrode-tood drive and a sensor of physical and chemical machining parameters, is presented.

Г.И. Бумагин, В.А. Иванов

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ В СТУПЕНИ ЭГД-ГЕНЕРАТОРА-ДЕТАНДЕРА БОЛЬШОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

*Омский государственный технический университет
пр. Мира, 11, г. Омск – 50, 644050, Россия*

Во всех ранее опубликованных работах принципиальная схема ЭГД – генератора-детандера (ЭГД-Г-Д), как правило, строилась на системе электродов: эмиттер-игла, вытягивающий электрод – кольцо и коллектор – кольцо. И все теоретические и экспериментальные исследования проводились на этой модели. Основной недостаток этой схемы – малые токи на эмиттере и как следствие малые мощности одной ступени (до 50 Вт). В результате для развития больших мощностей и производительности строились многоступенчатые модели с параллельным и последовательным включением ступени.

Нами предлагается новая принципиальная схема ЭГД-Г-Д: эмиттер – тонкостенные коаксиальные кольца, заостренные с одной стороны; - вытягивающий и коллекторный электроды – коаксиальные цилиндры с круговыми отверстиями, но смещенные относительно друг друга (рис. 1). Такая схема позволяет строить ЭГД-Г-Д практически любой производительности и любой мощности (до нескольких МВт), а в одной ступени развивать мощность до десятков кВт.

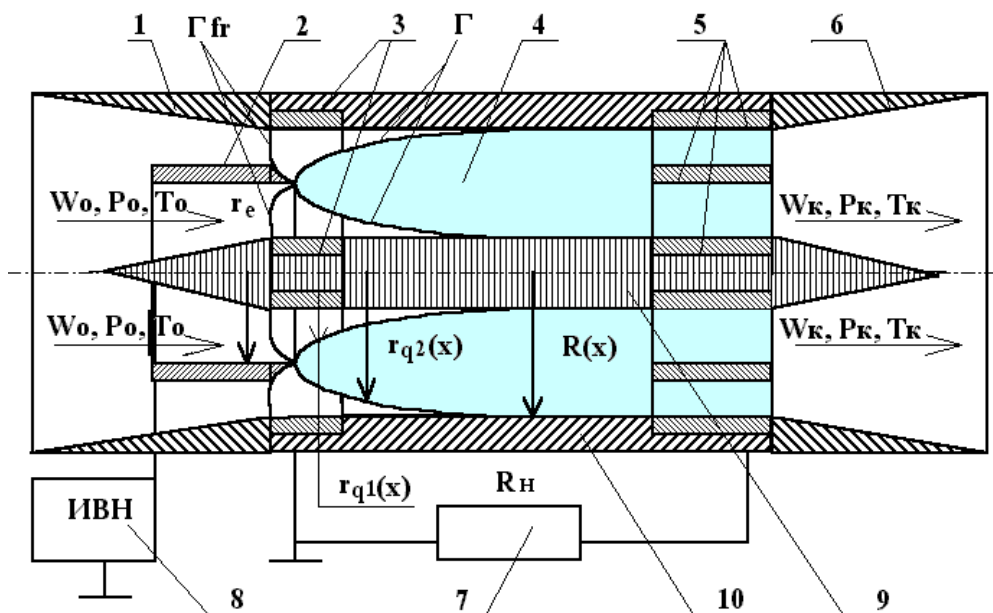


Рис. 1. Принципиальная схема ЭГД-генератора:

- 1 – сопловой аппарат; 2 – эмиттерный электрод; 3 – вытягивающий электрод; 4 – канал;
 5 – коллекторный электрод; 6 – диффузор; 7 – сопротивление нагрузки;
 8 – ИВН; 9 – обтекаемое тело; 10 – корпус.

Для расчета таких ступеней ниже излагается математическая модель процессов, происходящих в основных рабочих зонах и анализ работы предложенной конструкции ЭГД-Г-Д.

Главной целью создания математической модели процессов в ЭГД-Г-Д являлось определение оптимальной конструкции генератора, проведение полного расчета проточной его части и оценка эффективности его работы. Вся конструкция ЭГД-Г-Д строится из расчета, что в сопле срабатывает определенная разность энтальпий (разность давлений), достаточная для развития околосвуковой скорости потока, а в последующих ступенях срабатывает как кинетическая, так и потенциальная энергия потока. Одной из задач расчета является определение оптимального соотношения между этими энергиями.

Математическая модель строилась из предположения, что в рабочей части ЭГД-Г-Д действуют два внешних поля и поле от объемного заряда, заполняющего все пространство между эмиттерным электродом и коллектором (граница Γ). Первое внешнее поле действует между поверхностью острых кромок эмиттера и поверхностью вытягивающего электрода от приложенного между ними напряжения U_{ϕ_0} и ограничено внешней поверхностью Γ_{fr} . Это поле вызывает высокую напряженность возле острых кромок эмиттера и за счет коронного разряда формирует объемный заряд и конвективный ток J_0 в зоне преобразования.

Второе внешнее поле действует между коллектором и вытягивающим электродом и образуется в результате появления в процессе работы высокого потенциала U_{ϕ_0} на коллекторе в связи с большим сопротивлением R_H во внешней цепи. Это поле направлено против движения униполярно-заряженного потока, и поток, перенося заряды против сил электрического поля за счет вязкостного взаимодействия нейтральных молекул с зарядами-ионами, расширяется с совершением работы. При этом величина образующего конвективного тока определяется конструкцией и размерами эмиттера, вытягивающего электроды (величиной их поверхности), но в первую очередь значением напряжения U_{ϕ_0} и подвижностью образующихся зарядов. Силы электрического поля, действующие на заряды, в зоне ЭГД – преобразования определяются в первую очередь величиной образующегося на коллекторе напряжения U_{ϕ_k} , конструкцией и расположением между собой коллекторным и вытя-

гивающим электродами, а также величиной вязкостного взаимодействия нейтральных молекул с зарядами, и во вторую очередь вязкостью рабочей среды, которая характеризуется подвижностью зарядов b .

Математическая модель разработана в квазиодномерном приближении при стационарном протекании процессов в отсутствие химических реакций, но с учетом радиальных составляющих напряженности, как внешнего электрического поля, так и поля объемного заряда. Передачей тепла от стенок канала к потоку и наоборот, а также переносом тепла теплопроводностью в потоке в осевом направлении пренебрегаем. Кроме этого приняты следующие допущения:

Процессы зарядообразования (образования объемного заряда) и процессы взаимодействия зарядов с нейтральным потоком условно разделены между собой в пространстве границей Γ . Процесс зарядообразования и ионизации с помощью коронного разряда происходит только внутри границы Γ вблизи и на поверхности острых кромок эмиттера. Внутренняя область разряда значительно меньше внешней, поэтому объемом внутренней области из-за ее малости (в 100–1000 раз меньше внешней области разряда) пренебрегаем.

Будем считать, что на границе зоны ионизации и области взаимодействия зарядов с нейтральным потоком Γ модуль напряженности $|E|$ равен начальной напряженности зажигания короны E^* , которая остается постоянной величиной в течение всего процесса горения короны. Равенство $|E|=E^*=E_0$ является граничным условием для области взаимодействия зарядов с нейтральным потоком.

На основе физической модели и принятых допущений была получена математическая модель, описывающая процессы в рабочей зоне преобразования энергии и переноса зарядов, а также в зоне сбора и рекомбинации зарядов с учетом процессов зарядообразования во внутренней области.

Система уравнений состоит из: дифференциальных уравнений движения, энергии, профиля канала, границы области существования объемного заряда с радиусом r_q , плотности конвективного тока j_x и скорости зарядов в зоне преобразования энергии:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{J_x E_x}{W_q F} - \rho W \frac{dW}{dx} + \xi \rho \frac{W^2}{4R}; \quad (1)$$

$$\frac{dW_g}{dx} = \frac{W_g}{(a^2 - W_g^2)} \left(\frac{J_x E_x}{m\chi} k_z - \frac{a^2 dF}{F dx} + \xi \frac{k W_g^2}{z 4R} \right); \quad (2)$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{J_x E_x}{mCp} - \frac{W_g}{Cp} \frac{dW_g}{dx}; \quad (3)$$

$$\frac{dr_q}{dx} = -\frac{bE_r}{W_q}; \quad (4)$$

$$\frac{dj_x}{dx} = -\frac{j_x bE_r}{W_q R}, \quad l_q \leq x \leq L; \quad (5)$$

$$W_q(x) = W_g(x) + bE_x(x); \quad (6)$$

– уравнений суммарной осевой и радиальной составляющих напряженности электрического поля E_x и E_r :

$$E_x(x) = E_x^{\phi}(x) + E_x^q(x); \quad (7)$$

$$E_r(x) = E_r^{\phi}(x) + E_r^l(x); \quad (8)$$

которые соответственно определяются уравнениями: здесь E_x^{ϕ} и E_r^{ϕ} – осевая и радиальная составляющие напряженности внешнего электрического поля; E_x^q и E_r^q – осевая и радиальная составляющие напряженности поля объемного заряда,

$$E_x^{\phi}(x) = \frac{U_{\phi k}}{(x + a_1) L n \left(\frac{2L_c}{4L_k + \pi R_{dl}} \right)}, \quad (9)$$

где

$$a_1 = \frac{2L_c \cdot L}{4L_k - 2L_c + \pi R_{dl}};$$

$$E_r^\varphi(x) = \frac{U_{\varphi_0} \cdot a_3 \cdot L_c}{4(R_c^2 - r_0^2)a_4(x^2 + a_2)}, \quad \text{где}$$

$$a_2 = \frac{L_c^2 \cdot l_0}{4(L_c - l_0)}, \quad a_3 = \sqrt{\frac{l_0 R_c^2 - L_c r_0^2}{L_c - l_0}},$$

$$a_4 = \arctg\left(\frac{a_3 \cdot (R_c - r_0)}{R_c \cdot r_0 + a_3^2}\right);$$

$$E_x^q(x) = \frac{1}{40\pi^2 \varepsilon \varepsilon_0 r_e r_q(x)} \left[\int_0^x \frac{(4\alpha_b + \alpha_a) J_x(x_1)}{W_q(x_1)} dx_1 - \int_x^L \frac{(4\alpha_b + \alpha_a) J_x(x_1)}{W_q(x_1)} dx_1 \right], \quad \text{где}$$

$$\alpha_a = \left\{ \begin{array}{l} \arctg\left(\frac{2|x-x_1|r_q(x)}{y_r}\right) + \pi \begin{cases} 0, & y_r < 0 \\ 1, & y_r > 0 \end{cases}; \\ \frac{\pi}{2}, & y_r = 0, \quad y_r = |x-x_1|^2 + r_q^2(x_1) - r_q^2(x); \end{array} \right\},$$

$$\alpha_b = 2 \arctg\left(\frac{r_q(x)}{|x-x_1|}\right);$$

$$E_r^q(x) = \frac{r_q(x)}{8\pi^2 \varepsilon \varepsilon_0 r_e} \int_0^L \frac{J_x(x_1)}{W_q(x_1)(r_q^2(x) + |x-x_1|^2)} dx_1; \quad (12)$$

– уравнения осевой составляющей конвективного тока:

$$J_x(x) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{J_0 \cos(\alpha) \cdot W_q(x)}{W_{q_0}}, \quad 0 \leq x \leq l_q; \\ j_x 4\pi r_e r_q(x), \quad l_q \leq x \leq L; \end{array} \right\}, \quad \text{где}$$

$$J_0 = \frac{\pi \varepsilon \varepsilon_0 a_3 r_e l_0 (U_{\varphi_0} - U^*)}{\cos(\alpha_0) \Delta s (a_3^2 + r_0^2) a_4} \left(W_0 + b \frac{U_{\varphi_0} L_c a_3}{4(R_c^2 - r_0^2) a_4 a_2} \right); \quad (14)$$

$$\alpha_0 = \arctg\left(\frac{bE_{r_0}}{W_{q_0}}\right);$$

здесь Δs – длина внутренней зоны разряда, $\Delta s \approx r_0$; b – подвижность заряженных частиц, определяется по уравнению, полученному авторами на основе экспериментов:

$$b = b_0 \left(\frac{\eta_0}{\eta}\right)^{1.5} \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{1.3} \quad (15)$$

здесь b_0 , η_0 , ρ_0 – подвижность заряженных частиц, динамическая вязкость и плотность при нормальных условиях, η , ρ – динамическая вязкость и плотность в рабочих условиях;

– уравнения состояния рабочего тела, расхода и уравнений профиля канала ступени:

$$p = z\rho R_g T; \quad (16)$$

$$m = \rho W F; \quad (17)$$

$$R(x) = \begin{cases} R_c, & 0 \leq x \leq L_c/2; \quad \beta = (R_k - R_c)/L; \\ R_c + x \cdot \beta, & L_c/2 \leq x \leq L - L_k; \\ R_k, & L - L_k \leq x \leq L; \end{cases} \quad (18)$$

$$F(x) = \begin{cases} 4\pi r_e R_c, & 0 \leq x \leq L_c/2; \\ \pi((r_e + R)^2 - R_t^2), & L_c/2 \leq x \leq L - L_k; \\ \pi((r_e + R_k)^2 - R_t^2), & L - L_k \leq x \leq L. \end{cases} \quad (19)$$

В качестве граничных условий приняты

$$p(0) = p_0; \quad (20)$$

$$T(0) = T_0; \quad (21)$$

$$W_g(0) = W_0; \quad (22)$$

$$r_q(0) = r_0. \quad (23)$$

Начальные условия

$$j_x(I_q) = \frac{J_x(I_q)}{4 * \pi * r_e * r_q(I_q)}; \quad (24)$$

$$E_x(0) = E^* = E_0; \quad (25)$$

$$W_q(0) = W_0 + bE_0. \quad (26)$$

Полученная математическая модель (1)–(26) решалась численно с использованием разностной схемы Рунге-Кутты четвертой степени. За начальное состояние рабочего тела при расчете первой ступени были приняты термодинамические параметры тела после соплового аппарата. Для расчета последующих ступеней за начальные p_0 , T_0 и W_0 принимались конечные значения давления p_k , температуры T_k и скорости W_k , полученные в предыдущих ступенях.

Эта математическая модель позволяет проследить за изменением основных характеристик рабочего тела, электрического поля и тока по длине проточной части ступени, дать оценку эффективности и выработать оптимальный режим работы ЭГД-Г-Д.

Как показывает анализ, существенное влияние на эффективность работы ступени оказывает режим работы ЭГД-Г-Д, особенно скорость потока W и изменение скорости потока ΔW в ступенях. Скорость потока W в ЭГД-Г-Д на всей длине ступени должна быть выше скорости перемещения заряда $W \geq W_q$. В противном случае в ЭГД-Г-Д появляются насосные режимы работы. Это имеет место тогда, когда суммарное изменения потенциала φ_x по длине ступени имеет максимум, и напряженность суммарного поля в зоне преобразования изменяет свой знак и направление. Такой случай работы ЭГД-Г-Д показан на рис. 2–4.

На рис. 2 видно, что суммарный потенциал φ_Σ , равный сумме потенциалов внешнего поля φ_ϕ и поля объемного заряда φ_q , на длине $x^* = 5,5$ мм имеет максимум. Как следствие этого напряженность суммарного поля E_Σ , равная сумме напряженностей внешнего поля E_ϕ и поля объемного заряда E_q на той же длине x^* меняет свой знак и направление (рис. 3), а скорость перемещения зарядов W_q становится выше скорости нейтрального потока W (рис. 4), это означает что на длине проточной части $x \geq x^*$ возникает насосный режим, который приводит не к расширению, а наоборот, к сжатию, повышению давления и температуры рабочего тела.

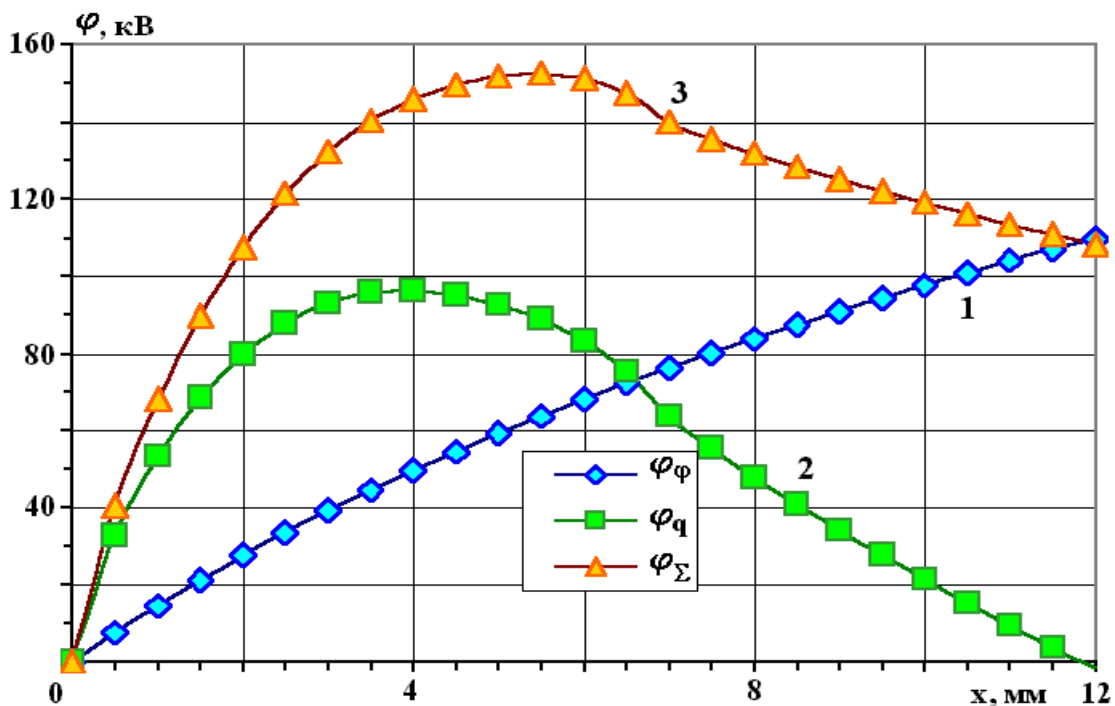


Рис. 2. Распределение потенциалов внешнего электрического поля φ_ϕ (1) поля объемного заряда φ_q (2) и суммарного потенциала φ_Σ (3) по длине ступени.

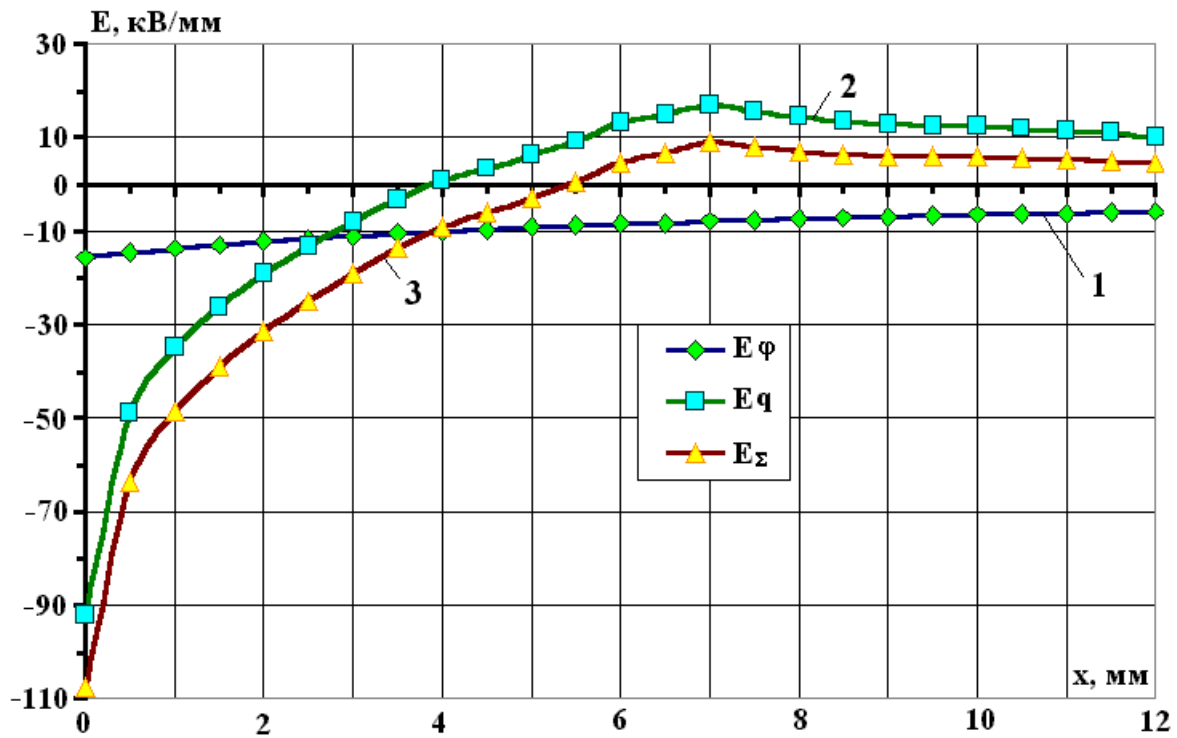


Рис. 3. Распределение напряженностей внешнего электрического поля E_ϕ (1) поля объемного заряда E_q (2) и суммарной напряженности E_Σ (3) по длине ступени ЭГД-детандера.

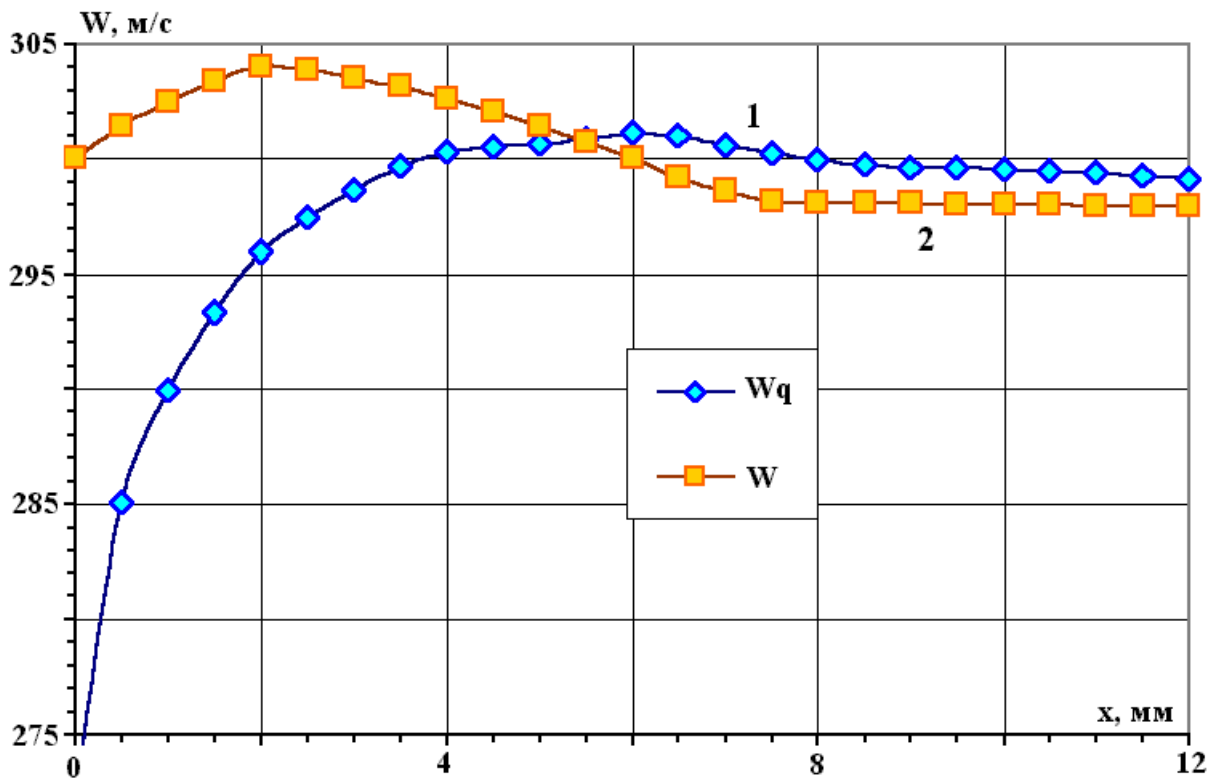


Рис. 4. Изменение скорости заряженных частиц W_q (1) и потока W (2) по длине канала ступени ЭГД-детандера.

Для исключения этого явления и повышения эффективности работы необходимо найти оптимальный режим работы ЭГД-Г-Д. Это можно сделать или повышением напряжения на коллекторе $U_{\phi k}$, или увеличением скорости потока W или уменьшением конвективного тока J_0 и снижением

напряженности E_q от объемного заряда. Напряжение на коллекторе, как правило, поддерживается стандартным, уменьшение величины конвективного тока приводит к снижению мощности ступени. Поэтому наиболее предпочтительным вариантом является нахождение оптимальной скорости потока и определение оптимального соотношения между потенциальной энергией рабочего тела $N_n = \Delta p_i m / \rho$ и кинетической энергией потока $N_k = m(W_{ni}^2 - W_{ki}^2) / 2$ ступени, где Δp_i – перепад давления в ступени, m, ρ – расход и плотность рабочего тела.

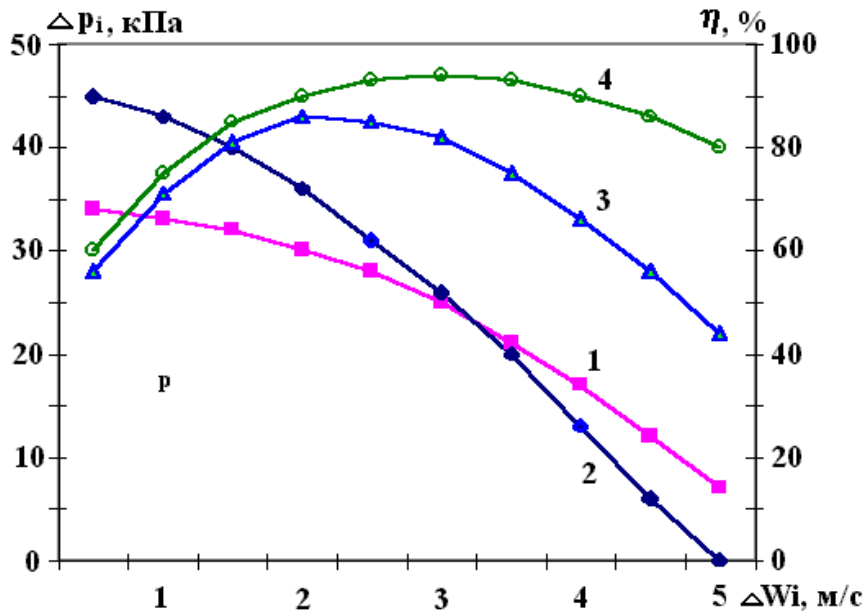


Рис. 5. Зависимости между срабатываемыми перепадом давления и изменением скорости ΔW_i в Δp_i ступени при различных скоростях потока. 1 – $\Delta P(W=300)$; 2 – $\Delta P(W=250)$; 3 – $\eta(W=250)$; 4 – $\eta(W=300)$.

Выводы

1. Разработана математическая модель для новой конструкции ЭГД-Г-Д большой производительности, необходимой для промышленных установок, позволяющая производить расчеты проточной части ступеней при оптимальных характеристиках и параметрах рабочей среды.

2. Проведен анализ процессов в ступенях, который позволил выявить оптимальный режим работы ЭГД-Г-Д, имеющий место при равенстве срабатываемых потенциальной и кинетической энергий в каждой ступени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рубашов И.Б., Бортников Ю.С. Электрогазодинамика. М., 1971.

Поступила 15.02.2000

Summary

Mathematical model for new design of EHD-generator-reducing valve of high efficiency, necessary for plant installations allowing to calculate a flowing part of stage at optimum characteristics and parameters of working medium is elaborated. The analysis of processes in stages aiming at optimum mode of work of EHD-generator-reducing valve revealing is conducted. Optimum mode has place when there is a equality of kinetic and potential used energies in each stage.

ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

Н.С. Попович, М.А. Чебан, Г.П. Листунов, Б.А. Максименко

ПРИМЕНЕНИЕ CDTE-ДЕТЕКТОРОВ В РАДИАЦИОННОЙ ДОЗИМЕТРИИ

*Институт прикладной физики АН,
ул. Академическая, 5, г. Кишинев, MD-2028, Молдова*

Исследования влияния ионизирующего облучения на биологические объекты берут свое начало, по существу, с момента первых попыток применения радиоактивного излучения. Обусловлено это было тем, что в первых же опытах были обнаружены угрожающие по своим масштабам отрицательные последствия этого явления.

Человек и окружающая среда обитания подвергаются облучению в основном от источников естественной радиации [1]: из космоса и от радиоактивных веществ, находящихся в земной коре. В связи с тем, что с каждым годом растет уровень потребления энергии на душу населения, значительная часть которой вырабатывается за счет сжигания огромного количества угля и нефти, в настоящее время выбросы с золой в атмосферу естественных радионуклидов Sr-90, Cs-137, K-40, Po-210 превышает в 10–100 раз подобные выбросы атомных электростанций такой же мощности. Кроме того, следует учитывать, что с каждым годом растет число учреждений, работающих с радиоактивными элементами: в медицине, биологии, геологии и других областях. Все это выдвигает проблему достоверной оценки радиационной опасности в ранг задачи первостепенной важности.

Особо интенсивно вопросами радиоактивной безопасности стали заниматься после атомной бомбардировки Хиросимы и Нагасаки. В связи с этими событиями радиационная медицина исследовала в основном действие на организм относительно высоких доз облучения, при которых клетки или живые организмы погибают за сравнительно короткий срок (часы, недели, месяцы) и в этой области достигнуты определенные успехи. Что же касается действия на живые организмы и человека малых доз облучения, то эта область изучена значительно меньше. Оказалось, что действие малых доз на биологические объекты сопровождается рядом неизвестных ранее особенностей. В частности, было установлено [2, 3], что биологическое действие излучения не имеет порога. Следовательно, сколь угодно малые дозы обязательно вызывают те или иные мутации, в результате которых повышается смертность потомков, в том числе и достаточно отдаленных. Эти обстоятельства и определяют актуальность исследований, направленных на создание доступных и точных портативных приборов для определения низких уровней радиации.

В дозиметрах радиационного фона в качестве детектора главным образом используется газонаполненный счетчик Гейгера. Характерными недостатками, присущими этим приборам [4], являются низкая тормозная способность, плохое временное и энергетическое разрешение, большое значение времени восстановления, относительно небольшой радиационный ресурс (деградация). Выше перечисленное приводит к уменьшению скорости счета и сильно искажает полученную информацию при изменении потока квантов или частиц. Из-за того, что счетчик Гейгера питается напряжением ~ 400 В, элементная база дозиметра усложнена, а сам прибор имеет большие габаритные размеры. В связи с этими обстоятельствами весьма актуальными представляются исследования, посвященные изучению возможностей применения полупроводниковых кристаллов в качестве регистрирующих элементов в радиационных дозиметрах.

Среди принципиальных преимуществ полупроводниковых детекторов следует отметить в первую очередь небольшую энергию образования электронно-дырочной пары – (3–7) эВ по сравне-

нию с 30 эВ, необходимой для образования электронно-ионной пары в газонаполненных детекторах и порядка 300 эВ для создания фотоэлектрона на фотокатоде; значительно более высокую тормозную способность; сравнимые по величине подвижности электронов и дырок, в результате чего времена их собирания не сильно различаются; существенно меньшие рабочие напряжения и малые токи ($\sim 10^{-8}$ А).

Первые полупроводниковые детекторы ионизирующего излучения были разработаны на базе кремния и германия. Эксплуатация таких приборов, однако, сопряжена с определенными трудностями. В частности, для их эффективной работы кристаллы *Ge* необходимо охлаждать до температуры жидкого азота, что позволяет их использовать в основном только в лабораторных условиях. В свою очередь кристаллы *Si* из-за низкого коэффициента поглощения [5] и большого уровня шума при комнатной температуре способны регистрировать при нормальных условиях ионизирующее излучение с энергией не более 100 кэВ.

Для эффективной работы в качестве регистрирующего элемента в детекторах ионизирующего излучения полупроводниковый кристалл должен обладать определенным набором значений ряда фундаментальных параметров [6]: сравнительно большой шириной запрещенной зоны E_g , малой величиной энергии образования электронно-дырочной пары E_p , большим значением среднего атомного числа Z , а также большими значениями подвижности и времени жизни носителей заряда. В связи с этим из множества известных полупроводниковых материалов для этих задач подходит весьма ограниченный ряд кристаллов, а для задач создания полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения, работающих при комнатной температуре, это число еще меньше.

В настоящей работе приведены результаты исследования по разработке детекторов гамма-излучения на базе теллурида кадмия. Монокристаллы CdTe были получены вертикальным методом Бриджмена [7]. При синтезе теллурида кадмия были использованы коммерческий кадмий марки В5 и теллур марки ТВ-4, зоноочищенный. Для компенсации собственных дефектов кристаллы легировались примесью хлора (концентрация $\leq 10^{18}$ см⁻³). Во время роста контролировался профиль распределения температуры с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$. Выращенные монокристаллы теллурида кадмия имели удельное сопротивление $\sim 10^6$ Ом·м.

Из полученных монокристаллов были изготовлены детекторы гамма-излучения [8], которые представляли собой структуры Au-p-CdTe-Au. Контакты наносились методом химического осаждения.

Анализ результатов измерений показал, что изготовленные детекторы имеют энергетический эквивалент шума не более 48 кэВ, рабочий диапазон энергий 50 кэВ – 3 МэВ при эффективности регистрации по Cs – 137 до 65–70%. Эти параметры удовлетворяют стандартам, предъявляемым к детекторам ионизирующего излучения. Полученные CdTe-детекторы показывают сравнительно высокую чувствительность ~ 100 имп/мкР·см² при напряжении питания 30–40 В. Все вышеприведенные параметры относятся к комнатной температуре.

На базе полученных CdTe-детекторов был изготовлен экспериментальный макет радиационного дозиметра, предназначенного для оперативной оценки радиационной обстановки, в том числе и в бытовых условиях. Прибор позволяет определить мощность экспозиционной дозы излучения по цифровому табло и оценить интенсивность излучения при помощи звуковой сигнализации.

Основной особенностью дозиметра является высокая чувствительность, достигнутая за счет использования полупроводникового детектора ионизирующего излучения на базе кристалла CdTe. Диапазон измерения мощности экспозиционной дозы составляет 10^{-2} – 10 мР/ч, при погрешности измерения не более 25 %. Время одного измерения составляет 20 с. Продолжительность непрерывной работы, без смены элементов питания 50 ч, при напряжении – (7–9) В.

Макетный образец был изготовлен на базе дискретных радиоэлементов широкого применения, которые определили габаритные размеры $140 \times 50 \times 20$ мм³. Для их уменьшения и снижения потребляемой мощности (увеличения ресурса работы) целесообразно применение специально разработанных гибридных схем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радиация. Дозы, эффекты, риск: / Пер. с англ. М., 1990.
2. Сахаров А.Р. Радиоактивный углерод ядерных взрывов и непороговые биологические эффекты. Советские ученые об опасности испытания ядерного оружия. М., 1959.
3. Сивинцев Ю.В. Насколько опасно облучение. М., 1991.

4. *Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С.* Основы экспериментальных методов ядерной физики. М., 1977.
5. *Malm H.L., Raudorf T.W., Martini M., Zanio K.R.* Gamma ray efficiency comparisons for Si (Li), Ge, CdTe and HgI₂ detectors, IEEE Trans. Nucl. Sci. 1973. V. 20. N 1.
6. *Siffert P.* Detecteurs a semiconducteurs, progres recents. J. Phys. 1978. V. 36. N 6. Collog. N 3.
7. *Максименко Б.А., Чебан М.А., Сотников Г.А. и др.* Выращивание CdTe для медицинской томографии // Всесоюзная конференция "Материалы для оптоэлектроники", 9–11 сентября 1980 г.: Тез. докл. Ужгород, 1980.
8. *Ruscu R., Popovici N., Ceban M. and all.* X-and gamma – ray detection with CdTe, National Phys. Conference, Sibiu, September 21–24, 1994.

Поступила 14.03.2000

Summary

The detectors for ionizing radiation have been investigated. This detectors were designed on the base of CdTe(Cl) crystals. The noise parameters and radiation damage resistance of such detectors were obtained. The specifications of portable dosimeter elaborated on the base of these detectors are presented.
