

Б.Н. Золотых

ОБ ОТКРЫТИИ И РАЗВИТИИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ. К 60-ЛЕТИЮ ОТКРЫТИЯ СПОСОБА

ФГУП «НПО» «ТЕХНОМАШ»

3-й проезд Марьиной рощи, д.40, г. Москва, 127018, Россия

Краткое предисловие

К числу выдающихся открытий XX века относится изобретение советскими учеными Б.Р. и Н.И. Лазаренко принципиально нового электрического способа обработки металлов, сплавов и других токопроводящих материалов, открывшего новую эру в развитии металлообработки, обеспечившего использование электрической энергии непосредственно для формообразования деталей, упрочнения и легирования их поверхностей из любых токопроводящих материалов независимо от их физико-химических и механических свойств. Первое промышленное применение новый способ обработки металлов получил в 1942 г. на Урале – в грозные годы Великой Отечественной войны (еще до официальной регистрации в патентном ведомстве). С помощью несложной электроискровой установки многие тысячи заготовок для реактивных снарядов "Катюши" из неисправимого брака вернулись в производство.

Приоритет открытия способа советскими учеными подтверждается авторским свидетельством № 70010 от 3 апреля 1943 г. и патентами Франции № 525414 от 18 июня 1946 г., Великобритании № 285822 от 24 сентября 1946 г., США № 692718 от 23 августа 1946 г., Швейцарии № 818177 от 14 июля 1946 г., Швеции № 9992/46 от 1 ноября 1946 г.

В многолетнем соревновании с другими способами металлообработки электроэрозионный способ доказал свою перспективность, чрезвычайную простоту осуществления, малую энергоемкость, практически неограниченную область применения. И несмотря на то, что был открыт более 60-ти лет тому назад, до сих пор принадлежит к числу самых прогрессивных способов, которые с течением времени не только не утратили своего значения, но, наоборот, выявляют все новые и новые возможности и находят все большее применение в различных отраслях промышленности.

Историческая справка 1941–1965 гг.

В апреле 1943 г. из находившегося в эвакуации в г. Свердловске (ныне Екатеринбург) ВЭИ им. Ленина в Москву в НИИ-627 (ныне НИИ электромеханики) был переведен отдел «Магнитных, проводниковых и контактных материалов», который возглавлял профессор А.С. Займовский (позднее член-корреспондент АН СССР). В составе отдела была лаборатория профессора В.В. Усова, работавшая в области разработки и исследования высокостойких контактных материалов. В ней с 1935 г. работал в должности младшего научного сотрудника выпускник химического факультета Московского государственного университета им. Ломоносова Борис Романович Лазаренко. В 1940–1941 гг. он закончил исследования по диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему: «Инверсия электрической эрозии металлов и методы борьбы с разрушением контактов». В дополнении к теме диссертации им отмечено, что эрозионное разрушение можно использовать как средство формообразования деталей из любых токопроводящих материалов.

В июне 1943 г. на Ученом совете Всесоюзного электротехнического института Б.Р. Лазаренко защитил кандидатскую диссертацию. По инициативе заведующего отделом профессора А.С. Займовского из отдела была выделена лаборатория № 7, руководителем которой был назначен Б.Р. Лазаренко. Основным направлением работы лаборатории было исследование и разработка технологии электроэрозионной обработки (ЭЭО) токопроводящих материалов, а также разработка физических основ процесса разрушения материалов импульсным электрическим разрядом.

Отметим, что в коллективе НИИ-627 того времени царила творческая атмосфера, развитию которой способствовали директор института профессор А.Г. Иосифьян и его непосредственные помощники, начальники отделов и лабораторий. Общей чертой была смелость в выборе направлений научных исследований. Примером для всех служил А.Г. Иосифьян – инициативный и талантливый ученый и воспитатель научных кадров, обладающий неисчерпаемой трудоспособностью и энергией.

Высокий научный потенциал НИИ-627 дал путевку в жизнь многим новым научно-техническим направлениям, а тенденция выделения их в самостоятельные организации была многолетней практикой. Таким образом, НИИ-627 под руководством директора, академика, профессора А.Г. Иосифьяна, внес большой вклад в развитие новейших областей науки и техники, в том числе и электроэрозионной обработки. На примере лаборатории электроэрозионной обработки (№ 7) проиллюстрируем справедливость сказанного.

К началу 1945 г. лаборатория Б.Р. Лазаренко по сути превратилась в первый в мире исследовательский центр общегосударственного значения. Были разработаны новые, неизвестные ранее технологические процессы, создан первый образец промышленного электроэрозионного станка. С момента открытия до конца 1945 г. новый метод обработки получил значительное внедрение в различных отраслях промышленности.

По результатам научно-исследовательских и практических работ, выполненных с 1943 по 1945 гг., первооткрыватели электроэрозионной обработки Б.Р. и Н.И. Лазаренко в июне 1946 г. по представлению НИИ-627, Министерство Электропромышленности и научно-технической общественности (НТО Машпром), были удостоены Сталинской премии второй степени.

В середине 1945 г. в НИИ-627 была открыта аспирантура и в лаборатории Б.Р. Лазаренко появился первый аспирант – инженер Б.Н. Золотых, выпускник физического факультета Московского государственного университета, перешедший с авиационного завода № 27. В начале 1948 г. была защищена первая в области изучения физической природы ЭЭО кандидатская диссертация сотрудником лаборатории № 7 Б.Н. Золотых.

В середине 1948 г. Б.Р. Лазаренко защитил в МВТУ им. Баумана докторскую диссертацию. Развитие этих работ, а также их значение для развития машино- и приборостроения в целом потребовали новых организационных форм и возможностей. В 1948 г. была организована в составе НИИ-627 «Центральная научно-исследовательская лаборатория электрических методов обработки материалов» (ЦНИЛ-Электром). Начальником ЦНИЛ-Электром был назначен Б.Р. Лазаренко. Это был период бурного развития и становления принципиально нового направления в науке и практике машиностроения и приборостроения.

В 1947 г. инженерами Е.М. Левинсоном и Е.И. Владимировым при участии Б.Р. Лазаренко был создан копировально-прошивочный станок с автоматическим приводом подачи электрода-инструмента в процессе обработки.

К середине 50-х годов вокруг Бориса Романовича Лазаренко сложился крепкий, профессионально зрелый научно-технический коллектив. Обрела четкие организационные формы ЦНИЛ-Электром. Отдел физики возглавил Борис Никифорович Золотых, отдел технологии – Николай Константинович Фотеев; Иосиф Зиновьевич Могилевский стал руководителем отдела металлографии, Наталья Иоасафовна Лазаренко – заведующей отделом легирования, а отдел новых процессов возглавил Борис Романович Лазаренко. Созданные при лаборатории конструкторское бюро и небольшое экспериментальное производство как бы замкнули цепочку “идея–эксперимент–практика”, обеспечив материализацию идей, которые рождались и вызревали в лаборатории.

ЦНИЛ-Электром стала всесоюзным научным центром. В 1953 г. была выделена в самостоятельную организацию, а в 1955 г. вошла в состав научных учреждений АН СССР.

В начале 50-х годов в Советском Союзе и за рубежом – Швейцарии, Японии, Чехословакии, Германии заявляют о себе научно-инженерные коллективы и фирмы, основой деятельности которых явилось исследование физической природы ЭЭО, исследование и разработка технологических процессов, разработка и создание оборудования для ЭЭО.

В СССР – это ЦНИЛ-Электром АН СССР, крупные отделы в научно-производственном объединении Техномаш, Научно-исследовательском институте авиационной технологии, научно-производственном объединении «Исток», Московском машиностроительном производственном объединении «Салют», Проектном бюро по станкам и оборудованию ОКБСА, Экспериментальном научно-исследовательском институте металлорежущих станков ЭНИМС и ряд научно-технических коллективов в других отраслях промышленности. Эти организации внесли большой вклад в развитие теории и

технологии ЭЭО.

ЦНИЛ-Электром АН СССР вела широкий комплекс фундаментальных исследований в области изучения физической природы ЭЭО и поиска новых направлений развития ее технологии. Результаты ее разработок легли в основу общей физической теории ЭЭО и других методов обработки, основанных на использовании воздействия концентрированных потоков энергии на твердое тело.

В Научно-производственном объединении Техномаш и Научно-исследовательском институте авиационной технологии в этот период был создан ряд уникальных технологических процессов для формообразования сложнофасонных деталей и разработаны многочисленные промышленные модели специальных электроэрозионных станков для обеспечения нужд космической и авиационной техники. Уместно вспомнить о, к сожалению, уже ушедших от нас кандидатов технических наук М.В. Щербака и Д.З. Митяшкина, много лет руководивших отделами ЭФ и ЭХМО в Техномаш и Научно-производственном объединении Техномаш и Научно-исследовательском институте авиационной технологии.

В Научно-производственном объединении «Исток» впервые в мире были разработаны технология и оборудование для прецизионной электроискровой обработки. Именно с этого момента началось триумфальное шествие по всему миру эрозионной обработки проволочным электродом. Благодаря трудам лауреата Ленинской премии Б.И. Ставицкого и его сотрудников это направление выросло в самостоятельную отрасль станкостроения и технологии, Научно-производственном объединении «Исток» и ЦНИЛ-Электром разработали первый в мире промышленный прецизионный электроэрозионный проволочный станок с ЧПУ (мод. 4531).

В Московском машиностроительном производственном объединении «Салют» был разработан и внедрен технологический процесс обработки пера лопатки газовой турбины с применением ЭЭО на специальном станке МЭ-8 и организован производственный участок для реализации этой технологии. В 1961 г. эта работа была удостоена Ленинской премии в области науки и техники. Этот технологический процесс и сейчас широко используется в производстве.

В настоящее время очень остро стоит вопрос о сохранении наукоемких технологий. В России статус научного центра получили ряд отраслевых организаций. Московское машиностроительное производственное объединение «Салют» получил этот статус в области авиадвигателестроения. В 2002 г. коллективом ученых – работников Московского машиностроительного производственного объединения «Салют» был подготовлен и издан научный труд объемом 45 п.л. «Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей». М., Московское машиностроительное производственное объединение «Салют», 2002. В этой уникальной книге читатель найдет сведения обо всех без исключения электрофизических и электрохимических методах обработки.

Коллективы отделов Проектного бюро по станкам и оборудованию и Экспериментального научно-исследовательского института металлорежущих станков, входивших в то время в систему Министерства станкостроения, также внесли существенный вклад в развитие технологии электроэрозионной обработки, особенно в области копировально-прошивочных электроэрозионных станков. Они были призваны обеспечивать нужды других отраслей промышленности при обработке крупногабаритных деталей (матрицы ковочных штампов, пресс-форм и т. д.). Уместно вспомнить руководителей этих отделов: ныне здравствующего С.С. Подлазова и покойных А.Л. Лившица и Б.Е. Мечетнера, много сделавших для развития этого направления технологии и оборудования ЭЭО.

В Европе, интерес к электроэрозионной обработке проявили Акционерное общество промышленной электроники AGIE (Лозанна, Швейцария) и Женевское отделение фирмы SCHARMIL. Фирмой AGIE проведены фундаментальные исследования в области технологии и конструирования станков для ЭЭО. В настоящее время эта фирма – одна из ведущих в мире по точности и качеству станков как копировально-прошивочных, так и вырезных (проволочных станков). В Японии в 50-х годах был создан научно-исследовательский институт электроэрозионной обработки (доктор Киоси Иноуэ), затем рядом фирм (Мицубиси, Хитачи и др.) закуплены советские станки (вырезные) и освоен их выпуск, а также созданы собственные модели станков (60 – 70 гг.). Одной из первых среди стран Восточной Европы начала исследования и разработки электроэрозионных станков Чехословакия – научно-исследовательский институт VUMA. В конце 50-х годов в КНР созданы организации, занимавшиеся ЭЭО и для оказания помощи в 1956-1958 г. выезжали: профессор Б.Р. Лазаренко (на срок 2 года), профессор И.Я. Рабинович (на 3 месяца), к.т.н. Б.Н. Золотых (на 3 месяца).

Пик научной деятельности Б. Р. Лазаренко и коллектива ЦНИЛ-Электром в области электроэрозионной обработки приходится на 1955 – 1965 гг. В этот период выполнены фундаментальные исследования природы электрической эрозии металлов, на основе которых была создана общая физическая

теория этого явления, и разработаны методы расчета параметров техпроцесса ЭЭО. Работы, опубликованные в это время, получили международное признание и послужили основой для создания высокопроизводительного и высокоавтоматизированного оборудования как в СССР, так и за рубежом.

В начале 60-х годов возникло и получило развитие международное сотрудничество в области электрических методов обработки – Международный симпозиум по электрическим методам обработки (ISEM), в создание и развитие которого внесли вклад ныне покойные академик Б.Р. Лазаренко (Россия), доктор инженер И. Станек (Словакия), профессор доктор Е. Матиас (Швейцария) и ныне здравствующий доцент М. М. Шушка (Словакия), а также CIRP. ISEM-1 состоялся в июне 1960 г. в Праге (Чехословакия). Встречи на ISEM обеспечили интенсивный обмен опытом, который способствовал бурному развитию научных и практических исследований в области ЭЭО. Очередной ISEM-14 предполагается провести в Эдинбурге в 2004 г.

В конце 60-х годов результаты научных исследований по созданию общей физической (феноменологической) теории электроэрозионной обработки в России дали новый импульс в ее развитии. Реальным стало решение задачи широкой автоматизации процесса ЭЭО и создание гибких технологических процессов ЭЭО, позволяющих удовлетворять широкий диапазон требований потребителя. С начала 70-х годов электроэрозионные станки стали предметом международной торговли и сейчас в мире продается и покупается около 10 тысяч электроэрозионных станков в год.

К началу 60-х годов в СССР и за рубежом были созданы крупные отраслевые научно-исследовательские центры ЭЭО. В СССР координацию и научное руководство осуществляла головная организация ЦНИЛ-Электром АН СССР. Реорганизация сети научных учреждений АН СССР и ее структуры в 1962 г. по указанию вышестоящих организаций привела к тому, что в промышленность были переданы институты и лаборатории, входившие в Отделение технических наук АН СССР, а ОТН было упразднено. В результате реорганизации ЦНИЛ-Электром оказалась подчиненной Комитету автоматизации и станкостроения, что привело к потере большого числа научных кадров и в конечном итоге к тому, что ЦНИЛ-Электром перестала существовать (1965 г.). Центр научных исследований в области новых направлений электрической обработки материалов частично был перенесен в Институт прикладной физики АН Молдавской ССР, директором которого был профессор академии АН МССР Б.Р. Лазаренко. В 1965 г. научные работы и исследования, относящиеся к области физических основ ЭЭО, перенесены в Московский институт электронного машиностроения (МИЭМ) (в настоящее время Московский государственный институт электроники и математики). Так закончилась история ЦНИЛ-Электром.

Пути дальнейшего развития ЭЭО

За 60 лет развития электроэрозионной обработки определились два основных типа станков: копировально-прошивочные и вырезные с проволочным электродом-инструментом, которые нашли широкое и устойчивое применение в промышленности, их использование позволяет вести обработку всех видов поверхностей, встречающихся в машино- и приборостроении.

Современные электроэрозионные станки имеют автоматизированную систему технологической подготовки процесса ЭЭО и достаточно высокие характеристики как по точности, так и по диапазону форм обрабатываемых поверхностей. Иными словами, они обладают весьма высокой технологической гибкостью в отношении вида и сложности формы обрабатываемых деталей, а также возможностью нормального функционирования в течение длительного времени (1 – 2 смены) без участия оператора за счет использования современных систем управления всеми компонентами технологического процесса ЭЭО. В первую очередь это относится к вырезным электроэрозионным станкам с проволочным электродом, а также к копировально-прошивочным электроэрозионным станкам типа «обрабатывающий центр». И теперь, в XXI веке, после 60 лет работы в области электроэрозионной обработки, можно с удовлетворением сказать, что Россия в лице супругов Лазаренко подарила миру уникальное открытие – электроэрозионную обработку. ЭЭО совместными усилиями ученых и инженеров России, стран СНГ, зарубежных коллег из стран Европы, Америки и Азии превратилась в мощное средство современной металлообработки, заняла прочное место во многих отраслях мировой промышленности (электронной, аэрокосмической, приборостроительной, инструментальной и др.).

Оценивая вероятные направления развития обработки твердых тел, можно утверждать, что в XXI веке требования повышения точности и производительности останутся по-прежнему актуальными. Видимо, это будет уже нанометровая область размеров проникновения в которую, безусловно, вызовет необходимость поиска принципиально новых качественных конструкторских и технологических решений.

Достойное место в будущем займет и решение задачи целенаправленного управления свойствами и качеством поверхностного слоя обрабатываемой ЭЭО детали (твердости, износостойкости и т. п.) как во времени, так и в пространстве.

Можно назвать еще ряд направлений дальнейшего развития технологии и станков ЭЭО, например: совмещение в зоне обработки концентрированных потоков энергии различного происхождения

(искра, лазер и т.п.); целенаправленное управление износом электрода-инструмента (изменение плотности энергии на любом из электродов независимо друг от друга) и т.д. Решение этих задач потребует создания систем комплексной автоматизации всех элементов процесса ЭЭО, которое в свою очередь требует существенного расширения функций системы технологической подготовки ЭЭО (АСТП ЭЭО) за счет расширения числа решаемых ею задач.

Для достижения этой цели необходимо получение новой физико-технологической информации для организации соответствующих банков данных и обеспечения информацией модулей, входящих в АСТП. Решение этих вопросов (технические возможности развития АСТП и т. д.) со всей очевидностью требует организации и проведения широких и планомерных исследований самого технологического процесса электроэрозионной обработки. Этот вывод подтверждается и тем, что за рубежом (США, Япония, Голландия, Франция, Швейцария) ясно заметна названная выше тенденция, иными словами, необходимо срочно разворачивать работы по созданию научных (а не чисто эмпирических) основ технологии ЭЭО.

К сожалению, приходится констатировать, что если в области физических основ рабочего процесса формообразования ЭЭО мы располагаем вполне оформившимися и признанными в мире результатами, имеющими фундаментальное значение, то в области технологии ЭЭО царит эмпирический подход, что не удовлетворяет как современным, так и будущим требованиям развития промышленного производства. Создание научных основ технологии (хотя бы на аксиоматико-логической базе) крайне необходимо для формализации процесса проектирования технологии как основы развития САПР ЭЭО, а также систем управления технологическим процессом (САУТП ЭЭО). Кроме того, необходимо развивать специальную измерительную базу для активного контроля и коррекции технологических процессов и его отдельных элементов, а также создавать и развивать системы обработки текущей информации, действующие на базе систем типа «искусственный интеллект».

Есть еще одна, острая проблема, которая будет существовать и в XXI веке – кадровая. Успешное развитие и полезное использование любых новых технических идей, как известно, в сильной степени зависит от уровня квалификации и того, насколько комплексным мышлением обладает тот или иной специалист. Почти сорокалетний опыт работы в высшей школе автора данной статьи показывает, что мало просто подготовить отлично знающего дело специалиста в области электрофизических методов обработки: технолога, конструктора или инженера-исследователя. Этот специалист должен обладать широким кругозором в области машино- и приборостроения, уметь видеть возможные области использования электрофизических методов обработки сегодня и в перспективе, уметь убеждать своих коллег в инженерной, экономической целесообразности использования ЭЭО в конкретной производственной ситуации. Эти качества должны воспитывать у студента преподаватели вузов. Только такие специалисты найдут себе применение в современных условиях в промышленности.

В заключение следует сказать: весь ход развития электроэрозионной обработки за прошедшие 60 лет подтвердил пророческие слова Б.Р. Лазаренко, которые он произнес на защите докторской диссертации в 1947 г., говоря об ЭЭО; «... не может быть причин, которые бы приостановили развитие и движение этого революционного процесса, ломающего существующие представления об обработке материалов. Ему принадлежит будущее...!».

Поступила 17.04.03

Summary

In April 1943 the Russian scientists B.R. Lazarenko and N.I. Lazarenko, the married couple, has made remarkable discovery as to its importance for science and manufacturing engineering practice. Methods of dimensional machining as well as directional change of the current – conducting material surface properties, based on the absolutely new principles, were created. B.R. Lazarenko and N.I. Lazarenko offered to use an effect of electric erosion for removal of allowance from a blank or alloying the surface (a. c. 70010 and others (1943–1945); patents: France (1946), Great Britain (1946), USA (1946), Sweden (1946), Switzerland (1946). During 60 years of electrodischarge machining development, the two main types of machines which found wide and stable application in industry were designed: copying – broaching; cut out with tool – electrode, which permit machining all surface types used in machine building and instrumental production. The modern ED machines have automatic system of EDM process regulation and are characterized by high accuracy and range of machined surface forms. However the requirements for efficiency increase and accuracy are among the main conditions of subsequent progress as they were before. All progress of EDM development during the past 60 years confirmed B.R. Lazarenko's words that he said about EDM during defence of his doctor thesis in 1948 ... «there are no reasons which would stop development and progress of this revolutionary process, which turn upside-down the modern conception of machining materials. Future belongs to it...!»

ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ТОКА С ОБРАТНЫМ ИМПУЛЬСОМ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ*

*Технологическая научно-исследовательская лаборатория
по очистке сточных вод и получению покрытий,
ул. Некулче, 10, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова*

При электрохимическом осаждении металлических покрытий и растворении поверхностей, например, деталей машин и инструмента, происходит рост кристаллов металлов или ионизация их атомов по различным механизмам, исследование которых включает в себя оценку атомных, структурных и энергетических факторов, позволяющих формировать будущие технологические свойства обрабатываемой поверхности.

Как показали исследования, при восстановлении деталей машин железением можно чисто электрическим путем создавать определенные условия для зарождения (рис. 1,а), роста кристаллов (рис. 1,б) и получать покрытия требуемой структуры от волокнистого до слоистого строения (рис. 1,в) и заданных физико-механических свойствах.

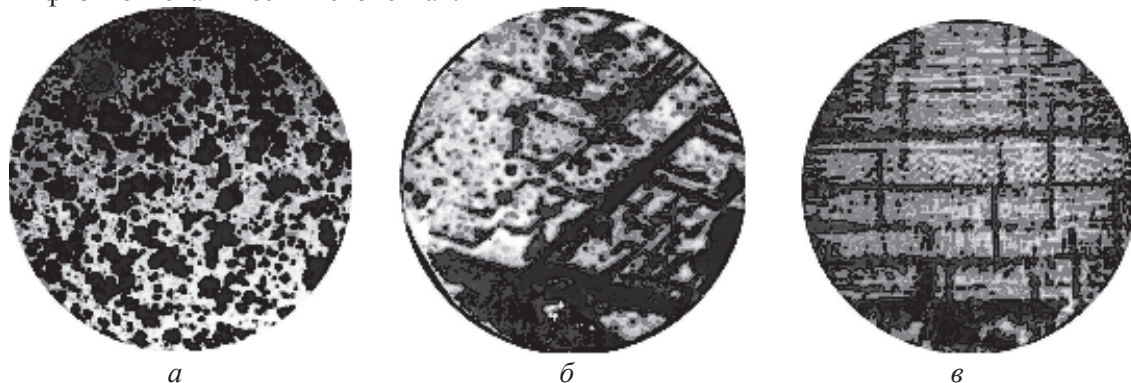


Рис.1. Микрофотографии поверхностей электродов при зарождении (а) и росте кристаллов железа (б), а также поперечного среза покрытия (в), полученного с использованием периодического тока двух фаз с обратным импульсом при амплитудной плотности тока прямого импульса $D_k = 30 \text{ A/дм}^2$ и ступенчатом увеличении плотности тока обратного импульса в течение одного часа от $0,1 D_k$ до $0,7 D_k$ в 1 н. растворе FeSO_4 при $T=298 \text{ K}$

Выбор желаемых условий электроосаждения покрытий неразрывно связан с исследованием кинетики быстрых процессов, протекающих в системе электрод–электролит, и получением количественных характеристик процесса. Некоторые показатели оказалось возможным получить дополнительно при быстром разрыве цепи поляризующего периодического тока во время следования прямого и обратного импульсов и использовании стандартного временного масштаба.

Для разнообразия условий протекания электродных процессов при исследованиях применялись известные и вновь разработанные нами формы кривых изменений во времени периодического тока с обратным импульсом, полученные путем преобразования тока одной, двух и трех фаз (рис. 2) промышленной частоты; для быстрого разрыва электрической цепи применялось специально разработанное тириatronное реле [1]. Время протекания процесса фиксировалось с точностью $\pm 0,001 \text{ с}$ в результате того, что интервал времени протекания одной полусинусоиды делился на 10 равных частей. Составы растворов и другие условия аналогичны изложенным в работе [2].

* Доклад на заседании Международной школы-семинара по прикладной электрохимии и электрическим методом обработки материалов “Петровские чтения” 24 июня 2002 г.

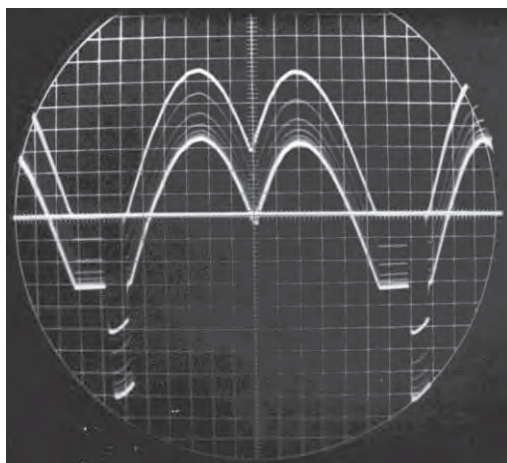


Рис. 2. Оциллограмма кривой изменения во времени периодического тока трех фаз регулируемого по амплитуде и длительности протекания обратного импульса

Экспериментальные исследования показали, что после быстрого разрыва внешней электрической цепи во время следования прямого и обратного импульсов независимо от формы кривой поляризующего тока потенциалы электрода с течением времени смещаются в противоположенных направлениях (рис. 3), часто до слияния в одну линию.

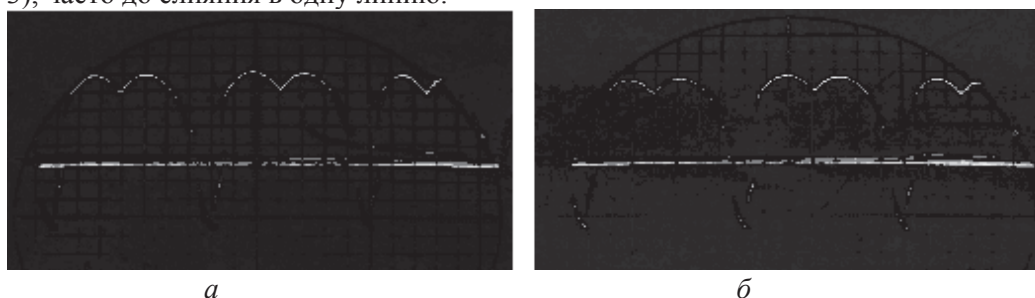


Рис. 3. Оциллограммы изменения потенциалов железного электрода после разрыва поляризующей электрической цепи во время следования прямого (а) и обратного (б) импульсов в 1 н. растворе H_2SO_4 при $T = 298 K$

Эффект встречного смещения кривых изменения потенциалов в исследованных условиях свидетельствует о присутствии в зоне реакций зарядов (ϵ) разных знаков, о полной перезарядке емкостей поверхностей раздела электрод–раствор в течение каждого периода тока (при частоте 50 Гц), что подтверждается изменением знака заряда от $\epsilon > 0$ к $\epsilon < 0$ или, наоборот, при переходе потенциала через определенный уровень.

Величина потенциала, при которой происходит встреча кривых $\varphi - t$, потенциал–время, следующих от прямого и обратного импульсов, соответствует потенциалу обращения или нулевого заряда поверхности электрода ($\varphi_{\epsilon=0}$) в любой шкале отсчета [2]. Таким образом, показано, что знак заряда и величина заряда емкости д.э.с. и псевдоемкости зависят от направления и величины отклонения потенциала электрода (φ) от нулевой точки (т.н.з.) в чистом растворе или от потенциала нулевого заряда поверхности электрода ($\varphi_{\epsilon=0}$) в растворе, содержащем, например, поверхностно-активные вещества.

Величина заряда поверхности электрода, с одной стороны, численно равна площади под C, φ – кривой; в интервале между $\varphi_{\epsilon=0}$ и φ_k она может быть определена из известной зависимости [3]:

$$\epsilon = \int_{\varphi=0}^{\varphi_k} C \cdot d\varphi, \quad (1)$$

с другой стороны, этот заряд двойного электрического слоя (д.э.с.) также можно оценить, используя известный закон изменения, например, синусоидального тока одной фазы $i = I_m \sin \omega t$ и заряда $d\epsilon = idt$ с течением времени t . В результате получаем зависимость:

$$\epsilon = I_m \int_{\omega t_1}^{\omega t_2} \sin \omega t \cdot dt. \quad (2)$$

Приравнивая правые части уравнений (1) и (2), находим выражения:

$$C = \frac{I_m \int_{\omega t_1}^{\omega t_2} \sin \omega t \cdot dt}{\varphi_k - \varphi_{\varepsilon=0}}, \quad (3)$$

где C – емкость поверхности раздела металл–раствор; I_m – амплитудное значение поляризующего тока; ω – частота использованного тока; t – текущее время; $\varphi_k - \varphi_{\varepsilon=0}$ – потенциал, отсчитанный от потенциала нулевого заряда; φ_k – конечное значение электродного потенциала, принятое с учетом сдвига фаз между током и напряжением ($\approx 45^\circ$); t_1 и t_2 – начальное и конечное время заряжения системы электрод–электролит (при $D \leq t_1 \leq t_2 \leq T$).

Как следует из [3], величины интегральной (C_u) и дифференциальной (C_d) емкостей в точке нулевого заряда должны быть равны между собой, то есть $C_u = C_d$, однако их численное значение остается неизвестным. К тому же принятое в литературе разделение емкостей, как показал П. Делахей [4, 5] является условным.

При периодическом окислении и восстановлении электрода происходит предварительная анодная или катодная подготовка, чем создается воспроизводимое состояние его поверхности. В этих условиях различие размеров диполей раствора и металла, участвующих в процессе заряжения емкости двойного электрического слоя ($C_{д.э.с.}$), приводит к тому, что даже при прочих равных условиях (равных потенциалах) величина емкости электрода в катодном процессе (C_k) не может быть равна величине емкости, образованной при анодном процессе (C_a).

Согласно сложившимся представлениям, уменьшение заряда д.э.с. электрода до нулевого значения ($\varepsilon = 0$) (как со стороны области отрицательных, так и положительных зарядов) приводит к установлению чисто электростатического взаимодействия поверхности электрода и раствора, свидетельствующего о приближении к потенциалу нулевого заряда $\varphi_{\varepsilon=0}$ и образовании у поверхности нулевого раствора. Принято считать, что в нулевой точке одна из составляющих потенциала, связанная с током обмена, равна нулю. Составляющая, возникающая за счет ориентации диполей металла и раствора, не равна 0 и ее появление, согласно А. Антропову, Дж. Бокрису и др., обязано различию между электрическими центрами тяжести ионов и электронов в поверхностном слое [6, 7].

Результаты исследований показывают, что по мере смещения потенциала электрода в электроотрицательную сторону относительно стационарного потенциала протекает десорбция анионов с поверхности, например, железного электрода, и происходит уменьшение его положительного (относительно $\varphi_{\varepsilon=0}$) заряда.

Как следует из экспериментальной шкалы распределения потенциалов (рис. 4), при этом могут продолжаться реакции окисления железа и происходить переходы ионов в раствор, вплоть до достижения потенциалом электрода барьерного значения, не равного $\varphi_{\varepsilon=0}$.

Исследования показали, что в случае использования в электродном процессе синусоидального переменного тока одной фазы происходит смещение среднего за период значения потенциала φ_{cp} в электроотрицательную сторону относительно $\varphi_{\varepsilon=0}$ на некоторую величину $\Delta\varphi_{cp} = \varphi_{cp} - \varphi_{\varepsilon=0}$ (рис. 4). Сдвиг среднего значения потенциала (φ_{cp}) к $\varphi_{\varepsilon=0}$ путем наложения на переменный ток компенсирующего постоянного тока обратной полярности приводит к совмещению этих потенциалов $\Delta\varphi_{cp} = 0$, регистрируемая величина силы налагаемого тока численно равна току фарадеевского выпрямления, который может быть оценен и расчетным путем.

Если допустить, что функция изменения тока во времени может быть представлена в виде степенного ряда, то, пренебрегая гармониками высшего порядка, постоянную составляющую можно представить в виде [3]:

$$i_{ф.в.} = i_o \cdot |\alpha - 0,5| \cdot \frac{n^2 F^2 (\varphi_{cp} - \varphi_{\varepsilon=0})}{2R^2 T^2}, \quad (4)$$

где $i_{ф.в.}$ – соответствует величине тока фарадеевского выпрямления; i_o – ток обмена; n – валентность ионов; F – число Фарадея; R – газовая постоянная; T – температура электролита; α – коэффициент переноса; φ_{cp} – среднее значение размаха потенциала электрода.

Метод исследования кинетики с использованием формулы (4), предложенный К. Доссом и Н. Агарваллом [8], предусматривает регистрацию величины смещения среднего за период значения, например, катодного потенциала электрода относительно обычно измеряемого стационарного потенциала ($\varphi_{ст.}$). При переходе через него, как предполагалось, изменяется знак заряда емкости на противоположный и процесс осаждения заменяется окислением. При этом становится неясным в какой период и в чем проявляется эффект фарадеевского выпрямления, когда не учитываются две противоположенные реакции окисления и восстановления ионов.

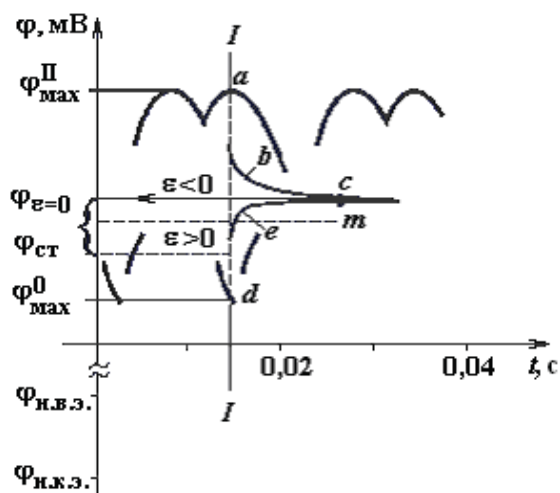


Рис. 4. Шкала распределения потенциалов железного электрода в 1N, растворе $FeSO_4$ при $T=298\text{ K}$ (при использовании тока одной фазы промышленной частоты), где φ_{\max}^k – максимальная величина потенциала в катодной части цикла; $\varphi_{ср1}$ – средняя за период величины потенциала электрода; $\varphi_{\varepsilon=0}$ – величина потенциала нулевого заряда поверхности электрода; $\varphi_{ст}$ – величины стационарного потенциала электрода; φ_{\max}^a – максимальная величина потенциала электрода в анодной части цикла

Предлагаемое уточнение потенциала сравнения, по нашему мнению, более полно отвечает реальности и протекающим в системе электрод-раствор физико-химическим процессам. Сравнения величин, измеренных прибором компенсирующего тока и тока фарадеевского выпрямления, определенного с использованием формулы (4), дают расхождения не превышающие $5 \div 8\%$.

Величину коэффициента переноса (α) можно определить путем катодных и анодных процессов по максимальным значениям прямого ($\Delta\varphi_{\max}^k$) и обратного ($\Delta\varphi_{\max}^a$) импульсов поляризации или по мгновенным значениям в моменты противофаз, то есть при ωt_1 и $\omega t_1 + \pi$ (принятым на восходящих или нисходящих ветвях полусинусоид напряжений) из следующей зависимости:

$$\Delta\varphi_{\omega t_1}^k = \left| \frac{\alpha - 1}{\alpha} \right| \cdot \Delta\varphi_{\omega t_1}^a + \pi, \quad (5)$$

где α – коэффициент переноса, оценивающий часть энергии д.э.с., которая затрачивается на совершение прямой реакции. Он является аналогом к.п.д. катодного процесса и может служить экономической характеристикой (при применении действующих значений напряжений, активного и реактивного токов); $\Delta\varphi_{\omega t_1}^k$ и $\Delta\varphi_{\omega t_1}^a$ – потенциалы, отсчитанные от $\varphi_{\varepsilon=0}$.

Умножив левую и правую части уравнения (5) на мгновенное значение силы тока (I), получим величину мгновенной мощности, где α будет являться коэффициентом мощности, характеризующим степень воздействия электрического поля электрода на активацию электрохимической стадии реакции.

Теоретические расчеты показали, что для электрохимического процесса, подчиняющегося уравнению Тафеля, величина амплитуды переменного синусоидального напряжения, наложенного на электрод,

$$U_m = 0,74 b, \quad (6)$$

отсчитанная от потенциала нулевого заряда его поверхности, соответствует значению (b – постоянная величина уравнения Тафеля), при котором на электроде не должна протекать электрохимическая реакция; для Fe^{2+} при стандартной температуре $T = 298\text{ K}$ величина $U_m^k = 50\text{ мВ}$, $U_m^a = 38\text{ мВ}$.

Оценка величины коэффициента переноса, произведенная с использованием формулы (5), показала, что для Fe^{2+} $\alpha = 0,43$, а для Fe^{3+} – $0,40$.

В реальных условиях электроосаждения железа смещение потенциала электрода в электроотрицательную сторону относительно $\varphi_{\varepsilon=0}$, по-видимому, сопровождается зарядением образующейся при этом емкости поверхности раздела металл-раствор и последующим (при $\varphi > U_m$) разрядом ионов металла и водорода. Согласно характеру изменения кривой спада потенциала во времени после разрыва поляризующей цепи в начале происходит быстрый разряд (от 1 до $3 \cdot 10^{-3}$ с) псевдоемкости. В связи с уменьшением потенциала реакция переноса заряда замедляется, и со временем устанавливается извест-

ное равенство токов обмена, их разность принимает нулевое значение ($\bar{i} - \bar{i} = 0$), и около электрода образуется и кратковременно существует нулевой раствор, что подтверждается экспериментально. Механизм влияния потенциала нулевого заряда на увеличение твердости и прочности металла, отмечавшееся ранее, требует постановки дополнительных исследований.

Выводы

Предлагаемый способ прямого измерения потенциала нулевого заряда электрода открывает дополнительные возможности в исследовании кинетики электродного процесса в различных условиях электролиза. Способ позволяет фиксировать отдельные закономерности стадии перехода электрода из одного состояния в другое и соответствующие им потенциалы.

Экспериментально показано существование границы перехода металлического электрода от положительного заряда к отрицательному. Представлена количественная интерпретация зависимости заряда и емкости системы электрод–раствор с учетом нулевого заряда; получена формула для определения коэффициента переноса при поляризации электрода периодическим током с обратным импульсом. Дана оценка адсорбционного равновесия находящихся в растворе частиц при нулевом заряде поверхности электрода. Теоретически установлена величина порогового значения перенапряжения, при котором подчиняющиеся уравнению Тафеля электрохимические реакции не должны протекать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Косов В.П., Зайдман Г.Н., Петров Ю.Н., Белонучкин П.П. Тиратронное реле, применяемое при осциллографическом изучении электродных процессов // *Электронная обработка материалов*. 1965. № 5–6. С. 183 – 184.
2. Косов В.П. Способ определения потенциала нулевого заряда электрода // *Электронная обработка материалов*. 2002. № 5. С. 63–66.
3. Дамаскин Б.Б., Петрий О.А. Введение в электрохимическую кинетику. М., 1975.
4. Delahay P., Senda M., Weis C.H. // *J. Am. Chem. Soc.* 1961. V. 83. P. 31 – 32.
5. Senda M., Delahay P. // *J. Phys. Chem.* 1961. V. 65. P. 1580.
6. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. М., 1975. С. 267.
7. Бокрис Д., Конуэй Б. Современные аспекты электрохимии. М., 1967.
8. Doss K.S.G. Agarwal H.P. // *Proc. Indian-Akad. Sci.* 1951. 34A. P. 263. 1952. 35A. P. 45.

Поступила 05.02.03

Summary

The possibility of application of direct determination of a zero charge potential of an electrode surface has been shown at research of kinetics of non-stationary electrode processes. The given method allows to establish of law of transition of an electrode from a positive charge to negative charge in time scale and vice versa. The quantitative interpretation of connection of a charge with capacity of system electrode/solution is submitted in view of the amendment, which is taking into account influence of potential of a zero charge of a solid metal electrode on process of the charge-discharge. The equation for definition of transfer coefficient has been received at polarization of an electrode by a periodic current. The estimation of size of threshold value of overvoltage, at which the electrochemical reactions, submitting to Tafel's equation, should not proceed neither in cathode, nor in anode area, has been given. The possibility of establishment of adsorption balance of the charged particles in solution and on electrode surface is revealed.

С.В. Коваленко, С.В. Николенко, А.Д. Верхотуров, В.С. Куценко

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭИЛ ВРАЩАЮЩИМСЯ ТОРЦЕВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

*Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН
ул. Тихоооксанская, 153, г. Хабаровск, 680042, Россия*

Введение

На эффективность процесса электроискрового легирования (ЭИЛ) [1, 2] влияет большое число факторов (механических, электрических, межэлектродной среды и др.), изменение которых в процессе работы механизированных установок способствуют изменению стабильности, технологических показателей процесса, снижению повторяемости получаемых результатов.

Если электрические параметры механизированных установок в целом достаточно разносторонне исследованы [3 – 6], то изучение влияния их механических параметров на формирование легированного слоя (ЛС), в частности, при использовании вращающегося торцевого электрода в качестве рабочего инструмента, носит разрозненный характер [7, 8].

При механизированном ЭИЛ цилиндрических деталей решающую роль играет правильный подбор скорости вращения легируемой детали и подачи легирующего электрода вдоль образующей поверхности детали.

Из данных [3] установлено, что каждый рабочий режим ЭИЛ имеет оптимальную линейную скорость, подачу и производительность процесса. Автором [3] найдены лучшие сочетания величин окружной скорости упрочняемой детали, продольной подачи электрода и его рационального охлаждения, осуществлена увязка этих величин с мощностью и возможной производительностью рабочих режимов электроискровых аппаратов. Задача решалась для сильноточных режимов генераторов импульсов с использованием в качестве электрода-инструмента электромагнитного вибратора.

Авторами [4] также проводились исследования технологических режимов «чистового» механизированного ЭИЛ с использованием электромагнитного вибратора, однако скорость вращения образцов неизвестного диаметра выражалась частотой их вращения, что затрудняет дальнейшее применение этих результатов на практике.

Предпринимались многочисленные попытки оптимизировать процесс ЭИЛ на механизированных установках с применением многоэлектродных головок [5], которые ввиду сложностей в их эксплуатации не нашли широкого применения.

В работе [9] Н.И. Лазаренко установлено, что равномерные по толщине и сплошности слои могут быть получены при смещении обрабатываемого электрода на 1/4 диаметра эрозионной лунки, что вызывает необходимость проводить процесс с определенной оптимальной скоростью перемещения анода вдоль обрабатываемой детали. Автором [10] при механизированном ЭИЛ вибрирующим электродом-инструментом была реализована идея продольного перемещения легирующего электрода на 1/4 его диаметра и определена оптимальная форма электрода – прямоугольник сечением 3–4 диаметра эрозионной лунки, предложена методика определения диаметра лунки по режиму обработки и температуре плавления материалов электродов.

Сказанное справедливо для вибрационного способа ЭИЛ. При безвибрационном ЭИЛ с использованием вращающегося торцевого электрода и следящей системы за поддержанием стабильного межэлектродного промежутка в разрядном контуре, распределение состоявшихся электроискровых

импульсов по поверхности катода носит случайный характер, связанный с неоднородностью и микронеровностью соприкасаемых поверхностей. На формирование легированного слоя существенное влияние оказывают, кроме того, чувствительность следящего устройства и частота вращения легирующего электрода [6, 8]. Но систематизированных данных по исследованию данного вопроса и технологических рекомендаций по проведению процесса легирования в литературе не обнаружено.

Поэтому представляет определенный интерес рассмотреть взаимосвязь и влияние механических параметров при ЭИЛ на созданной механизированной установке IMES-1001 с вращающимся торцевым электродом (МУВТЭ) на формирование и характеристики ПС, чему и посвящена данная работа.

Методика

Исследовался процесс формирования ЛС и его свойства при ЭИЛ на МУВТЭ IMES-1001 с генератором импульсов Элитрон-22А.

В ходе экспериментов определено взаимное влияние параметров установки на формирование ЛС. Материалом подложки-катода выбрана широко применяемая углеродистая конструкционная сталь 35, материал электрода – стандартный твердый сплав ВК8. Размеры обрабатываемых образцов устанавливались исходя из соображения экономии материала и удобства проведения исследований. Диаметр обрабатываемой детали $d_{дет} = 12$ мм, длина обрабатываемой поверхности $l = 5,3$ мм, ее площадь $F = 2$ см².

Электрические параметры ЭИЛ во время проведения исследований постоянные. Настройка следящей системы за поддержанием постоянного межэлектродного промежутка производилась по максимально стабильному наибольшему значению рабочего тока для заданного режима в разрядном контуре. При использовании генератора импульсов Элитрон-22А на режиме 3 значение тока составляло $I_p = 1,3 \pm 0,2$ А.

На рис.1 приведена схема установки для механизированного электроискрового легирования торцевым вращающимся электродом.

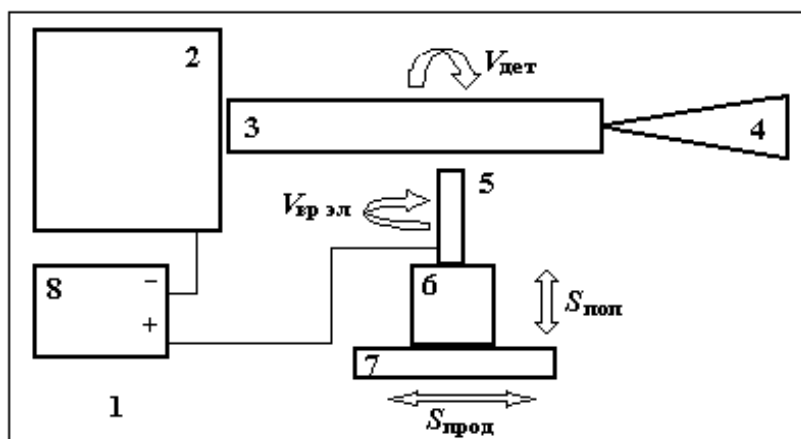


Рис. 1. Схема установки механизированного ЭИЛ IMES-1001: 1 – база токарного станка; 2 – изолированный кулачковый патрон; 3 – легируемая деталь; 4 – изолированная задняя бабка; 5 – торцевой вращающийся электрод; 6 – механизированная головка с суппортом станка; 7 – следящая система; 8 – генератор импульсов; $V_{вр.эл}$ – скорость вращения электрода; $V_{дет}$ – скорость вращения детали; $S_{поп}$ – поперечная подача; $S_{прод}$ – продольная подача

В процессе ЭИЛ определялось изменение массы катода и эрозия анода от удельного времени и других параметров легирования. Кроме того, проводились металлографические исследования поперечных срезов упрочняемых образцов. Эффективность процесса формирования ЛС и ЭИЛ рассчитывались по формулам $\gamma = \sum \Delta_k \cdot K \cdot t_x$ и $\gamma' = \sum \Delta_k \cdot K \cdot t_x K^{упр}$, где t_x – порог хрупкого разрушения ЛС, определяемый временем обработки, при котором впервые фиксируется отрицательный удельный привес катода Δ_k , K – средний коэффициент переноса, равный отношению Δ_k / Δ_a , (Δ_a – эрозия анода за каждую минуту легирования), $K^{упр}$ – коэффициент упрочнения, равный $K^{упр} = H_{\mu}^{ЛС} / H_{\mu}^{ОСН}$, где $H_{\mu}^{ЛС}$ и $H_{\mu}^{ОСН}$ – микротвердость ЛС и основы соответственно [2, 11].

Формирование ЛС ЭИЛ на МУВТЭ при прочих равных условиях зависит от взаимного влияния линейной скорости вращения легируемой детали, скоростей перемещения и вращения легирующего

щего электрода, работы следящей системы за поддержанием определенного межэлектродного промежутка, а также от энергетических параметров генератора электрических импульсов, состава окружающей среды и времени легирования, приведенного к единице обрабатываемой площади, то есть удельного времени обработки.

Ограничимся рассмотрением оптимальных механических параметров механизированной установки для ЭИЛ: линейная скорость вращения легируемой детали, продольная подача вращающегося торцевого электрода и скорость вращения последнего при определенном времени обработки. Узел следящей системы выполняет роль поперечной подачи электрода.

Из формулы определения линейной скорости:

$$V = \pi \cdot D \cdot n \text{ (мм/мин)}, \quad (1)$$

где D – диаметр легируемой детали (мм), n – скорость вращения шпинделя (легируемой детали) (об/мин) определим частоту вращения детали:

$$n = \frac{V}{\pi \cdot D} \text{ (об/мин)}. \quad (2)$$

Время, необходимое для обработки поверхности детали [12], определяется как:

$$T_m = \frac{L}{n \cdot S_{об}} \cdot i \text{ (мин)}, \quad (3)$$

где L – полная длина хода легирующего электрода, (мм), $S_{об}$ – подача за оборот вращения шпинделя (мм/оборот), i – число проходов, откуда

$$S_{об} = L/T_m \cdot n \text{ (мм/об)}. \quad (4)$$

Рассмотрим приведенные на рис.2 схемы обработки поверхностей тел вращения при механизированном ЭИЛ.

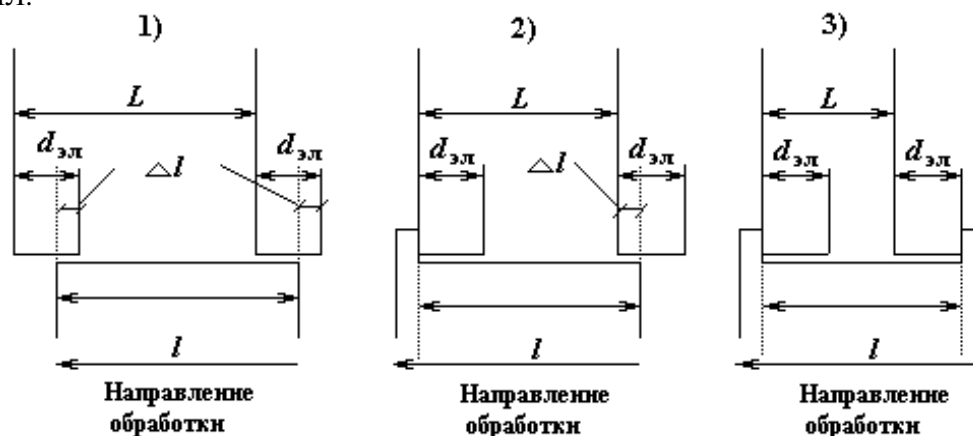


Рис. 2. Схемы обработки поверхностей тел вращения при механизированном ЭИЛ

1) Обработка детали на проход

$$T_m = \frac{l}{n \cdot S_{об}} \cdot i \text{ (мин)}. \quad (5)$$

2) Обработка детали до упора

$$T_m = \left(\frac{l}{n} + \frac{l - \Delta l}{n \cdot S_{об}} \right) \cdot i \text{ (мин)}, \quad (6)$$

где l/n – время за один оборот детали без подачи (мин).

3) Обработка детали, ограниченной двумя буртами или размерами

$$T_M = \left(\frac{l}{n} + \frac{l - d_{эл}}{n \cdot S_{об}} + \frac{l}{n} \right) \cdot i \text{ (мин)}. \quad (7)$$

Остановимся на первой схеме, так как наибольший интерес представляет время обработки заданной длины.

При обработке детали на проход при механизированном ЭИЛ из условий, обеспечивающих полную обработку ее поверхности без пропусков, выбирается некоторая величина захода электрода Δl , необходимая для предотвращения прижога кромок. Максимальное значение возможной величины пропуска будет при $0,5n$, то есть при $0,5S_{об \max}$. Следовательно, для покрытия поверхности детали без пропусков должно выполняться условие: $0,5S_{об \max} > \Delta l$, или $\Delta l < 0,5 S_{об \max}$ (мм).

Коэффициент перекрытия выбран экспериментально равным $K = 1,25$. При механизированном ЭИЛ максимально допустимую подачу $S_{об \max}$ принимаем с учетом выбранного коэффициента перекрытия K и диаметра вращающегося электрода $d_{эл}$, равного:

$$d_{эл} = K \cdot S_{об \max} \text{ (мм)}, \quad (8)$$

где $S_{об \max}$ – максимально возможная подача (мм/об).

$$S_{об \max} = \frac{d_{эл}}{K} = \frac{d_{эл}}{1,25} = 0,8 \cdot d_{эл} \text{ (мм/об)}, \quad (9)$$

следовательно, величина захода электрода $\Delta l < 0,5 \cdot S_{об \max}$ или $\Delta l < 0,4d_{эл}$.

Из выполнения этого условия выбираем

$$\Delta l = 0,25d_{эл} \text{ (мм)}. \quad (10)$$

Подача в минуту $S_{мин}$ и подача за оборот $S_{об}$ вращения шпинделя находятся в зависимости

$$S_{мин} = S_{об} \cdot n, \quad (11)$$

Для исследований процесса ЭИЛ с учетом известного опыта трудностей изготовления и эксплуатации вращающихся электродов малого диаметра выбран диаметр электрода 3 мм.

При механизированном ЭИЛ удельное время легирования ($t_{уд}$) рассматриваем за один проход. Тогда требуемая подача для ЭИЛ определится по формуле (4):

$$S_{об \text{ треб}} = L/T_{\text{треб}} \cdot n \text{ (мм/об)},$$

где $T_{\text{треб}}$ – требуемое время ЭИЛ данной детали (мин);

При обработке детали на проход при механизированном ЭИЛ: $L = 1$.

Рассмотрим взаимосвязь некоторых условий формирования ЛС на МУВТЭ.

1) Требуемое время ЭИЛ данной детали $T_{\text{треб}} = T_M$:

$$T_{\text{треб}} = \frac{l}{n \cdot S_{об \text{ треб}}} \text{ (мин)}. \quad (12)$$

2) Требуемая подача при ЭИЛ данной детали:

$$S_{об \text{ треб}} = \frac{l}{T_{\text{треб}} \cdot n} = \frac{l \cdot \pi \cdot D}{T_{\text{треб}} \cdot V} = \frac{F}{T_{\text{треб}} \cdot V} = \frac{1,0}{t_{уд} \cdot V} \text{ (мм/об)}, \quad (13)$$

где F – площадь легируемой поверхности (см^2); $t_{уд}$ – удельное время легирования (мин/см^2).

Таблица 1. Влияние механических параметров механизированной установки для ЭИЛ вращающимся торцевым электродом на формирование поверхностного слоя (IMES-1001 ($V = 7,5$ см/мин, $S_{об} = 1,33$ мм/об, $N_{эл} = 3000$ об/мин), Элитрон-22А ($I_p = 1,3$ А, $U_{xx} = 40$ В, $C = 360$ мкФ))
Катод – сталь 35, анод – ВК8

Число оборотов детали n , об/мин	Линейная скорость вращения детали V , см/мин	Удельное время ЭИЛ $t_{уд}$, мин/см ²	Суммарный привес катода, $\times 10^{-4}$ см ³	Суммарная эрозия анода, $\times 10^{-4}$ см	Сплошность ЛС, %	Толщина ЛС, мкм	Микротвердость ЛС, ГПа	Коэффициент упрочнения $K_{упр}$	Эффективность процесса, см ³ /мин	
									формирования ЛС $\gamma \cdot 10^{-4}$	ЭИЛ $\gamma' \cdot 10^{-4}$
<i>Влияние скорости вращения детали ($S_{об} = 1,33$ мм/об, $N_{эл} = 3000$ об/мин)</i>										
1	3,8	2	1,71	2,6	98	13	9,8	4,45	2,25	10,01
2	7,5	1	1,1	1,61	94	12	9,4	4,27	1,53	6,53
3	11,3	0,7	0,58	1,27	80	8	9,33	4,24	0,53	2,25
5	18,8	0,4	0,26	0,65	63	6	6,87	3,12	0,21	0,66
<i>Влияние продольной подачи электрода ($V = 7,5$ см/мин, $N_{эл} = 3000$ об/мин)</i>										
0,66	1,33	2,0	2,19	3,32	99	13	11,84	5,38	2,89	15,55
1,33	2,65	1,0	1,1	1,61	94	12	9,4	4,27	1,53	6,53
1,99	3,98	0,7	0,75	1,23	90	10	8,64	3,93	0,46	1,81
<i>Влияние скорости вращения электрода ($V = 7,5$ см/мин, $S_{об} = 1,33$ мм/об)</i>										
1500	0,86	1,13	1,0	0,76	94	10	9,2	4,18	0,65	2,72
3000	1,1	1,61	1,0	0,79	94	12	9,4	4,27	1,53	6,53
4500	1,44	1,8	1,0	0,8	95	14	10,6	4,82	2,3	11,09

Приведенные формулы выражают взаимозависимость скорости вращения детали и продольного перемещения легирующего электрода от времени обработки при указанном диаметре последнего. При выявлении наилучших показателей механических параметров априори определялась скорость вращения детали в диапазоне 1 – 5 об/мин при среднем значении продольного перемещения легиру-

ющего электрода. Средняя подача $S_{об} = 1,33$ мм/об, соответствующая удельному времени легирования $t_{уд} = 1$ мин/см², принималась из условия максимально возможной, равной из (9):

$$S_{об\ max} = \frac{d_{эл}}{K} = 0,8 \cdot d_{эл} = 2,4 \text{ (мм/об)}.$$

Частота вращения электрода $N = 3000$ об/мин выбрана согласно данным [6].

Критерием выбора наилучших механических параметров ЭИЛ являются сплошность, толщина, микротвердость ЛС при определенном удельном времени обработки.

Наилучшая продольная подача легирующего электрода при механизированном ЭИЛ (на один оборот детали) выбрана из $S_{об} = (0,66, 1,33, 1,99)$ мм/об, что соответствует перемещению электрода на $(0,22, 0,44, 0,66)$ его диаметра при оптимальной скорости вращения детали и удельном времени обработки $t_{уд} = (2,0; 1,0; 0,7)$ мин/см² заданной площади поверхности.

Наиболее оптимальная частота вращения электрода определялась в пределах ее изменения $N_{эл} = (1500, 3000, 4500)$ об/мин при найденных оптимальных значениях вращения детали и перемещения электрода.

Результаты

Анализ результатов исследований, приведенных в табл.1, показывает, что увеличение линейной скорости при ЭИЛ ведет к снижению качества легируемой поверхности, а чрезмерное уменьшение – к весьма длительному времени обработки, поэтому оптимальными являются скорость, равная 7,5 см/мин, и продольная подача $S_{об} = 1,33$ мм/об (перемещение на 0,44 диаметра электрода).

Наилучшие показатели толщины, твердости и сплошности полученного слоя достигнуты при частоте вращения легирующего электрода $N_{эл} = 4500$ об/мин. Это объясняется увеличением общего количества электрических разрядов (уровень среза > 10% амплитуды) при увеличении частоты вращения легирующего электрода. Данные проведенных исследований распределения разрядных импульсов тока по амплитуде в зависимости от частоты вращения легирующего электрода приведены в табл. 2.

Ступенчатый амплитудный анализ (через каждые 10% уровня) не выявил пропорциональной зависимости изменения количества импульсов каждой ступени от частоты вращения электрода, что объясняется случайным характером возникновения контактных площадок в связи с неоднородностью поверхностей легирующего электрода – анода и детали – катода, при котором время заряда и разряда накопительной емкости определяется размером и плотностью распределения микровыступов на электродах.

Таблица 2. Зависимость амплитуды импульсов электрического тока в разрядном контуре от частоты вращения легирующего электрода

Частота вращения электрода, об/мин	Уровень амплитуды импульса электрического тока в разрядном контуре									
	10-100%	10-20%	20-30%	30-40%	40-50%	50-60%	60-70%	70-80%	80-90%	90-100%
	Среднее количество состоявшихся импульсов*, шт/мин									
	Длительность импульса $\tau = 150$ мкс, Амплитудное значение импульса разрядного тока $I_a = 120$ А, (100%)									
1500	23901	8443	209	306	2271	1939	880	1046	3436	2414
3000	30129	14623	545	2569	2031	1344	1572	787	4245	4370
4500	34131	17410	1185	767	806	1947	1115	1575	4479	4847

* Рассчитано при более чем 10 измерениях, величина среднего квадратического отклонения не превышает $\pm 8\%$.

Для извлечения более полной информации из опытных данных о зависимости выходных параметров (толщина ЛС, его сплошность и микротвердость) от входных (линейная скорость вращения детали, продольная подача легирующего электрода и частота его вращения) при различном удельном времени легирования были использованы регрессионные уравнения для каждого выходного параметра.

Обработка результатов привела к построению карт зависимостей входных и выходных параметров при механизированном ЭИЛ по линиям уровней (рис. 3). Их совместное рассмотрение позволяет найти приемлемое решение задачи оптимизации для формирования измененного поверхностного слоя с заданными параметрами – его толщиной, сплошностью и твердостью при соответствующем удельном времени обработки. Эти зависимости позволяют дать технологические рекомендации для механизированного ЭИЛ вращающимся торцевым электродом.

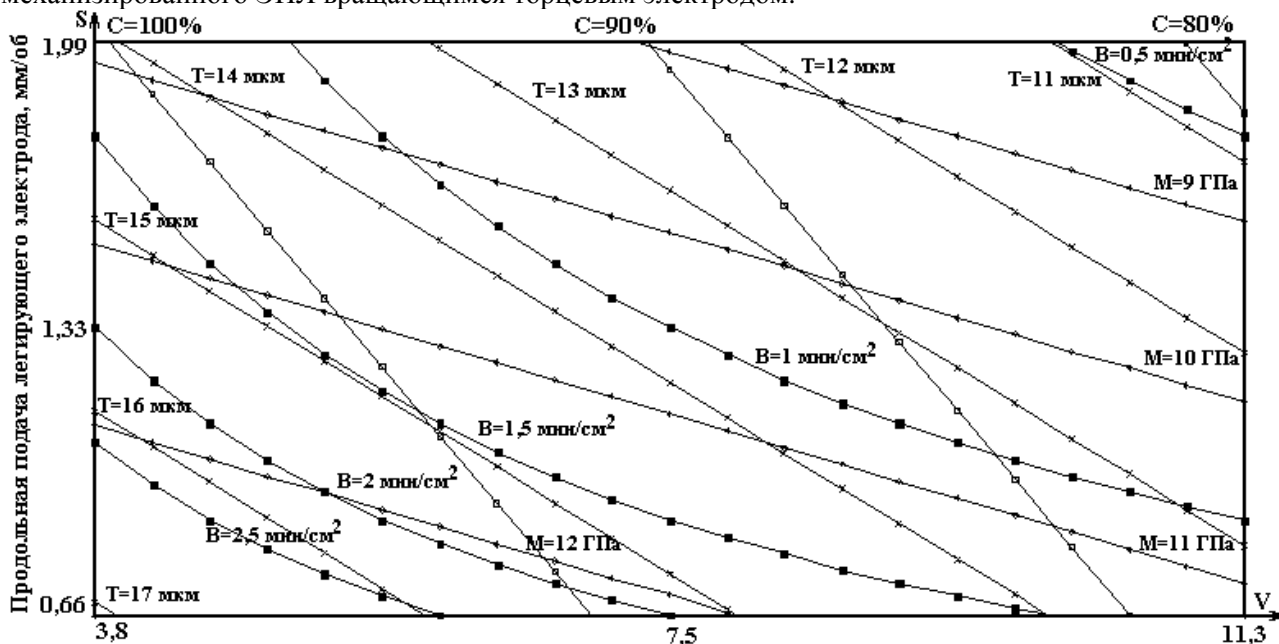


Рис. 3. Карта зависимостей входных и выходных параметров при механизированном ЭИЛ (Сталь35-ВК8)

Отмечено значительное влияние скорости и длительности легирования на процесс формирования поверхностного слоя: с увеличением скорости вращения детали и пропорциональному ей уменьшению удельного времени легирования происходит уменьшение привеса катода, эрозии анода и эффективности процесса.

Выводы

1. Установлено, что при механизированном ЭИЛ вращающимся торцевым электродом процесс формирования поверхностного слоя зависит от числа оборотов вращения легируемой детали, продольного перемещения электрода, частоты его вращения и их взаимного влияния.

2. Показано, что при увеличении числа оборотов детали n до 5 отмечено ухудшение показателей сплошности, толщины и микротвердости слоя. Наибольший коэффициент упрочнения (4,08) получен при $n = 1$, а наименьший (2,86) – при $n = 5$. Эффективность формирования ЛС в данном диапазоне изменяется более чем в 10 раз.

3. При изменении продольной подачи от $S_{об} = 0,66$ мм/об до 1,99 мм/об уменьшаются сплошность, толщина, микротвердость поверхностного слоя, а также коэффициент его упрочнения. Эффективность формирования ЛС при этом значительно уменьшается.

4. При частоте вращения легирующего электрода $N_{эл}$ (1500, 3000, 4500 об/мин) отмечено увеличение толщины и микротвердости ЛС при постоянном удельном времени легирования.

5. При использовании генератора импульсов Элитрон-22А максимально эффективное формирование ЛС при ЭИЛ вращающимся торцевым электродом $\varnothing 3$ мм возможно при линейной скорости вращения детали 7,5 – 10 см/мин, продольном перемещении электрода 1,33 мм/об (0,4 – 0,5 его диаметра) и частоте вращения электрода – 3000 – 4500 об/мин. При выборе оптимальных механических условий формирования ЛС механизированного ЭИЛ необходимо учитывать удельное время обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко Н.И., Лазаренко Б.Р. Электроискровое легирование металлических поверхностей. //Электронная обработка материалов. 1977. № 3. С.12 – 16.
2. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. Владивосток, 1995.
3. Иванов Г.П. Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин. М., 1961.

4. *Петров Ю.Н., Дехтярь Л.И., Сафронов И.И.* Влияние технологических режимов механизированного ЭИЛ на качество получаемой поверхности // *Электронная обработка материалов.* 1965. № 3. С. 45–49.
5. *Коваль Н.П., Зайцев Е.А., Иванов В.И., Верхотуров А.Д.* Влияние режимов обработки на формирование упрочненного слоя при механизированном электроискровом легировании // *Электронная обработка материалов.* 1975. № 3. С. 24 – 27.
6. *Ливурдов В.И., Снежков В.А., Панайотов С.И. и др.* Электрические характеристики установки для ЭИЛ типа ELFA. // *Электронная обработка материалов.* 1986. № 2. С. 31 – 35.
7. *Антонов Б.Т.* Способ и устройство для локального нанесения покрытий вращающимся электродом. Авт. свид. НРБ №168017. *Электротехника и энергетика.* 1978. 5Н113П.
8. *Верхотуров А.Д., Кириленко С.Н., Горбунов Ю.А.* Особенности ЭИЛ на механизированной установке // *Электронная обработка материалов.* 1982. № 2. С. 18.
9. *Лазаренко Н.И.* О механизации образования покрытий при электроискровом легировании металлических поверхностей // *Электронная обработка материалов.* 1965. № 1. С. 24 – 27.
10. *Разумов В.П., Еган О.М.* Некоторые особенности механизации процесса ЭИЛ // *Электронная обработка материалов.* 1977. № 4. С. 22 – 24.
11. *Николенко С.В.* Создание новых электродных материалов с использованием минерального сырья и самофлюсующихся добавок для электроискрового легирования инструментальных и конструкционных сталей. Автореферат. Хабаровск, 1996.
12. *Сысоев В.И.* Основы резания металлов и режущий инструмент. М., 1962.

Поступила 28.08.02

Summary

In the work the basic parameters of mechanized electrospark alloying (ESA) on installation "«IMES-1001" equipped with a one-electrode head with a rotating face electrode has been determined. The influence of mechanical parameters of the unit on formation of the changed superficial layer has been investigated. The received data can render the essential help in creation of new generation of installations for mechanized electrospark alloying and high technologies, and also creation of special electrode materials.

А.И. Михайлюк

УМЕНЬШЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ ГРАФИТОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

*Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, Республика Молдова*

Использование электроискрового легирования (ЭИЛ) для повышения износостойкости поверхностей трения часто ведет к увеличению шероховатости, которая согласно практическим данным, в зависимости от условий трения, не должна превышать $R_a = 0,32 - 2$ мкм [1]. При этом существует ряд деталей, поверхности трения которых из-за конструктивных особенностей не всегда возможно довести до требуемой шероховатости апробированными способами: шлифованием, поверхностно-пластической деформацией и т.п.

Из практики ЭИЛ замечено, что электроискровая обработка поверхности графитовым электродом практически не изменяет ее шероховатости, а иногда даже уменьшает ее [2].

В связи с этим целесообразно исследовать возможности ЭИЛ графитом для уменьшения шероховатости поверхностей, сформированных предварительной электроискровой обработкой другими электродными материалами.

Были выбраны материалы первичных электродов: медь, серебро, никель, титан. Cu и Ag выбрали как металлы, не растворяющие углерод и не образующие с ним карбиды. Ti, Ni представители металлов, растворяющие углерод и образующие с ним прочные химические соединения, причем по степени межфазной активности металлов на границе с графитом по убывающей в последовательности Ti, Ni.

В качестве материала основы, на которую наносились выбранные электродные материалы, использовались образцы из стали 45 нормализованной. ЭИЛ осуществляли на установке “Элитрон–22” в диапазоне энергий разряда 0,2 – 0,4 Дж и удельном времени обработки 1 мин/см². Шероховатость покрытий определялась на профилографе–профилометре мод. 252.

Полученные результаты при электроискровом легировании первичными электродами (рис. 1 – 1, 3, 5, 7) показали, что наименьшей шероховатостью обладает поверхность, обработанная медным электродом. По мере возрастания шероховатости покрытий материалы электродов располагались последовательно: Cu, Ti, Ag, Ni. После последующего ЭИЛ покрытий графитом наименьшая шероховатость получилась при обработке медных покрытий, а ряд шероховатостей по мере возрастания несколько изменился: Cu, Ag, Ti, Ni (см. рис. 1– 2, 4, 6, 8).

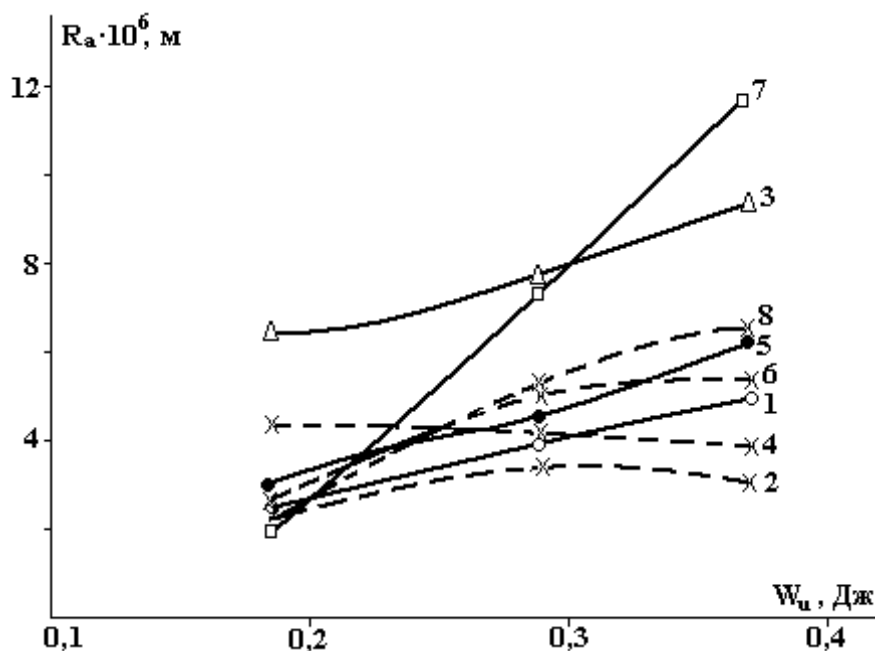


Рис. 1. Зависимость шероховатости покрытий от энергии электроискровой обработки чистыми металлами и графитом. Материал анода: 1 – Cu; 2 – Cu + графит; 3 – Ag; 4 – Ag + графит; 5 – Ti; 6 – Ti + графит; 7 – Ni; 8 – Ni + графит. Материал катода – сталь 45

Такой результат можно объяснить тем, что при ЭИЛ графитовым электродом покрытий с Ti и Ni образуются тугоплавкие карбиды, которые в меньшей степени, чем сплавы и растворы поддаются оплавлению, что ведет к сглаживанию поверхности. Уменьшение шероховатости при ЭИЛ графитом, очевидно, связано со спецификой обработки этим материалом. Обладая очень большим электрическим сопротивлением, на порядок выше, чем у многих металлов, графитовый электрод быстро нагревается в процессе ЭИЛ до температур 800 – 1000°С, что ведет при его частом соприкосновении с обрабатываемой поверхностью к размягчению гребешков шероховатости и под ударным воздействием электрода – к формированию более сглаженного рельефа. Перенос графита на катод происходит в газовой фазе и поэтому на шероховатость поверхности практически не влияет.

Исходя из этого рассуждения, становятся понятными результаты и другого эксперимента, в котором при постоянной энергии разрядов при ЭИЛ первичными электродами из Ag и Ti изменялась энергия при ЭИЛ графитом. В этом случае шероховатость покрытия из титана с увеличением энергии разрядов растет (рис. 2), а при ЭИЛ покрытий серебром – падает, во всех случаях становясь ниже, чем при легировании электродами из Ag и Ti.

Таким образом, результаты исследования влияния ЭИЛ графитом на шероховатость поверхностей, предварительно обработанных электроискровой обработкой другими материалами, показали

возможность уменьшать шероховатость электроискровых покрытий и тем самым в ряде случаев создать рельеф поверхности, пригодный с точки зрения требований трибологии.

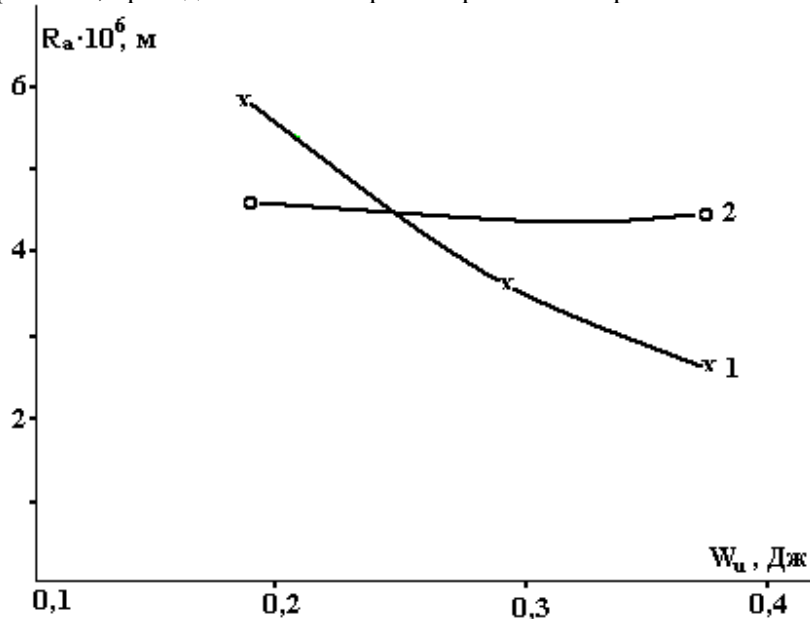


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности электроискрового покрытия серебром (1) и титаном (2) от энергии последующей электроискровой обработки графитом. Предварительное ЭИЛ Ag и Ti при $W_u = 0,24 \text{ Дж}$

Показано, что наиболее эффективное влияние на шероховатость покрытий оказывает ЭИЛ графитом в том случае, когда предварительная обработка осуществляется электродами из металлов, не образующих растворы с углеродом или карбиды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. Киев, 1970.
2. Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей. М., 1976.

Поступила 14.11.02

Summary

The roughness of the electric spark claddings additionally treated by the same electric spark method with the graphite electrode has been investigated. It is shown that the roughness of the claddings decreases after the treatment while the efficiency of the graphite treatment is better in the case of preliminary electric spark alloying by those electrode materials, which do not form with the carbon solutions or carbides.

НАНЕСЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С МАТРИЦЕЙ ИЗ НИКЕЛЯ НА НАКОНЕЧНИКИ ЗУБОВРАЧЕБНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

*Казанский государственный медицинский университет,
ул. Бутлерова, 49, г. Казань, 420012, Татарстан, Россия*
**Казанский государственный технологический университет,
ул. Карла Маркса, 68, г. Казань, 420015, Татарстан, Россия*

Ставилась задача разработки полуматовых композиционных химических покрытий (КХП) вместо блестящих хромовых для защиты наконечников зубоорудных инструментов. Ее решение позволило исключить из технологического процесса одну из операций (нанесение подслоя меди для хромирования) и значительно уменьшить светоотражающие характеристики покрытий, тем самым исключив блики при работе с этими инструментами.

КХП наносились из гипофосфитного электролита состава, г/л [1]: $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O} - 20$, $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} - 20$, $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH} - 10$, $\text{pH}_{18}^0 \text{C} = 5,3 - 5,5$ доводится концентрированными растворами NaOH и CH_3COOH . Процесс проводится при температуре 80 ± 5 °С, плотность загрузки $1 \text{ дм}^2/\text{л}$. Скорость осаждения при выбранных режимах $10 - 12 \text{ мкм/ч}$.

Частицы второй фазы поддерживаются во взвешенном состоянии путем вибрационного перемешивания [2], их концентрация в электролите составляет $20 - 30 \text{ г/л}$. Подготовка дисперсных частиц (ДЧ) заключается в их выдержке при постоянном перемешивании в течение $3 - 4$ час в исходном (в отсутствие гипофосфита) электролите, отделении и последующем переносе в рабочую ванну.

Оценка скорости и степени перемешивания проводилась через коэффициент перемешивания A [3].

В качестве частиц второй фазы использовались ZrO_2 и Cr_2O_3 с размерами частиц $0,5 - 2 \text{ мкм}$. Модельными образцами служили стальные и латунные пластины, имитирующие материал изделия, а также сами наконечники зубоорудных инструментов.

Оценка качества покрытий включала изучение микроструктуры, микротвердости, чистоты поверхности и всесторонние коррозионные испытания в камере типа 3001.

Результаты исследований показали, что в зависимости от природы включающихся в осадки частиц при сопоставимых их концентрациях в электролите количество второй фазы в никелевой матрице неодинаково (рис. 1). При достижении определенной концентрации порошков второй фазы в электролите содержание их в матрице не меняется, что подтверждается также изменением микротвердости КХП в зависимости от концентрации частиц. В сравнении с чистыми никелевыми покрытиями микротвердость композиций $\text{Ni} - \text{NiP} - \text{Cr}_2\text{O}_3$ и $\text{Ni} - \text{NiP} - \text{ZrO}_2$ в $1,5 - 2$ раза выше ($5000 - 6000 \text{ МПа}$); микротвердость гальванических никелевых покрытий колеблется в пределах $2000 - 3000 \text{ МПа}$.

Металлографические исследования показали высокую равномерность распределения частиц в матрице (рис. 2).

Класс чистоты поверхности КХП уменьшается на одну единицу по сравнению с исходной. Сравнительные коррозионные испытания наконечников зубоорудных инструментов с блестящими хромовыми и композиционными покрытиями продолжительностью 10 суток при 25°C и 100% влажности показали устойчивость всех покрытий в указанных условиях. Покрытия КХП получают полуматовыми, не имеют бликов и обладают хорошим товарным видом.

Весь технологический процесс рекомендуется проводить непрерывно с минимальными интервалами между операциями. Осаждение КХП и все операции проводят в барабане (для мелких деталей) или на подвесках, изготовленных из неметаллических материалов.

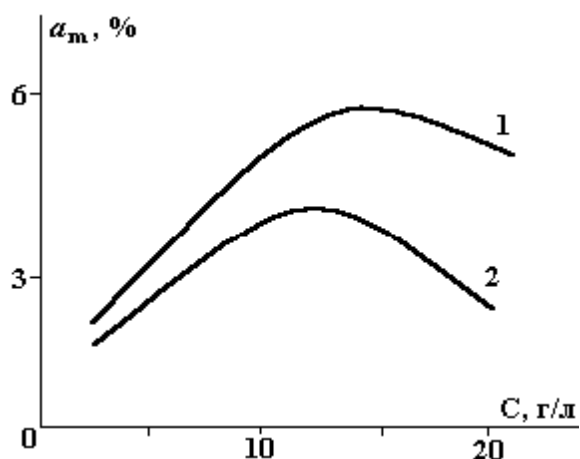


Рис.1. Зависимость количества включений (%) упрочняющих порошков в никелевую матрицу от их концентрации в электролите. 1 – Cr₂O₃; 2 – ZrO₂

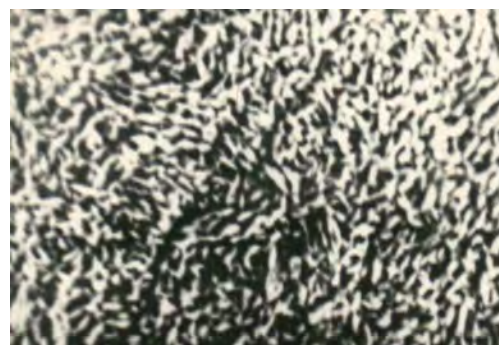


Рис.2. Микрофотография покрытий Ni – NiP – Cr₂O₃. × 750

Приведенное ниже описание техпроцесса нанесения КХП может служить рабочей схемой внедрения этой прогрессивной технологии.

I. Подготовка поверхности

1) *Химическое обезжиривание* рекомендуется проводить в растворе следующего состава, г/л: Na₂CO₃ – 20; Na₃PO₄ – 20; ОП – 7 – 10; *t* = 50 °С, *τ* – 5 мин.

2) *Промывку* желательно производить в проточной горячей деминерализованной воде в течение 1 – 2 мин.

3) *Травление – активирование* рекомендуется проводить в растворе H₂SO₄ (10% объемных), температура комнатная, время – от 30 с до 2 мин.

4) *Промывка* (аналогично п.2.)

II. Нанесение КХП.

Нанесение КХП производится из электролита, описанного нами ранее [1], с сохранением указанного состава и выдержкой технологического обеспечения.

При длительном использовании электролита (более 2 ч) необходима корректировка раствора. Корректирование по pH производится не реже одного раза каждые 2 часа концентрированным раствором NaOH. Для корректировки по основным компонентам используется раствор следующего состава, г/л: Ni(CH₃COO)₂·4H₂O – 125; NaH₂PO₂·H₂O – 100.

При корректировке электролита следует руководствоваться эмпирическим правилом: осаждение каждого 1 г покрытия требует введения в электролит 40 мл раствора корректирования. Корректировку по дисперсным частицам проводят по мере их расходования, исходя из мас. % включений в композиционные химические покрытия.

Наконечники зубоорачебных инструментов, покрытые КХП, прошли всесторонние физико-механические и клинические испытания. Результаты испытаний позволяют рекомендовать КХП в качестве эффективного покрытия наконечников зубоорачебных инструментов, вместо двухслойных хромовых, что не только значительно снижает стоимость покрытий, но и позволяет улучшить функциональные свойства инструментов за счет уменьшения световых бликов при работе с ними.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 232705. Кислый электролит для химического никелирования металлов.
2. Абдуллин И.А., Курамышин Р.С., Сайфуллин Р.С., Касимова А.Б. Вибрационная ванна для интенсивного электроосаждения металлов. Казань, 1976.
3. Абдуллин И.А. Опыт нанесения химических композиционных покрытий // Электронная обработка материалов. 2001. № 3. С. 11 – 13.

Поступила 29.11.02

Summary

The compositions lustreless chemical coating on the basis of nickel matrix have been developed for the defense dental instruments tips by the additions of dispersions phase particle ZrO₂ and Cr₂O₃ to in the electrolyte.

С.А. Курочкина, Д.Ф. Белоножко, А.И. Григорьев

**ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ВОЛНОВЫХ ТЕЧЕНИЙ
В ТОНКИХ СЛОЯХ ЖИДКОСТИ С ЗАРЯЖЕННОЙ
СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ
ЧАСТЬ 1. ВОЛНЫ МАЛОЙ АМПЛИТУДЫ**

*Ярославский государственный университет им. Демидова
ул. Советская, 14, г. Ярославль, 150000, Россия*

1. Введение

Исследование устойчивости заряженной поверхности жидкости представляет значительный интерес для физики, геофизики, техники и технологии в связи с тем, что при реализации неустойчивости такой поверхности на финальной ее стадии происходит эмиссия высокодисперсных сильно заряженных капелек. Этот феномен встречается как паразитное явление или как эксплуатируемый феномен в ионных коллоидных реактивных двигателях, жидкостной масс-спектрометрии органических и нелетучих веществ, в жидкометаллических источниках ионов, теории грозового электричества, при электростатическом диспергировании лакокрасочных материалов, горючего, инсектицидов и получении пучков монодисперсных капель в устройствах каплеструйной печати и подпитки термоядерных реакторов (см., например, [1 – 13] и указанную там литературу).

Механизм реализации неустойчивости плоской однородно заряженной поверхности (свободной или границы раздела сред) жидкости бесконечной или конечной глубины, когда в качестве малого параметра используется отношение амплитуды волны к ее длине, изучен достаточно подробно экспериментально и теоретически с учетом реальных физико-химических свойств жидкостей (см., например, [14 – 50]). Механизм неустойчивости однородно заряженной свободной поверхности идеальной жидкости исследован теоретически в [14 – 16], где был выведен критерий наступления неустойчивости. В [14] предложен качественный механизм развития неустойчивости, а в [15] выведено дисперсионное соотношение для капиллярных волн на заряженной поверхности идеальной жидкости и исследована ее устойчивость. В [16, 17] экспериментально показано, что при развитии неустойчивости заряженной поверхности жидкости на ней появляются конические выступы (получившие в последствии название конусов Тейлора), с вершин которых идет сброс избыточного заряда. В [18 – 19] образование конусов Тейлора изучалось путем численного моделирования. В [20] теоретически изучены особенности нарушения устойчивости поверхности жидкости на вершине конуса Тейлора. В [21 – 25] теоретически исследовалась устойчивость плоской заряженной границы раздела жидкостей с различными физико-химическими свойствами. В работах [26 – 30] исследовалась устойчивость заряженной границы раздела сред по отношению к тангенциальному скачку на ней поля скоростей, показано, что движение верхней жидкости относительно нижней дестабилизирует границу раздела. Устойчивость поверхности проводящей жидкости в перпендикулярном к ней переменном электрическом поле исследовалась в [31]. В [32 – 33] по методике, описанной в [34], получено и проанализировано, в смысле исследования критических условий реализации неустойчивости, дисперсионное уравнение для капиллярных волн на заряженной поверхности вязкой жидкости. Влияние толщины слоя вязкой жидкости с заряженной свободной поверхностью на закономерности развития ее неустойчивости изучено в [35]. В [36 – 41] исследовано влияние на условия развития неустойчивости заряженной поверхности эффекта динамического поверхностного натяжения, связанного с наличием

двойного электрического слоя у поверхности жидкости. Учет конечности скорости выравнивания электрического потенциала вдоль колеблющейся поверхности жидкости проведен в [42 – 46]. Роль эффекта релаксации вязкости в усложнении спектра капиллярных волновых движений жидкости со свободной поверхностью, как в отсутствии [47], так и при наличии электрического заряда рассмотрена в [48 – 52]. Особенности реализации неустойчивости поверхности жидкости по отношению, поверхностному заряду при наличии поверхностно-активных веществ рассмотрены в [53 – 54]. Закономерности формирования волнового рельефа на поверхности твердого тела, распыливаемого интенсивным пучком ионов, исследованы в [55 – 58]. Тем не менее, несмотря на столь разностороннее исследование закономерностей формирования и неустойчивости капиллярных волновых движений в глубокой жидкости, особенности реализации неустойчивости тонких слоев жидкости с заряженной свободной поверхностью в приближении длинных волн, когда в качестве малого параметра используется не отношение амплитуды волны к ее длине, а отношение толщины слоя жидкости к длине волны, практически не исследованы. Имея в виду слабую проработанность задачи о неустойчивости заряженной поверхности тонких слоев жидкости и ее важность для многочисленных приложений в нижеследующем изложении, основное внимание уделим особенностям экспериментального и теоретического исследования течения и устойчивости тонких слоев жидкостей.

2. Течение тонких слоев жидкости имеет ряд отличительных особенностей. Во-первых, поскольку толщина слоя мала, характерный масштаб изменения скорости течения жидкости поперек слоя велик по сравнению с масштабом ее изменения вдоль пленки. Все производные от скорости течения, берущиеся поперек пленки, велики по сравнению с аналогичными производными вдоль пленки. Это обстоятельство позволяет существенно упростить уравнения движения жидкости. Во-вторых, в слое конечной толщины важно адекватно задаче сформулировать условия на дне: в зависимости от модели это может быть условие "непротекания", "прилипания" или даже "проскальзывания". В-третьих, для волн на поверхности тонкой пленки в большинстве практически важных случаев можно использовать длинноволновое приближение, когда в качестве малого параметра выступает отношение толщины слоя жидкости к длине волны $(h/\lambda) \ll 1$.

Естественно различать горизонтальные и наклонные (в частности, вертикальные) тонкие слои жидкости в поле сил тяжести. В наклонных слоях волновое течение накладывается на основное поступательное, которое в поле сил тяжести не является бесконечно малым, а имеет конечную скорость, в то время как в горизонтальных слоях жидкости скорость поступательного движения параллельно свободной поверхности естественно брать равной нулю. Это обстоятельство позволяет по разному реализовывать с математической точки зрения асимптотический анализ (путем разложения по отношению толщины слоя к длине волны и амплитуды к длине волны). В линейном приближении для горизонтальных пленок нелинейное конвективное слагаемое в уравнении Эйлера или Навье–Стокса попросту отбрасывается. Для наклонных же пленок конвективное слагаемое линеаризуется в окрестности конечной скорости поступательного движения стекающей пленки.

Экспериментальные исследования свидетельствуют, что для наклонных жидких пленок на твердых подложках характерны три основных вида течения жидкости: ламинарный, волновой и турбулентный. Более корректно эти режимы могут быть названы несколько иначе [59]: ламинарный безволновой, неламинарный волновой и турбулентный. Все три вида течений можно проследить, меняя расход жидкости, поскольку они переходят один в другой при некоторых критических значениях числа Рейнольдса. Более того, волновой режим реализуется на некотором расстоянии от источника жидкости, а вначале течение является безволновым ламинарным.

В горизонтальных пленках реализуется только волновое движение.

Далее основное внимание будет уделено волновому режиму, поскольку нас интересуют возможные неустойчивости заряженной поверхности тонких слоев жидкости, начинающиеся с периодического (при неустойчивости Кельвина–Гельмгольца) или аperiodического (при неустойчивости Тонкса–Френкеля) нарастания волн бесконечно малой амплитуды, порождаемых уже тепловым движением молекул жидкости [15]. Начальная амплитуда этих волн $\xi_0 \sim \sqrt{KT/\sigma}$, где K – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, σ – коэффициент поверхностного натяжения. Для всех реальных жидкостей $\xi_0 \sim 0,1$ нм. Но такие волны всегда присутствуют на поверхности жидкости, даже не будучи зарегистрированы приборами. При волновом течении тонкого слоя жидкости возможно развитие как периодического режима течения, при котором волна может быть описана гармоническими функциями, так и режима течения в виде уединенных волн, когда волна состоит из основного гребня с крутым фронтом и рядом более мелких волн впереди. При этом на значительных расстояниях между гребнями волн поверхность жидкости имеет невозмущенный характер. В настоящей работе уеди-

ненные волны рассматриваться не будут, поскольку этому вопросу посвящено много подробных обзоров (см., например, [60 – 63]), и все внимание будет уделено периодическим волнам в тонких пленках жидкости на твердой подложке в гравитационном и электрическом полях.

3. Для исследования движения жидкости наиболее простой является модель идеальной жидкости, не учитывающая диссипативных потерь. Долгое время большинство гидродинамических задач решалось именно в этом приближении. В частности, ряд классических результатов этой области гидродинамики относится к движению жидкости в тонком слое. Они подробно изложены в ряде монографий (см., например, [64 – 66]), где рассматриваются гравитационные волны на поверхности идеальной несжимаемой жидкости, находящейся на горизонтальном неподвижном дне, длина которых велика по сравнению с глубиной жидкости. В линейном приближении получены уравнения, описывающие волны в случае малой глубины, а также показано, что скорость распространения волн в тонком слое, в отличие от бесконечно глубокой жидкости, не зависит от их длины, то есть $U = \sqrt{gh_0}$, где h_0 – равновесная глубина. В [66] проведен вывод аналитических выражений для профилей стоячих и прогрессивных волн, получены формулы для потенциала скорости и уравнения движения частицы жидкости.

4. Одним из первых исследователей нелинейных волн на поверхности идеальной жидкости был Стокс [67]. Предполагая, что волна имеет постоянную форму и распространяется с постоянной скоростью, показал, что в нелинейных системах могут существовать периодические волны, угол при вершине которых должен быть равен 120° , а дисперсионное соотношение содержит амплитуду. В [68] задача о влиянии конечности глубины горизонтального слоя идеальной несжимаемой жидкости на форму и длину предельных прогрессивных волн Стокса решалась численно. Получены формы волн и определен диапазон чисел Фруда $Fr = (2/H)^{1/2}$ ($Fr = 0,071; 0,76; 0,78; 0,79$; H – безразмерная глубина жидкости), построенных по глубине жидкости и фазовой скорости, в котором существуют волновые решения. Авторы предполагают, что наибольшему числу Фруда $Fr = 0,79$ должны соответствовать неограниченные длины волн, и сравнивают полученные решения с результатами для солитона Стокса. Но значения для максимального числа Фруда Fr для периодических волн Стокса, полученные в работе, на порядок больше данных для солитона.

В [69] проведен формальный асимптотический вывод нелинейных уравнений "мелкой воды" на поверхности идеальной несжимаемой жидкости, находящейся на горизонтальном дне в поле сил тяжести, имеющей вид:

$$\eta_t + [(h + \eta)u]_x = 0, \quad u_t + uu_x + g\eta_x = 0,$$

где нижние индексы означают дифференцирование по соответствующим координатам; h – равновесная толщина слоя жидкости; $u = u(x, t)$ – поле скоростей; $\eta = \eta(x, t)$ – уравнение свободной поверхности жидкости. Первое из этих уравнений является уравнением неразрывности, а второе – законом сохранения объема жидкости. В качестве малого параметра используется отношение квадрата толщины невозмущенной пленки к квадрату длины волны $\beta = h_0^2 / \lambda^2$. Приведенные выше уравнения "мелкой воды" получены в нулевом приближении по β . В первом приближении по β из тех же начальных положений в [69] выводится система уравнений Буссинеска, описывающая нелинейные волны малой амплитуды. Из системы уравнений Буссинеска в свою очередь получается уравнение Кортевега–де–Фриза, дающее солитонные решения.

Нелинейные волны на свободной поверхности идеальной жидкости широко исследовались как аналитическими, так и численными методами. В некоторых случаях проведено обобщение на случай маловязкой жидкости. Переход к модели вязкой жидкости связан с изменением граничных условий: появляется условие баланса тангенциальных натяжений на поверхности, ограничивающей жидкость. В случае тонкого слоя жидкости на твердом дне накладываются дополнительные условия прилипания жидкости к дну и условия на касательные компоненты скорости на свободной поверхности. Эти условия настолько сильно искажают картину движения в тонкой вязкой жидкой пленке по сравнению с картиной течения идеальной жидкости, что в наиболее содержательных и близких к реальности моделях тонких пленок обязательно тем или иным образом учитывается влияние вязкости (см., например, [47, 59]).

Экспериментальные данные

Начало экспериментальному исследованию течения тонкой пленки жидкости в поле силы тяжести на наклонной плоскости было положено П.Л. Капицей и С.П. Капицей [70]. Они разработали теневой метод фотографирования сечения тонкого слоя и впервые обратили внимание на трудности

организации двумерного режима течения. Необходимость условия двумерности волнового движения вызвана тем, что большинство теоретических методов исследования тонкой пленки вязкой жидкости разработано именно для двумерного случая.

Наблюдения естественного стекания пленки по твердой вертикальной поверхности [70, 71] показали, что волнообразование начинается на некотором расстоянии от места истечения жидкости. Переход к волновому режиму обусловлен случайными возмущениями, которые различны в разных точках потока, такие волны не регулярны, и область существования двумерных волн не велика (~ 150 мм). Они быстро разрушаются и становятся трехмерными. Для того, чтобы поток был одинаковым по всему периметру, волны в ходе экспериментов возбуждались искусственно пульсациями расхода жидкости, которые могут быть созданы, например, пульсациями расхода воздуха [70] или колебаниями мембраны [71]. При внесении искусственного возмущающего фактора непосредственно у входа в определенном диапазоне частот, зависящем от физических свойств и расхода жидкости, образовывались волны, а также увеличивалась область их существования.

При изменении частоты возмущающих импульсов и расхода жидкости изменяется и волновая картина. Так, при исследовании стекания дистиллированной воды и этилового спирта по вертикальной стеклянной трубке длиной 200 – 250 мм и диаметром 25 мм в [70] обнаружены два основных устойчивых режима волнового течения: периодический, предсказанный ранее теорией, и режим уединенных волн, движущихся независимо друг от друга. Периодический режим возникает не только при самых незначительных амплитудах синхронных возмущающих импульсов, но и при максимальной частоте из диапазона, в котором проводились эксперименты. Профиль волн имеет регулярный характер и при небольших расходах близок к синусоидальному. Режим уединенных волн реализуется, когда импульсы более редки, но значительны по амплитуде. Общий вид профиля одиночных волн независимо от расхода один и тот же. На вопрос, какой из наблюдаемых типов волнового режима является более устойчивым, авторы затрудняются ответить. В работе приводятся образцы фотоснимков сечений текущих тонких слоев жидкости.

При уменьшении частоты возмущающих импульсов устанавливался режим течения, который представлял собой ряд гребней уединенных волн (с крутым передним фронтом и рядом высокочастотных осцилляций впереди гребня), между которыми отсутствовала область невозмущенного течения. Этот тип периодического волнового течения авторами [70] назван промежуточным. Подобный профиль волн получен Накоряковым с сотрудниками при исследовании стекания воды, водных растворов этилового спирта и глицерина по внешней поверхности оргстеклянной трубы длиной 1 м и диаметром 60 мм [71]. Эти периодические волны, напоминающие формой уединенные, авторы [71] назвали катящимися. Теоретическая возможность их существования показана в [72]. Такие волны при стекании жидкости быстро растут, а их амплитуда превышает среднюю толщину пленки. Характеристики катящихся волн сильно зависят от вязкости жидкости.

Любой из рассмотренных типов волнового режима будет устойчиво существовать только при расходах, превышающих некий определенный для данной жидкости критический расход. Если расход жидкости ниже критического, то при любой силе и частоте возмущающих импульсов волны будут затухать. При увеличении расхода затухание будет замедляться и при достижении критического значения исчезать. При значениях расхода выше критического волны, вызванные даже малыми возмущающими импульсами, развиваются до определенной величины. Наблюдения, проводимые при различных частотах возмущающих импульсов, показали, что значения критических расходов для всех типов волн мало отличаются друг от друга. Из опыта получены значения критического расхода для воды и спирта (0,061 и 0,068 см²/с соответственно). Критическое значение расхода определялось с точностью до 5 – 10%. Также в ходе экспериментов [70, 71] производились количественные измерения амплитуд, фазовой скорости и длин волн для различных значений расходов потоков и всех исследуемых режимов течения. В [73] приводятся результаты измерения мгновенных профилей для катящихся волн. Полученные экспериментальные зависимости сравниваются с результатами, предсказанными теоретически. Наблюдается совпадение в пределах оценки точности, даваемой приближенной теорией.

Согласно экспериментальным данным на поверхности пленки жидкости, находящейся под действием электрического поля, возможно возникновение и развитие неустойчивости волнового типа даже в том случае, если пленка в отсутствии такого поля имела гладкую поверхность, то есть при значениях расхода ниже критического [74]. В зависимости от напряженности электрического поля волновая картина на поверхности изменяется. Исследования течения вазелинового масла по вертикальной стальной трубе диаметром $2,5 \cdot 10^{-5}$ м и длиной 0,65 м [74] показали, что при напряженности 2 кВ/см появляются возмущения в виде волн синусоидального профиля. Волны зарождаются на рас-

стоянии 0,15 – 0,20 м от места формирования пленочного течения, стабилизируются и, распространяясь вниз по течению, затухают через 0,45 – 0,50 м. При дальнейшем увеличении напряженности поля волны увеличивают свою амплитуду и одновременно изменяется их профиль: передний фронт становится круче. С увеличением напряженности область волнообразования поднимается вверх, и при 10 кВ/см волны возникают сразу же после зоны формирования пленочного течения. Такое поведение слоя жидкости объясняется тем, что влияние электрического поля является дестабилизирующим и при достижении критического значения напряженности поля для данной жидкости способствует развитию малейших отклонений свободной поверхности от равновесной плоской вплоть до разрушения пленки.

Теоретическое исследование течения и устойчивости тонкой пленки жидкости в гравитационном поле

1. Как показали экспериментальные исследования [59, 70 –74], ламинарное течение пленки в поле силы тяжести вязкой жидкости на наклонной твердой подложке неустойчиво. Это одно из важных свойств течения тонкого слоя, приводящее к образованию волн на поверхности, а при дальнейшем развитии неустойчивости – и к распаду пленки. Неустойчивость может развиваться под влиянием таких внешних факторов, как сила тяжести, направленная от свободной поверхности внутрь жидкости [34, 59, 73, 75], и от свободной поверхности во внешнюю по отношению к жидкости область [59, 76 –78], течение газа или жидкости над поверхностью пленки [27, 59, 76, 79], изменение температуры [76, 80].

Строгой классификации реализующихся неустойчивостей тонких пленок по типам в настоящее время пока нет. Тем не менее, в работе [81] перечислены известные типы неустойчивостей пленочных течений жидкости, граничащей с потоком газа в поле силы тяжести на наклонной плоскости:

Поверхностная неустойчивость, которая возникает при свободном стекании жидкости по вертикальной и наклонной плоскостям. Дестабилизирующее влияние в данном случае оказывают гравитационные силы.

Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца – неустойчивость идеальной тяжелой жидкости по отношению к наличию тангенциального разрыва скорости жидкости, граничащей с другой жидкостью или газом.

Неустойчивость Релея-Тейлора, которая имеет место, когда пленка течет под пластиной, удерживаясь за счет сил смачивания. Дестабилизирующее влияние оказывает вес жидкости.

Неустойчивость, вызванная необратимым переносом энергии из возмущений газа, при его течении над волнистой поверхностью, в возмущения жидкости. Такая неустойчивость возникает при больших и умеренных числах Re .

Неустойчивость Толлмиена–Шлихтинга, вызываемая переносом энергии основного течения в возмущения жидкости. Эта неустойчивость возникает при достаточно больших Re .

Неустойчивость, вызываемая термокапиллярными эффектами. Она становится основным механизмом неустойчивости при больших числах Маха.

Перечисленные неустойчивости охватывают слишком широкий класс задач, каждой из которых можно посвятить обширный обзор. В данной части настоящего обзора сосредоточим внимание на движении жидкости под действием силы тяжести по вертикальной и наклонной плоскостям.

2. Основное уравнение, описывающее движение вязкой несжимаемой жидкости, есть уравнение Навье–Стокса, устанавливающее связь между полем скоростей $\vec{U}(\vec{r}, t)$ в жидкости и давлением в ней $p(\vec{r}, t)$:

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \nabla) \vec{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{U} + \vec{F},$$

где ρ – плотность, а ν – кинематическая вязкость жидкости, находящейся во внешнем потенциальном силовом поле \vec{F} .

Когда толщина слоя жидкости h много меньше длины волны, уравнение Навье–Стокса удобно решать в приближении пограничного слоя, которое позволяет упростить исходную систему уравнений. Так как быстрота изменения скорости поперек слоя жидкости велика по сравнению с быстротой изменения вдоль слоя, все производные от скорости, берущиеся поперек пленки, могут считаться большими по сравнению с производными вдоль пленки. В том же приближении можно считать, что в пограничном слое поперечный градиент давления равен нулю [34, 65, 72, 82]. Система уравнений,

описывающая свободное стекание тонкой пленки жидкости на твердой подложке, в приближении пограничного слоя принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_x}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} &= g \cdot \sin \varphi + \nu \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}, \\ \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} &= 0, \quad \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = -g \cdot \cos \varphi, \end{aligned}$$

где U_x – продольная, а U_y – поперечная составляющие скорости, x , y – продольная и поперечная координаты, φ – угол наклона поверхности, g – ускорение свободного падения.

Линейная задача о волновом стекании тонкой пленки в приближении пограничного слоя для волн малой амплитуды детально рассмотрена в [34] (см. также [59]). Авторами выведено линейное дифференциальное уравнение для отклонения свободной поверхности от средней толщины и получены условия, определяющие незатухающий характер периодических волн. Показано, что для поддержания незатухающего режима необходимо, чтобы диссипируемая энергия при волновом движении компенсировалась работой силы тяжести. Из равенства диссипируемой энергии и работы силы тяжести выведено условие, определяющее связь средней толщины пленки при данном расходе жидкости с волновыми характеристиками. Анализ этих условий показал, что в первом приближении средняя толщина слоя жидкости не зависит от амплитуды волны и близка к толщине слоя, которая имеет место при ламинарном режиме стекания. Во втором же приближении она оказывается функцией от амплитуды, то есть происходит смещение виртуальной поверхности, относительно которой отклоняются точки свободной поверхности жидкости. Сравнение значений волновых характеристик, вычисленных из упомянутых выше условий, с экспериментальными данными [70] показало достаточно хорошее согласие между теорией и опытом.

3. Что касается волновых движений жидкости в горизонтальных слоях, то следует отметить, что значительная часть исследований волновых движений жидкости в приближении "мелкой воды" ($h/\lambda \ll 1$) была выполнена для длинных гравитационных (приливных) волн, для которых глубина морей мала по сравнению с длиной волны. Ясно, что в таких исследованиях влиянием сил поверхностного натяжения на физическую картину феномена справедливо пренебрегалось. Иначе будет обстоять дело при исследовании устойчивости заряженной свободной поверхности жидкости (то есть неустойчивости Тонкса-Френкеля), когда макроскопический феномен неустойчивости проявляется в результате нарастания именно капиллярных волн с амплитудой ~ 1 нм. Это же относится и к неустойчивостям Тейлора и Кельвина–Гельмгольца.

В связи с этим, рассмотрим вопрос о линейной устойчивости поверхностно заряженного тонкого слоя идеальной жидкости. Для этого выведем в линейном по h/λ и $|\xi|/\lambda$ приближении уравнение для капиллярно-гравитационных волн на заряженной поверхности жидкости.

Пусть идеальный слой жидкости толщиной h и плотностью ρ заполняет плоский канал с твердыми стенками и дном. Рассмотрим капиллярно-гравитационное волновое движение жидкости по однородно с плотностью χ_0 заряженной поверхности проводящей жидкой пленки в таком канале.

Длина канала предполагается неограниченной, а глубина h – мала по сравнению с длиной волны λ (то есть $h/\lambda \ll 1$). В случае продольных длинных волн компонента U_x скорости вдоль канала велика по сравнению с компонентами U_y , U_z . Квадратичные по скорости члены в уравнении Эйлера опускаются, так как амплитуда волны считается малой.

Отбрасывая малые слагаемые, x – и y – компоненты уравнения Эйлера для тонкого слоя заряженной проводящей идеальной жидкости в канале можно записать в виде [65]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_x}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}, \\ \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} &= -g. \end{aligned} \tag{1}$$

Уравнение непрерывности в рассматриваемом случае приобретает вид [65]:

$$b \cdot \frac{\partial \xi}{\partial t} + S_0 \cdot \frac{\partial U_x}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

где b – ширина сечения канала у поверхности жидкости, $S_0 = \text{const}$ – площадь поперечного сечения невозмущенной жидкости в канале, $\xi = \xi(x, t)$ – вертикальное смещение жидкости при ее колебаниях, являющееся функцией от координаты x и времени t причем $(|\xi|/\lambda) \ll 1$.

Потенциал электрического поля Φ удовлетворяет уравнению Лапласа:

$$\Delta \Phi = 0, \quad \Phi = -4\pi\chi_0 z + \varphi(x, t),$$

с граничными условиями:

$$\begin{aligned} z = \xi: & \quad \Phi = \text{const}, \\ z \rightarrow \infty: & \quad \Phi = -4\pi\chi_0 z. \end{aligned}$$

Динамическое граничное условие на поверхности с учетом лапласовского давления и давления электрического поля при $z = 0$ записывается в виде [15]:

$$p = p_{\text{атм}} + g\rho\xi - \sigma \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} - 4\pi\chi_0^2 k, \quad (3)$$

где $p_{\text{атм}} = \text{const}$, χ_0 – поверхностная плотность заряда, σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Подставив (3) в (1), получаем

$$\frac{\partial U_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \left(g\rho \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} - \sigma \frac{\partial^3 \xi}{\partial x^3} - 4\pi\chi_0^2 k \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} \right). \quad (4)$$

Дифференцируя (2) по t и подставляя в (4), получим искомое волновое уравнение:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + \frac{S_0}{\rho b} \left(4\pi\chi_0^2 k \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \sigma \cdot \frac{\partial^4 \xi}{\partial x^4} - g \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \right) = 0.$$

Полагая, что ξ имеет вид бегущей волны $\xi = a \cdot \exp[i(kx - \omega t)]$, несложно получить дисперсионное уравнение для рассматриваемых волн бесконечно малой амплитуды в тонком слое жидкости:

$$\omega^2 = \frac{S_0}{\rho b} \cdot (\sigma k^4 + \rho g k^2 - 4\pi\chi_0^2 k^3).$$

В безразмерных переменных, в которых $\rho = \sigma = g = 1$, а масштабы характерных величин записываются как

$$S_{0*} = \frac{\sigma}{\rho g}, \quad b_* = \left(\frac{\sigma}{\rho g} \right)^{1/2}, \quad \chi_{0*} = (\rho \sigma g)^{1/4}, \quad \omega_* = \left(\frac{\rho g^3}{\sigma} \right)^{1/4}, \quad k_* = \left(\frac{\rho g}{\sigma} \right)^{1/2},$$

дисперсионное уравнение примет более удобную для дальнейшего анализа форму:

$$\omega^2 = \frac{S_0}{b} \cdot (k^4 - Wk^3 + k^2), \quad (5)$$

где $W = 4\pi\chi_0^2 / \sqrt{\rho g \sigma}$ – параметр, характеризующий давление электрического поля, и за всеми безразмерными величинами сохранены прежние обозначения.

Из (5) несложно видеть, что при достаточно большом значении безразмерного параметра W квадрат частоты волны может перейти через ноль и стать отрицательным. А это означает, что частота станет мнимой, и выражение для бегущей волны преобразуется к виду $\xi = a \cdot \exp(ikx) \cdot \exp(\pm \omega t)$. Часть решения с отрицательным знаком при ωt будет экспоненциально убывать со временем, а с положительным – нарастать. Другими словами, будет иметь место неустойчивость свободной поверхности тонкого слоя по отношению к поверхностному заряду.

Чтобы найти волновое число, отвечающее волне с максимальным инкрементом неустойчивости, приравняем нулю производную от частоты по волновому числу:

$$\frac{\partial \omega}{\partial k} \equiv \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{S_0}{b} (k^4 - Wk^3 + k^2) \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{S_0}{b} \cdot (4k^3 - 3Wk^2 + 2k) \right) = 0.$$

Сравнивая это условие с условием проявления неустойчивости $\omega^2 = 0$, получим систему двух линейных алгебраических уравнений для отыскания критических значений $W_{кр}$ и $k_{кр}$:

$$k^2 - Wk + 1 = 0, \quad 4k^2 - 3Wk + 2 = 0, \quad (6)$$

откуда легко находятся: $k_{кр} = 1$, $W_{кр} = 2$.

Таким образом, критические условия реализации неустойчивости заряженной свободной поверхности тонкого слоя в приближении $h \ll \lambda$ совпадают с таковыми на поверхности бесконечно глубокой жидкости [15]. Но некоторое различие все же имеется.

Из первого из условий (6), то есть из условия $(\partial \omega / \partial k) = 0$ несложно найти зависимость критического значения параметра W от произвольного волнового числа

$$W_{кр} = \frac{2}{3k} + \frac{4}{3}k.$$

Для бесконечно глубокой жидкости такая же зависимость имеет вид

$$W_{кр} = k + \frac{1}{k}.$$

Полученный результат означает, что при реализации неустойчивости свободной поверхности жидкости по отношению к поверхностному заряду эмиссионные выступы на тонком слое жидкости будут формироваться за счет суперпозиции более длинных капиллярных волн, чем в случае глубокой жидкости.

Интересно отметить, что фазовая скорость капиллярно-гравитационных волн на заряженной поверхности тонкого слоя идеальной жидкости является функцией волнового числа:

$$V_{\phi} = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{S_0}{b} (k^2 - Wk + 1)}$$

в отличие от длинных чисто гравитационных волн [5], для которых фазовая скорость $V_{\phi} = \left(\frac{S_0}{b} \right)^{1/2}$ не зависит от волнового числа k .

ЛИТЕРАТУРА

1. *Baily A.G.* Electrostatic atomization of liquids // *Sci. Prog. Oxf.* 1974. V.61. P.555 – 581.
2. *Baily A.G.* Electrostatic spraying of liquids // *Phys. Bull.* 1984. V. 35. № 4. P.146 – 148.
3. *Коженков В.И., Фукс Н.А.* Электрогидродинамическое распыление жидкости (обзор) // *Успехи химии.* 1976. Т. 45. № 12. С. 2274 – 2284.
4. *Габович М.Д.* Жидкометаллические источники ионов (обзор) // *УФН.* 1983. Т. 140. №. 1. С. 137 – 151.
5. *Дудников В.Г., Шабалин А.Л.* Электрогидродинамические источники ионных пучков (обзор) // *Препринт 87-63 ИЯФ СО АН СССР.* Новосибирск. 1987.
6. *Григорьев А.И., Сыщиков Ю.В., Ширяева С.О.* Электростатическое монодиспергирование жидкостей как метод получения двухфазных систем (обзор) // *ЖПХ.* 1989. Т. 62. № 9. С. 2020 – 2026.
7. *Fenn J.B., Mann M., Meng C.K. et al.* Electrospray ionization for mass spectrometry of large biomolecules // *Science.* 1989. V. 246. № 4926. P. 64 – 71.
8. *Григорьев А.И.* Неустойчивости заряженных капель в электрических полях (обзор) // *Электронная обработка материалов.* 1990. № 6. С. 23 – 32.
9. *Григорьев А.И., Ширяева С.О., Шевченко С.И.* Электрогидродинамические неустойчивости в дисперсных системах (обзор) // *Научное приборостроение.* 1991. Т. 1. № 3. С. 25 – 43.

10. Grigor'ev A.I., Grigor'eva I.D., Shiryayeva S.O. Ball lightning and St.Elmo's fire as forms of thunderstorm activity // J.Sci.Expr. 1991. V. 5. № 2. P.163 –190.
11. Григорьев А.И., Ширяева С.О. Закономерности рэлеевского распада заряженной капли // ЖТФ. 1991. Т. 61. № 3. С. 19 – 28.
12. Григорьев А.И., Ширяева С.О. Капиллярные неустойчивости заряженной поверхности капель и электродиспергирование жидкости (обзор) // Изв. РАН. МЖГ. 1994. № 3. С. 3 – 20.
13. Белоножко Д.Ф., Григорьев А.И. Деление заряженных капель во внешнем электрическом поле на части сравнимых размеров (обзор) // Электронная обработка материалов. 2000. № 4. С. 17 – 27.
14. Tonks L. A theory of liquid surface rupture by a uniform electric field // Phys. Rev. 1935. V. 48. P.562 – 568.
15. Френкель Я.И. К теории Тонкса о разрыве поверхности жидкости постоянным электрическим полем в вакууме // ЖЭТФ. 1936. Т. 6. № 4. С. 348 – 350.
16. Taylor G.I., McEwan A.D. The stability of a horizontal fluid interface in a vertical electric field // J. Fluid Mech. 1965. V. 22. № 1. P. 1 – 15.
17. Taylor G. Disintegration of water drops in an electric field // Proc. Roy. Soc. A. 1964. V. 280. P. 383 – 397.
18. Александров М.Л., Галль Л.Н., Иванов В.Я. и др. Расчет свободной поверхности проводящей жидкости, находящейся в сильном электрическом поле // Изв. АН СССР. МЖГ. 1983. № 6. С. 165 – 167.
19. Allen J.E. A note on the Taylor cone // J. Phys. D: Appl. Phys. 1985. V. 18. № 1. P. 59 – 62.
20. Ширяева С.О., Григорьев А.И., Белоножко Д.Ф. О некоторых закономерностях реализации неустойчивости плоской заряженной поверхности жидкости // ЖТФ. 1999. Т. 69. № 7. С. 15 – 22.
21. Ермаков В.И. Об устойчивости границы раздела двух диэлектрических жидкостей в электрическом поле // Магнитная гидродинамика. 1976. № 4. С. 85 – 88.
22. Зайцев М.В., Шлиомис М.И. Характер неустойчивости поверхности раздела двух жидкостей в постоянном поле // ДАН СССР. 1969. Т. 188. № 6. С. 1261 – 1262.
23. Иевлев И.И., Исерс А.Б. Равновесие и устойчивость поверхности раздела жидких диэлектриков в электрическом и гравитационном полях // Магнитная гидродинамика. 1976. № 4. С. 89 – 95.
24. Ермаков В.И. Об устойчивости плоской поверхности раздела жидкостей в нормальном электрическом поле // Вестник Харьковского университета. № 221. Прикладная математика и механика. 1981. С. 46 – 51.
25. Белоножко Д.Ф., Григорьев А.И., Ширяева С.О. Неустойчивость плоской границы раздела двух несмешивающихся проводящих вязких жидкостей в нормальном электростатическом поле // Изв. РАН. МЖГ. 1998. № 6. С. 116 – 123.
26. Григорьев О.А., Ширяева С.О. Неустойчивость заряженной плоской поверхности тангенциального разрыва двух несмешивающихся жидкостей различных плотностей // ЖТФ. 1996. Т. 66. № 2. С. 23 – 34.
27. Ширяева С.О., Кузьмичев Ю.Б., Голованов А.С., Белоножко Д.Ф. Особенности реализации неустойчивости Кельвина-Гельмгольца при конечной толщине верхней среды // Электронная обработка материалов. 2000. № 2. С. 25 – 33.
28. Ширяева С.О., Григорьев О.А., Белоножко Д.Ф. О взаимодействии капиллярных волн на заряженном тангенциальном разрыве поля скоростей // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. № 11. С. 10 – 17.
29. Григорьев А.И. Неустойчивость заряженной плоской границы раздела сред по отношению к тангенциальному разрыву на ней зависящего от времени поля скоростей // ЖТФ. 2000. Т. 70. № 1. С. 24 – 26.
30. Ширяева С.О. Линейное взаимодействие волн на заряженной границе раздела сред при наличии тангенциального разрыва поля скоростей // ЖТФ. 2001. Т. 71. № 3. С. 9 – 16.
31. Алиев И.Н. Параметрическая неустойчивость поверхности проводящей жидкости в переменном электрическом поле // Магнитная гидродинамика. 1987. № 2. С. 78 – 82.
32. Алиев И.Н., Филиппов А.В. О волнах, распространяющихся по плоской поверхности вязкой проводящей жидкости в электрическом поле // Магнитная гидродинамика. 1989. № 4. С. 94 – 98.
33. Григорьев А.И., Григорьев О.А., Ширяева С.О. Механизм развития неустойчивости заряженной поверхности жидкости // ЖТФ. 1992. Т. 62. № 9. С. 12 – 21.
34. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М., 1959.

35. Григорьев А.И., Ширяева С.О., Коромысов В.А., Белоножко Д.Ф. Капиллярные колебания и неустойчивость Тонкса-Френкеля слоя жидкости конечной толщины // ЖТФ. 1997. Т. 67. № 9. С. 12 – 21.
36. Григорьев О.А. Влияние эффекта динамического поверхностного натяжения на волновые движения жидкости // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. № 24. С. 15 – 21.
37. Григорьев О.А., Ширяева С.О., Григорьев А.И. О возможной природе движений жидкости, вызванных релаксацией поверхностного натяжения // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. № 12. С. 36 – 41.
38. Ширяева С.О., Григорьев О.А., Григорьев А.И. Эффект динамического поверхностного натяжения и капиллярное волновое движение заряженной поверхности жидкости // ЖТФ. 1996. Т. 66. № 10. С. 31 – 46.
39. Ширяева С.О., Григорьев А.И., Белоножко Д.Ф. Влияние упругости и динамического поверхностного натяжения на спектр волновых движений заряженной поверхности жидкости // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 16. С. 32 – 37.
40. Ширяева С.О., Григорьев О.А. Влияние динамического поверхностного натяжения на инкремент неустойчивости Тонкса-Френкеля // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. № 19. С. 61 – 65.
41. Ширяева С.О., Григорьев О.А. О влиянии эффекта релаксации поверхностного натяжения на спектр движений жидкости с заряженной свободной поверхностью // ЖТФ. 2000. Т. 70. № 6. С. 31 – 36.
42. Melcher J.R. Electrohydrodynamic and magnetohydrodynamic surface waves and instabilities // Phys. Fluids. 1961. V. 4. № 11. P.1348 – 1354.
43. Melcher J.R., Smith C.V. Electrohydrodynamic charge relaxation and interfacial perpendicular-field instability // Phys. Fluids. 1969. V. 12. № 4. P. 778 – 790.
44. Melcher J.R., Schwarz W.J. Interfacial relaxation over stability in a tangential electric field instability // Phys. Fluids. 1968. V. 11. № 12. P. 2604 – 2616.
45. Melcher J.R., Taylor G.I. Electrohydrodynamics: a review of the role of interfacial shear stress // Ann. Rev. Fluid Mech. Palo. Alto, California. 1969. V. 1. P. 111 – 146.
46. Ширяева С.О., Григорьев А.И., Коромысов В.А. Неустойчивость капиллярных зарядово-релаксационных движений жидкости // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. № 4. С. 89 – 94.
47. Саночкин Ю.В. Влияние вязкости на свободные поверхностные волны в жидкостях // Изв. РАН. МЖГ. 2000. № 4. С. 156 – 164.
48. Григорьев О.А., Ширяева С.О. Волны в релаксирующей вязкой электропроводной жидкости, обладающей поверхностным зарядом // Изв. РАН. МЖГ. 1996. № 1. С. 98 – 105.
49. Ширяева С.О., Григорьев О.А., Муничев М.И., Григорьев А.И. Волновое движение в заряженной вязкоупругой жидкости // ЖТФ. 1996. Т. 66. № 10. С. 47 – 62.
50. Григорьев О.А., Ширяева С.О. Капиллярные волны в релаксирующей вязкой электропроводной жидкости, обладающей поверхностным зарядом // Изв. РАН. МЖГ. 1996. № 1. С. 98 – 105.
51. Ширяева С.О., Григорьев О.А. Влияние релаксации вязкости на величину инкремента неустойчивости Тонкса-Френкеля // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. № 2. С. 1 – 4.
52. Ширяева С.О., Григорьев О.А. О капиллярном движении вязкоупругой жидкости с заряженной свободной поверхностью // ЖТФ. 2000. Т. 70. № 8. С. 39 – 44.
53. Белоножко Д.Ф., Григорьев А.И., Рахманова Ю.Д. Взаимодействие релаксационных волн с волнами перераспределяющегося по свободной поверхности поверхностно-активного вещества // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 18. С. 25 – 31.
54. Ширяева С.О., Белоножко Д.Ф., Григорьев А.И. Об особенностях капиллярных движений растворов поверхностно-активных веществ // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 2. С. 22 – 29.
55. Ширяева С.О., Белоножко Д.Ф., Григорьев А.И. О влиянии заряда на формирование волнового микрорельефа на поверхности вязкоупругой среды // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. № 21. С. 12 – 20.
56. Белоножко Д.Ф., Григорьев А.И. Капиллярные колебания вязкоупругой среды под влиянием постоянного внешнего воздействия // ЖТФ. 2000. Т. 70. № 11. С. 15 – 23.
57. Белоножко Д.Ф., Григорьев А.И. Автоколебательная неустойчивость свободной поверхности вязкоупругой среды // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. № 3. С. 80 – 85.

58. Григорьев А.И., Ширяева С.О., Белоножко Д.Ф., Голованов А.С. О формировании волнового микрорельефа на поверхности полупроводника при распыливании его сильноточным ионным пучком // Электронная обработка материалов. 2000. № 6. С. 26 – 30.
59. Бояджиев Х., Бешков В. Массоперенос в движущихся пленках жидкости. М., 1988.
60. Ильичев А.Т. Уединенные волны в средах с дисперсией и диссипацией (обзор) // Изв. РАН. МЖГ. 2000. № 2. С. 3 – 27.
61. Демехин Е.А., Каплан М.А., Шкадов В.Я. О математических моделях теории тонких слоев вязкой жидкости // Изв. АН СССР. МЖГ. 1987. № 6. С. 73 – 81.
62. Демехин Е.А. Неустойчивость и нелинейные волны в тонких слоях вязкой жидкости: Автореф. дис. на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. М., 1989.
63. Цвелодуб О.Ю. Нелинейные волны на стекающих пленках вязкой жидкости: Автореф. дис. на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. АН СССР. СО. Новосибирск, 1989.
64. Стокер Д.Ж. Дж. Бифуркационные явления в теории поверхностных волн. Теория ветвления и нелинейные задачи на собственные значения. М., 1974.
65. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М., 1986.
66. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика / Под ред. И.А. Кибеля Ч. 1. Л., 1963.
67. Уизем Д.Ж. Линейные и нелинейные волны. М., 1977.
68. Аромин Э.Л., Иванов А.Н., Садовников Д.Ю. Предельные волны Стокса в жидкости конечной глубины // Изв. РАН. МЖГ. 1994. № 4. С. 125 – 129.
69. Габов С.А. Введение в теорию нелинейных волн. М., 1988.
70. Капица П.Л., Капица С.П. Волновое течение тонких слоев жидкости // ЖЭТФ. 1949. Т. 19. Вып.2. С.105 – 120.
71. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Алексеенко С.В. Стационарные двумерные катящиеся волны на вертикальной пленке жидкости // ИФЖ. 1976. Т. 30. № 5. С. 780 – 785.
72. Накоряков В.Е., Шрейбер И.Р. Волны на поверхности тонкого слоя вязкой жидкости // ПМТФ. 1973. № 2. С. 109 – 113.
73. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Алексеенко С.В., Орлов В.В. Мгновенный профиль скорости в волновой пленке жидкости // ИФЖ. 1977. Т. 33. № 3. С. 399 – 404.
74. Гагарин А.Г. Влияние постоянного электрического поля на пленочное течение жидкого диэлектрика // ИФЖ. 1985. Т. 48. № 3. С. 432 – 436.
75. Шкадов В.Я. Волновые режимы течения тонкого слоя вязкой жидкости под действием силы тяжести // Изв. АН СССР. МЖГ. 1967. № 1. С. 43 – 51.
76. Александров Н.Л. Сон Э.Е. Лекции по теории устойчивости гидродинамических и тепловых процессов. М., 2000.
77. Иногамов Н.А., Демьянов А.Ю., Сон Э.Е. Гидродинамика перемешивания. М., 1999.
78. Babchin A.J., Frenkel A.L., Levich B.G., Sivashinsky G.I. Nonlinear saturation of Rayleigh-Taylor instability in thin films // Phys. Fluids. 1983. V. 26. № 11. P. 3159 – 3161.
79. Биркгоф Г. Гидродинамика. Методы. Факты. Подобие. М., 1963.
80. Гершуни Г.З. Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М., 1972.
81. Демехин Е.А., Потанов О.Л. Математическое моделирование гидродинамики волновых пленок жидкости с внешними активными воздействиями // Препринт № 215-90. Новосибирск. 1990.
82. Шкадов В.Я., Запранов З.Д. Течения вязкой жидкости. М., 1984.

Поступила 10.12.02

Summary

The characteristic properties of experimental and theoretical investigations of a wave flow on a horizontal and inclined fluid layers with charged free surface are studied.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССА НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЭЛЕКТРООЧИСТКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ВО ВНЕШНЕМ ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

**Институт прикладной физики АНРМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD–2028, Республика Молдова
**Аграрный государственный университет РМ,
ул. Мирчеишь, г. Кишинев MD–2049, Республика Молдова*

1. Вводные замечания. В работе [1] получена формула для остаточной относительной концентрации диэлектрической примеси (частицы воска) в диэлектрической жидкости (трансформаторном масле), подвергнутой с целью очистки воздействию внешнего электрического поля

$$\Phi^*(t) = \frac{(1-v)e^{\lambda t}}{1-ve^{\lambda t}}, \quad (1)$$

где параметры v и λ зависят от напряженности поля и свойств дисперсной среды согласно формулам

$$v = \frac{A \cdot \Phi_0}{E_0}; \quad \lambda = \frac{bqE_0(1-v)}{l}; \quad A = -\frac{\rho_1 \cdot l}{\epsilon_0 \epsilon_2}, \quad (2)$$

причем Φ_0 – начальная концентрация ($\Phi^* \equiv \Phi/\Phi_0$); ρ_1 – плотность объемных электрических зарядов примесного слоя (ξ -слоя [1]) – отрицательная при предполагаемом положительном коллекторе примесей; l – характерное расстояние между электродами (в [1] рассматривалась плоскопараллельная модель конденсатора); ϵ_2 – диэлектрическая проницаемость замкнутой фазы ($\epsilon_2 \approx 2$); b – подвижность примесных частиц, q – их заряд.

Для первоначальной апробации формула (1) была применена для описания экспериментальных данных, приведенных на кривой 1 рис. 1 [1].

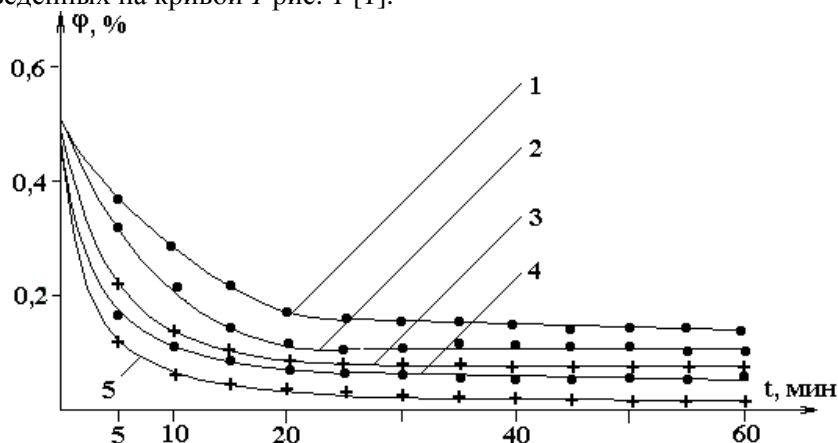


Рис.1. Зависимость остаточной концентрации от времени обработки для суспензии подсолнечное масло–воск (0,5%)

$U, 10^3 \text{ В}: 1 - 9; 2 - 15; 3 - 18; 4 - 20; 5 - 23$

При этом в предположении малости v по сравнению с единицей ($v \ll 1$) методом наименьших квадратов получена система двух линейных уравнений относительно параметров λ и v :

$$\begin{cases} \overline{\lambda t^2 + v \cdot t(1 - \varphi^*)} = -\overline{t \cdot \ln \varphi^*}, \\ \overline{\lambda \cdot t(1 - \varphi^*) + v(1 - \varphi^*)^2} = -\overline{(1 - \varphi^*) \ln \varphi^*}, \end{cases} \quad (3)$$

где черта означает усреднение по числу экспериментальных точек (значений времени t и концентрации φ^*) согласно общепринятым формулам типа

$$\bar{A} = \frac{\sum A_i}{n}.$$

В результате для кривой I получена зависимость с известными по опытными данным параметрами $\lambda = 0,0501 \text{ мин}^{-1}$, $v = 0,1845$:

$$\varphi^*(t) = \frac{0,815 \cdot e^{-0,0501t}}{1 - 0,185 \cdot e^{-0,0501t}}, \quad (4)$$

которая в пределах ее применимости ($t \leq t_0 = 25 \text{ мин}$ [1]) практически совпадает с экспериментальной (рис. 1).

2. Нахождение параметров λ и v на основе опытных данных. С целью выяснения количественного влияния электрического поля, а также свойств среды и других характеристик на процесс электроочистки необходимо найти числовые значения параметров λ и v для кривых 4, 5, соответствующих другим напряжениям на электрофильтре (рис. 1).

Из формулы (4) следует, что параметр v не так уж мал ($v \leq 0,2$), однако все же можно надеяться, что для остальных кривых v не будет превосходить найденное значение для кривой I . Исходя из этого, нами решалась система (3). Соответствующие результаты приводятся в табл. 1.

Таблица 1. Значения λ и v из системы уравнений (3)

№ кривых	$\lambda, \text{ мин}^{-1}$	v	$U, \text{ кВ}$
I	$5,01 \cdot 10^{-2}$	$1,85 \cdot 10^{-1}$	9
2	$4,23 \cdot 10^{-2}$	$8,04 \cdot 10^{-1}$	15
3	$3,96 \cdot 10^{-2}$	1,26	18
4	$4,52 \cdot 10^{-2}$	1,34	20
5	$5,97 \cdot 10^{-2}$	1,60	23

Как видно из табл.1, ситуация усугубилась: v – не уменьшается, а возрастает, перейдя через значения $v = 1$ и далее, превышая единицы, что говорит о неправомерности линеаризации логарифма при получении (3) ($\ln[1 - v(1 - \varphi^*)] \approx -v(1 - \varphi^*)$), и противоречит теоретической формуле (1), которая, очевидно, предполагает $v < 1$.

Таким образом, приходим к общему выводу, что линейная модель (3) непригодна для отыскания основных параметров задачи λ и v (за исключением случая кривой I) и приходится с самого начала решать существенно нелинейную задачу.

Один из подходов состоит в следующем. Во-первых, данные первой строки табл. 1 можно считать достоверными (в силу относительной малости v). Далее λ уменьшается, пройдя через минимум (весьма сомнительный в силу немалости v для других кривых) и приближается к примерно исходному значению, причем пределы вариации λ не слишком велики, что наводит на мысль принять в нулевом приближении λ постоянным, равным некоторому среднему значению, например, $\lambda = \lambda_0 = 0,05 \text{ мин}^{-1}$, что нами и сделано.

Тогда задача будет решена элементарно, если выразить v через известное λ_0 :

$$v = \frac{1 - \varphi^* e^{\lambda_0 t}}{1 - \varphi^*}. \quad (5)$$

При этом среднее значение v можно найти двояко: как среднеарифметическое по формуле

$$\bar{v} = \frac{\sum v_i}{n} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1 - \varphi_i^* e^{\lambda_0 t_i}}{1 - \varphi_i^*}, \quad (6)$$

и по методу наименьших квадратов согласно равенству

$$\tilde{v} = \frac{\overline{(1 - \varphi^*)(1 - \varphi^* e^{\lambda_0 t})}}{(1 - \varphi^*)^2}. \quad (7)$$

Результаты вычислений приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения параметра v по формулам (5) – (7)

№ кривой		1		2		3		4		5	
№	t , мин	φ^*	v	φ^*	v	φ^*	v	φ^*	v	φ^*	v
1	5	0,72	0,270	0,62	0,527	0,43	0,786	0,34	0,854	0,24	0,910
2	10	0,58	0,104	0,41	0,549	0,26	0,772	0,22	0,817	0,12	0,912
3	15	0,42	0,191	0,28	0,566	0,18	0,755	0,16	0,787	0,10	0,876
4	20	0,32	0,191	0,24	0,457	0,17	0,648	0,13	0,743	0,07	0,871
\bar{v}			0,189		0,527		0,740		0,800		0,892
\tilde{v}			0,183		0,520		0,731		0,814		0,890
δ , %			32,3		8,20		7,60		5,30		2,10
U , кВ			9		15		18		20		23

В табл. 2, помимо исходных данных для t и φ^* приведены частные значения для v , вычисленные по формуле (5). Кроме того, приводятся относительные среднеквадратичные отклонения $\delta = (\sigma_v / \tilde{v}) \cdot 100\%$, где $\sigma_v = \sqrt{(v_i - \tilde{v})^2}$, характеризующие степень близости аппроксимаций к истинным значениям. Видно, что наименее достоверной представляется кривая 1 ($\delta = 32\%$). Из табл. 2 следует, что v для всех кривых являются монотонно убывающими функциями, хотя и с несущественным размахом вариации. А это уже закономерность, свидетельствующая о том, что показатель λ теоретически, хотя и должен быть постоянным вдоль каждой кривой, но принятое значение $\lambda_0 = 0,05 \text{ мин}^{-1}$ не отражает истинной величины. Для окончательного решения задачи существуют различные способы, но наиболее простым и точным оказался подбор методом „вилок” (аналог метода хорд). Идея метода состоит в том, что если теоретическая зависимость (5) адекватна, то для некоторых значений λ функция $v(t)$ может быть убывающей, как в нашем случае (табл. 2), а для некоторых – возрастающей. Подбрав два таких крайних значения λ , методом деления интервала пополам можно сколь угодно близко локализовать решение, для которого приблизительно $v(t) \cong \text{const}$. Это и будет искомым решением. Результаты проведенных таким образом вычислений сведены в табл. 3.

На рис. 2 приведены графики зависимостей $\lambda(U)$, $v(U)$. Как видно из рис. 2, $v(U)$ имеет вид S-образной кривой; $v(U) \rightarrow 1$ при возрастании U . Ход кривой $\lambda(U)$ объясняет резкое падение очистительного эффекта с ростом напряжения выше соответствующего $\lambda = \lambda_{\text{max}}$; кривая $\lambda(U)$ имеет максимум вопреки кажущемуся ошибочному минимуму в табл. 1. Значение $\lambda = \lambda_{\text{max}}$ при $U \approx (14 - 15) \text{ кВ}$ указывает одновременно и на наиболее оптимальное напряжение, которое можно рекомендовать в практических целях.

Таблица 3. Численный расчет λ и ν

№ кривой	1	2	3	4	5
$\lambda, 10^{-2}$ мин	5,01	6,00	2,50	0,55	0,30
$\nu, 10^{-1}$	1,89	3,89	8,93	9,84	9,95
$U, \text{кВ}$	9	15	18	20	23

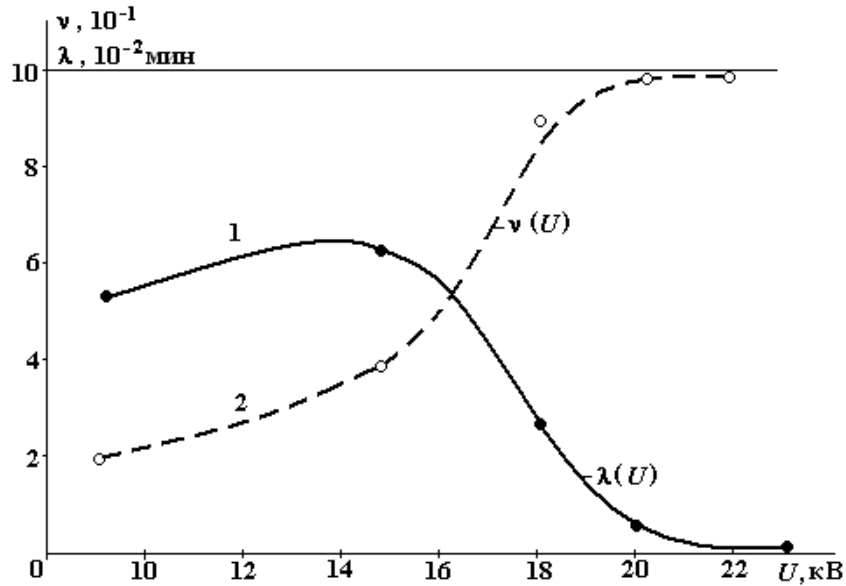


Рис. 2. Зависимость $\lambda(U), \nu(U)$

Теперь построим обобщенную зависимость

$$f(\lambda, \nu) = t, \tag{8}$$

где

$$f(\lambda, \nu) \equiv \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1 - \nu(1 - \phi^*)}{\phi^*}. \tag{9}$$

Результаты вычислений $f(\lambda, \nu)$ приводим в табл. 4.

Таблица 4. Результаты вычислений $f(\lambda, \nu)$ по формуле (9)

№ кривой	1	2	3	4	5
1	5,47	5,31	5,31	5,56	5,24
2	9,22	10,51	10,63	10,03	12,00
3	15,00	15,74	15,88	14,67	14,68
4	20,00	17,94	16,81	18,50	21,44

На рис. 3 приведен график зависимости (8), построенной по данным табл. 2 и 4. Как видно, максимальная ошибка составляет $\sim \frac{4}{20} \cdot 100\% = 20\%$, среднеквадратичная $\approx 5\%$.

3. Обсуждение результатов. Теоретические предпосылки. Исходная основополагающая формула (1) носит „архитектурный” характер. Для понимания физической сущности явлений, протекающих в сложном процессе электроочистки, необходимо обратиться к соответствующим формулам (2) для λ и ν , которые содержат три электрических параметра: E_0 – напряженность внешнего электрического поля, очевидно, пропорциональная напряжению U , q – заряд частиц вне ξ -слоя, ρ_1 – плотность заряда внутри этого слоя, которая будет равна произведению концентрации частиц n , внутри слоя на их заряд, также внутри этого слоя q_1 , то есть $\rho_1 = n_1 \cdot q_1$. При этом следует заметить, что q_1

необязательно должен совпадать с q (вследствие утечек на коллекторе и других причин), но оба заряда, очевидно, будут пропорциональны некоторым положительным степеням напряжения U .

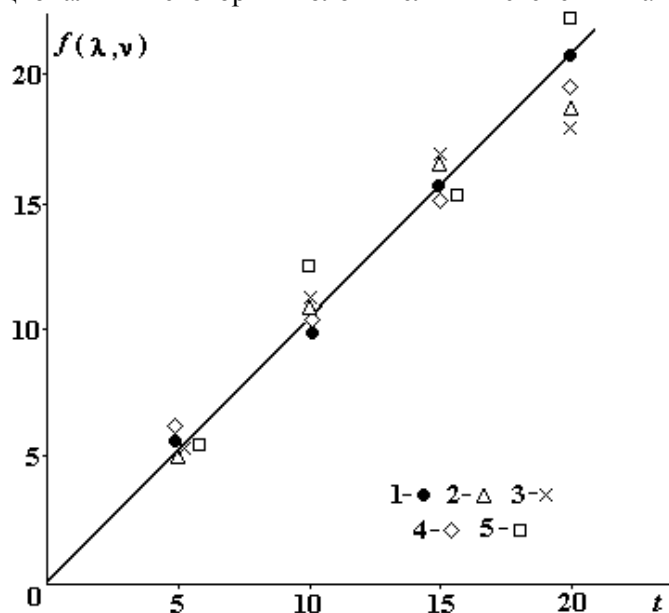


Рис. 3. Обобщенная зависимость $f(\lambda, \nu) = t$

Непосредственная зависимость $\nu(U)$ представлена на экспериментальной кривой рис. 2 и ее можно аппроксимировать степенной зависимостью с положительным переменным показателем m :

$$\nu = C \cdot U^m, \quad (10)$$

где C – некий коэффициент пропорциональности. Зная эту формулу, из (2) найдем

$$\rho_1 = -C \frac{\epsilon_0 \epsilon_2}{\varphi_0 l^2} U^{m+1}, \quad (11)$$

где было принято $E_0 = U/l$.

Правой части (11) будет пропорционален и заряд частиц ξ -слоя ($q_1 \sim U^{m+1}$). Величины C и m можно найти из опытных данных (кривая 2 рис. 2), так что вопрос о числовых значений ν и ρ_1 можно считать решенным.

Заряд частицы q вне слоя зависит от механизма их зарядки на высоковольтном электроде и в электроконвективном потоке. Оставив пока детали этих механизмов в сторону, полагаем, что, как уже отмечалось, q пропорционален некоторой степени s напряжения

$$q = C_1 U^s, \quad (12)$$

где C_1 – некий коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрии частиц, электрофизических свойств дисперсией среды в целом, s – показатель степени, который, в частности, может быть равным и показателю степени для q_1 , то есть $m + 1$.

Используя формулы (10), (12), можем по второй формуле (2) установить явную теоретическую зависимость $\lambda(U)$ и сопоставить ее с экспериментально найденной (кривая 1 рис 2). Подстановка (10) и (12) в (2) дает

$$\lambda = C_1 \frac{b}{l^2} (U^{s+1} - C \cdot U^{m+s+1}). \quad (13)$$

Эта кривая с двумя экстремумами, которые находим, приравнявая нулю первую производную $\lambda'(U) = 0$,

$$U_m = \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \left[\frac{s+1}{C(m+s+1)} \right]^{\frac{1}{m}} \end{array} \right. \quad (14)$$

Найдем вторую производную

$$\lambda''(U) = C_1 \frac{bU^{s-1}}{l^2} [s(s+1) - C(m+s)(m+s+1)U^m]. \quad (15)$$

Подставив в эту формулу U^m из (14), получим

$$\lambda^n(U_m) = -C_1 \frac{bU_{\text{кр}}^{s-1}}{l^2} m(s+1) < 0.$$

Таким образом, при любых положительных значениях показателей степеней m и s кривая $\lambda(U)$ имеет именно максимум, который подтверждается экспериментальной кривой 1 рис.2.

Для количественных оценок прежде всего необходимо знать коэффициент C , а также показатель степени m . Попытка традиционного представления зависимости (10) в логарифмической сетке координат не дала желаемых результатов, поскольку, как оказалось, показатель степени m является переменной величиной во всем интервале изменения U . Это и понятно, поскольку, как следует из рис. 2, функция $v(U)$ имеет горизонтальную асимптоту ($v = 1$). Поэтому данная функция сложно-показательная и пока не задаемся целью ее аппроксимации единой аналитической формулой. Однако в целях оценок можно на участке (0 – 18) кВ считать ее степенной и найти значения C и m , например, методом наименьших квадратов по трем точкам (9; 1,89); (15; 3,89); (18; 8,93). Результат оказывается

$$v = 1,55 \cdot 10^{-3} \cdot U^{2,14}. \quad (16)$$

В табл. 3 приведены (в углах клеток) значения v , вычисленные по этой формуле. Таким образом, оказывается $C = 1,55 \cdot 10^{-3}$; $m = 2,14$; U , кВ, а зависимость приблизительно квадратичная, так что для дальнейших оценок можно принимать $C = 1,6 \cdot 10^{-3}$, $m = 2$.

По формуле (14) оценим напряжение, на которое приходится максимум показателя λ (по точным формулам для C и m), приняв $s = 1$ (формула Потенье [2])

$$U_m = \left[\frac{(1+1) \cdot 10^3}{1,55 \cdot (2,14+1+1)} \right]^{\frac{1}{2,14}} \approx 14,6 \approx 15 \text{ (кВ)},$$

что практически точно соответствует опытным данным (см. кривая 1 рис.2). Таким образом, можно сделать общий вывод о том, что несмотря на, казалось бы, отдельные грубые приближения, теоретические представления на основе ранее полученной зависимости (1) полностью подтверждаются экспериментальными данными.

Заметим, что при этом не было принято во внимание электроконвективное движение жидкости. По-видимому, для данного случая диэлектрических примесей в диэлектрической среде фактор конвекции уступает фактору миграционного переноса массы в отличие от случая более проводящих частиц [3]. В будущем предстоит уточнение и рассмотрение новых физических нюансов процесса электроочистки с ориентацией, главным образом, на конечную цель исследований – их прикладной аспект.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гросу Ф.П., Болога М.К., Кожухарь И.А. К теории очистки диэлектрических жидкостей от механической примеси в постоянном электрическом поле // Электронная обработка материалов. № 6. 2001. С. 36 – 42.
2. Верещагин И.П. и др. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. М., 1974.
3. Леу В.И. Электроочистка трансформаторного масла от механической примеси в постоянном электрическом поле // Электронная обработка материалов. 2002. № 5. С. 55 – 59.

Поступила 30.01.03

Summary

Results of theoretical investigations of the process of dielectric liquids purification from mechanical impurities under the influence of electric field are presented. The main regularities of this process are established and calculating dependencies for residual concentration on time are obtained.

СОВМЕЩЕНИЕ ПОДВОДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА И СОБСТВЕННОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ. ЧАСТЬ II (Исследование практической эффективности по результатам эмульгирования и диспергирования)

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
просп. Октябрьский, 43 А, г. Николаев, 54018, Украина*

Самым надежным и наглядным показателем высокой эффективности совмещения подводного электрического взрыва и собственного гидроакустического излучателя следует считать практическую сравнительную эффективность каких-либо разрядно-импульсных технологических (РИТ) процессов. Поскольку ранее у нас было достаточно много практических данных о разрядно-импульсных технологиях эмульгирования и диспергирования при использовании обычной технологической схемы, то для проверки эффективности совмещенных средств преобразования энергии в технологических реакторах выбраны названные РИТ процессы. Конкретными объектами исследований выбраны смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) и суспензии глинистых минералов. Были выбраны оптимальные параметры воздействия на объект обработки по оценкам интенсивности дополнительного акустического излучения и типоразмера гидродинамического излучателя, приведенные в первой части статьи. Экспериментальные работы проводились как в порционном режиме, так и при прокачке обрабатываемой жидкости через акустический реактор.

Целью данной части работы являлось также изучение возможностей практической реализации метода совместного электровзрывного и ультразвукового воздействия на свойства неметаллических материалов, в том числе на их взаимодействие с жидкой рабочей средой, при использовании в качестве источника ультразвукового поля гидродинамических излучателей, работающих от гидропотока, возникающего при электрическом взрыве в конденсированной среде [1].

Методические положения

Использовался преобразователь стержневого типа, располагавшийся аксиально с гидропотоком, который, набегаая на стержень, вызывал резонансные колебания его и жидкости реактора.

Ранее нами проведены исследования предложенного электровзрывного метода приготовления и регенерации водо-масляных смазочно-охлаждающих жидкостей, при котором обрабатываемый материал подвергался комплексному воздействию ударных волн, возникающих в зоне разряда, светового излучения и собственного акустического излучения разряда. Эти факторы создают условия для активного протекания процессов диспергирования и эмульгирования СОЖ. Была доказана возможность использования электровзрывной обработки для получения высокодисперсных стабильных эмульсий с высокой коррозионной стойкостью. В эмульсиях, полученных этим методом, полностью уничтожаются анаэробные бактерии, что повышает устойчивость эмульсий к расслоению. Были определены оптимальные параметры процесса и подготовлены исходные требования на создание электровзрывной установки по приготовлению эмульсии на основе эмульсола ЭТ-2 и промышленных масел.

Исходя из этого, в качестве объекта исследований были выбраны эмульсол ЭГТ или ЭТ-2 (ТУ38.10.1149-75), масло промышленное марки 20 или 30. Такой выбор позволил провести сравнительный анализ эффективности получения СОЖ электровзрывной обработкой и исследуемого совмещенного электровзрывного и ультразвукового воздействия. Рабочей средой при проведении исследований являлась техническая вода с удельным сопротивлением не ниже 15 Ом·м.

Кроме того, выполнены исследования по обработке глинистых суспензий, используемых в нефтяной и газовой промышленности. При обработке электровзрывом таких суспензий в основу методики обработки были положены рекомендации [2].

Использовался основной лабораторный комплекс, описанный в первой части статьи. Здесь

обрабатываемый материал подвергается совместному электровзрывному и ультразвуковому воздействию. Для проведения сравнительного анализа эффективности только электровзрывного воздействия обработка рабочей жидкости такого же состава производилась в том же реакторе с демонтированными гидродинамическими излучателями. Камера обработки располагалась вертикально и снабжалась нижними токоподводами, что позволяло осуществлять как порционную обработку материала при закрытых коллекторах входа и выхода, так и непрерывную прокачку материала через камеру. Подвод рабочей жидкости осуществлялся через кольцевой коллектор непосредственно в зону разряда, выход – через верхний патрубок после гидродинамического излучателя.

Выбор гидродинамического излучателя производился на основании анализа работы, результаты которой изложены в первой части статьи. Была принята конструкция конического резонатора переменного сечения с консольным креплением по оси камеры обработки. Этот вариант позволял реализовать в одной камере исследования как при демонтированной перфорированной пластине с гидродинамическим излучателем, так и совместное воздействие этих двух источников. Кроме этого, резонаторы выполнялись трех типоразмеров с различной толщиной торцевой кромки (1; 2; 4 мм), что позволило определить влияние конусности корпуса резонатора и толщины торцевой кромки на характер возмущения и результат его воздействия на объект.

В режиме непрерывной обработки камера монтировалась на экспериментальном стенде с двумя мерными расходными баками, связанными между собой пульпопроводом через дросселирующий вентиль.

Питание на стенд подавалось от лабораторного пульты-щита. В качестве источника высокого напряжения использован малогабаритный генератор импульсных токов ГИТ 2,5/50, позволявший регулировать вводимую энергию в трех диапазонах: 625; 1250; 2500 Дж при максимальном напряжении 50 кВ.

Был принят следующий порядок проведения опытов. Первоначально рабочую жидкость с соотношением эмульсол-вода 1:20 обрабатывали в электроразрядной камере-реакторе без гидродинамических излучателей, то есть без наведенного дополнительного акустического поля. Затем такую же рабочую жидкость обрабатывали в реакторе с установленными поочередно тремя типоразмерами гидродинамических излучателей. Режимы устанавливались одинаковыми (они приведены в первой части статьи). Время обработки одной загрузки 60 с, при температуре рабочей жидкости 293 К.

В качестве основных контролируемых параметров рабочей жидкости в соответствии с ГОСТ 6243-75 принимались: стабильность эмульсии; водородный показатель; коррозионные свойства.

Проверку качества СОЖ по этим характеристикам проводили сразу же после их обработки. Сравнение проводили с эмульсиями, приготовленными стандартным методом, а также использовали результаты исследований по электроразрядной обработке с линейной системой электродов. Стабильность эмульсии определяли в соответствии с ГОСТ по объему масла, выделившегося на поверхности эмульсии после выдержки (отстоя) в течение 3 часов. Водородный показатель оценивали по рН эмульсии, определяемый рН-метром типа ЛПУ-0,1; РН-340 или с помощью универсальной индикаторной бумаги. Коррозионные свойства эмульсий определяли по потемнению шлифованных пластин после нанесения на их поверхность капель эмульсии и выдержки в течение 4 часов.

Результаты исследований

Начальная серия исследований выполнялась при энергии в импульсе 625 Дж и частоте импульсов 4 Гц. Оказалось, что при этом режиме гидросток, создаваемый разрядом, недостаточно интенсивен и эмульгирование происходит неэффективно – при отстое на поверхности появляются следы масла.

В следующей серии опытов определялась эффективность эмульгирования при энергии в импульсе 1250 и 2500 Дж, частоте импульсов 2 и 1 Гц соответственно. Эффективность воздействия контролировалась по стабильности эмульсии в течение 4 часов. Эмульсии, полученные на этих режимах, обладали одинаковой стабильностью. Поэтому дальнейшие эксперименты проводились с использованием двух установленных режимов.

Ставилась задача определения нижней границы удельного расхода энергии для получения стабильной эмульсии.

Объем камеры обработки составлял 5 дм³, поэтому для получения удельного расхода энергии 2,5 кДж/дм³ при энергии импульса 2500 Дж необходимо 5 импульсов, а при энергии импульса 1250 Дж – 10 импульсов.

Постепенное снижение числа импульсов на постоянный объем эмульсии показало, что при энергии импульса 2500 Дж стабильность эмульсии уменьшается при воздействии 4 импульсами, а при энергии импульса 1250 Дж снижение стабильности наступает при воздействии 7 импульсами.

Следовательно, нижним пределом удельного расхода энергии импульса 2500 Дж служит энергия 2,0 кДж/дм³, а при энергии импульса 1250 Дж – энергия 1,75 кДж/дм³.

Соответственно, дальнейшие эксперименты проводились с параметрами: энергия импульса – 1250 Дж, частота импульсов – 2 Гц.

На следующем этапе исследований выполнены эксперименты по проверке эффективности процесса эмульгирования с установленными гидродинамическими излучателями. При этом постоянными параметрами являлись: энергия импульса – 1250 Дж; частота следования импульсов – 2 Гц; соотношение эмульсол–вода – 1:20; объем жидкости – 5 дм³, а варьируемыми параметрами: типоразмер гидродинамического излучателя (ГДИ-1, ГДИ-2, ГДИ-3) и количество импульсов.

Качество полученной эмульсии определялось по расслоению в течение 4 часов.

В первой серии опытов определялась эффективность работы трех типоразмеров ГДИ при нижнем пределе удельного расхода энергии – 1,75 кДж/дм³. В камеру поочередно устанавливались ГДИ и обработка эмульсии производилась воздействием 7 импульсов. Все пробы показали стабильную эмульсию. Выделения масла на поверхности эмульсии не было.

Во второй серии опытов определен нижний предел удельного расхода энергии для получения стабильной эмульсии. Количество импульсов уменьшалось постепенно для каждого типоразмера ГДИ. При установке в камеру ГДИ-1 и ГДИ-2 расслоение эмульсии наступало при уменьшении количества импульсов до 5, то есть при удельном расходе энергии до 1,25 кДж/дм³, а при установке ГДИ-3 это явление не наступало при воздействии 3 импульсами. Поэтому дальнейшие эксперименты проводились с установленным в камеру ГДИ-3, как с более эффективным.

На третьем этапе исследований проводились эксперименты по определению степени эмульгирования как с различными типоразмерами ГДИ, так и без них в камере с коаксиальной системой электродов. Здесь эмульгированию подвергалась система "масло в воде" с соотношением масло–вода 1:20. Использовалось масло "Индустриальное-20".

Предварительно проведены эксперименты по получению водо–масляных эмульсий в камере объемом 10 дм³, снабженной линейной системой электродов. Получить устойчивые эмульсии с содержанием масла в воде 10% удалось только при эмульгировании с удельным расходом энергии до 150 кДж/дм³. Поэтому было принято решение при эмульгировании добавлять поверхностно-активные вещества. Процесс эмульгирования значительно облегчился и энергозатраты стали сравнимыми с энергозатратами при приготовлении эмульсии на эмульсоле ЭТ-2 и составляли 3,5 – 5 кДж/дм³.

При проведении этой серии экспериментов постоянными являлись следующие параметры: энергия импульса – 1250 Дж; частота следования импульсов – 2 Гц; соотношение масло–вода – 1:20; объем жидкости – 5 дм³; время обработки – 60 с.

Переменным параметром был типоразмер гидродинамического излучателя.

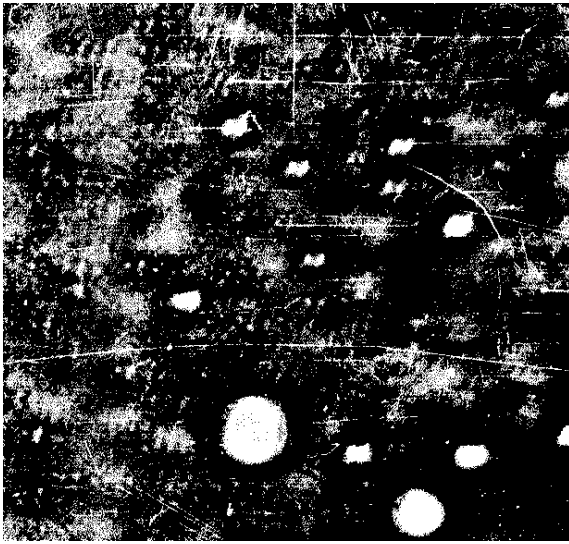
Дисперсность эмульсии контролировалась при помощи микроскопа МБИ-3 с фотографированием при увеличении $\times 500$, стабильность эмульсии контролировалась на расслоение в течение 4 часов.

Расслоение эмульсии уменьшалось при замене ГДИ. Наиболее стабильная эмульсия получалась при обработке с размещением в разрядной камере ГДИ-3. Стабильность эмульсии составляла 5–7 часов.

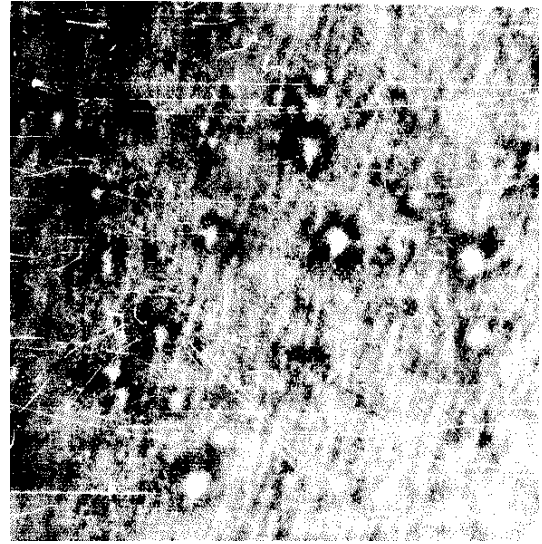
На рисунке, а-г показаны микрофотографии эмульсии типа "масло в воде", содержащей 10% масла, полученные обычным электроразрядным воздействием и с применением ГДИ разных типоразмеров. Хорошо проявляется более равномерная макроструктура эмульсии, полученной с использованием ГДИ-3.

На четвертом этапе исследований ставились эксперименты по определению непрерывных режимов обработки эмульсии при различном удельном расходе рабочей жидкости через электроразрядную камеру. Здесь постоянными следующие параметры: энергия в импульсе – 1250 Дж; частота следования импульсов – 2 Гц; соотношение масло–вода – 1:20; объем рабочей жидкости – 10 дм³; гидродинамический излучатель – ГДИ-3.

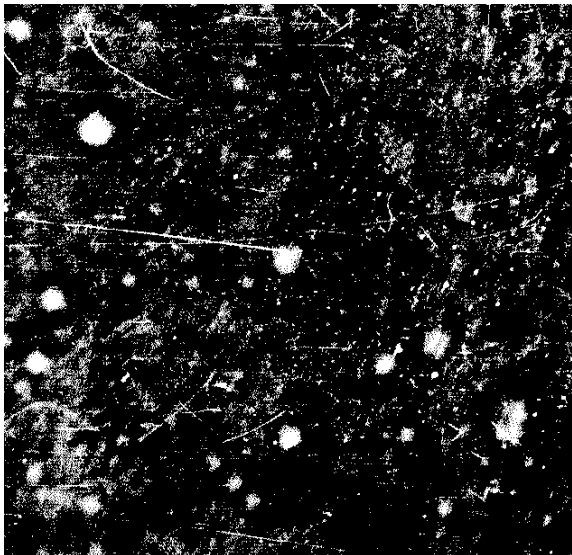
Переменным параметром являлся удельный расход жидкости через электроразрядную камеру – 3; 6; 12 дм³/мин.



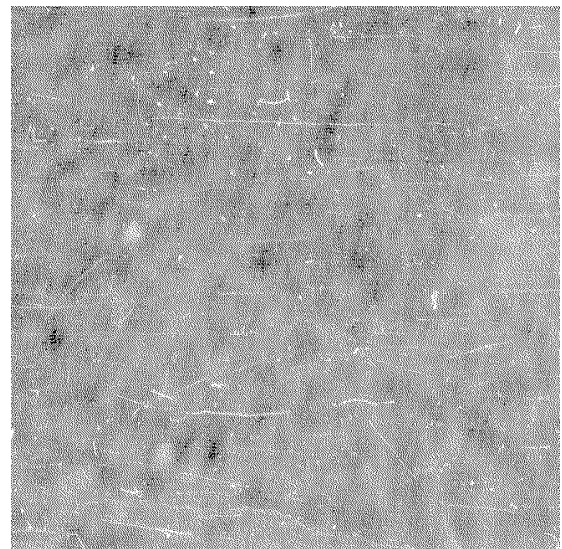
a



б



в



г

Микрофотографии ($\times 500$) эмульсии масло–вода: а – электровзрывная обработка; б – электровзрывная обработка + ГДИ-1; в – электровзрывная обработка + ГДИ-2; г – электровзрывная обработка + ГДИ-3

Эксперименты позволили определить эффективность совместного воздействия электрогидравлического эффекта и ультразвука при непрерывном потоке обрабатываемой жидкости через камеру обработки. При удельном расходе жидкости $12 \text{ дм}^3/\text{мин}$ образовывались стабильные эмульсии, которые по своим параметрам не отличались от эмульсий, полученных в замкнутом объеме без прокачки.

Для установления максимальной производительности процесса удельный расход жидкости увеличивали до $15 \text{ дм}^3/\text{мин}$. При таком расходе стабильность эмульсии начинала снижаться и выделение масла на поверхности обнаруживалось через 2,5 – 3 часа отстоя. Можно сделать вывод, что удельный расход $12 \text{ дм}^3/\text{мин}$ для данной конструкции камеры и заданных параметрах воздействия является оптимальным.

Некоторые данные исследований приведены в табл. 1–3.

При обработке жидкостей без гидродинамического излучателя оптимальным оказался расход $\sim 8,3 \text{ дм}^3/\text{мин}$, что составляет $2/3$ от расхода с использованием совместного электровзрывного и ультразвукового воздействий.

Таблица 1. Получение эмульсий в разрядной камере с линейной электродной системой

Характеристики эмульсий	Стандартный (контрольный)	Энергия в импульсе 1250 Дж		
		Удельный расход энергии, кДж/дм ³		
		3,0	2,5	2,0
Время расслоения, час	4,0	5,0	4,0	3,5
Стабильность	+	+	+	–
Коррозионная агрессивность	–	–	–	+

Таблица 2. Разрядная камера с коаксиальной электродной системой

Характеристики эмульсий	Стандартный (контрольный)	Энергия в импульсе, Дж					
		2500			1250		
		Удельная энергия, кДж/дм ³			Удельная энергия, кДж/дм ³		
		2,5	2,0	1,5	2,0	1,75	1,5
Время расслоения, час	4,0	5,0	4,0	3,5	5,5	4,1	3,6
Стабильность	+	+	+	–	+	+	–
Коррозионная агрессивность	–	–	–	+	–	–	+

Таблица 3. Разрядная камера с коаксиальной электродной системой + ультразвук

Характеристики эмульсий	Стандартный (контрольный)	Энергия в импульсе 1250 Дж					
		ГДИ-1, ГДИ-2			ГДИ-3		
		Удельный расход энергии, кДж/дм ³			Удельный расход энергии, кДж/дм ³		
		1,5	1,25	1,0	1,0	0,75	0,5
Время расслоения, час	4,0	5,8	4,3	3,7	6,2	4,5	3,9
Стабильность	+	+	+	–	+	+	–
Коррозионная агрессивность	–	–	–	+	–	–	+

По данным табл. 1–3 хорошо заметно увеличение эффективности эмульгирования масла в воде при снабжении электродной системы гидродинамическим излучателем.

Самостоятельные и достаточно показательные исследования дополнительного источника звука были проведены на процессах обработки суспензий глинистых минералов. Последние используются в таких многотоннажных отраслях промышленности, как керамическая, металлургическая, при бурении и эксплуатации нефтяных и газовых скважин. В общем случае процесс обработки суспензий можно рассматривать как повышение природной дисперсности минерала и повышение поверхностной связи частиц с дисперсионной средой, в качестве которой в большинстве случаев используется вода.

Вопросы образования и разрушения таких дисперсных систем изучались в Институте коллоидной химии и химии воды АН Украины и показана возможность создания более эффективных, чем при использовании традиционного механического оборудования, методов воздействия на систему. К

таким были отнесены методы наложения магнитного поля, ультразвуковая обработка, электровзрывная обработка и другие.

В результате исследований процессов диспергирования глинистых минералов электровзрывной обработкой создана установка МЭГД-1 для использования в процессах приготовления буровых и тампонажных растворов. Она успешно прошла межведомственные испытания на промыслах Шебелинского газоконденсатного месторождения, однако была отмечена недостаточная производительность и при доработке на выходе из второй ступени обработки был встроен гидродинамический излучатель по типу ГДИ-3.

После этого эффективность процесса диспергирования возросла на 45%. Удалось получить устойчивую стабильную систему с выходом раствора 15 дм³/мин при чисто электровзрывной обработке, и 22 – 23 дм³/мин – при добавлении гидродинамического излучателя и сохранении одинаковых энергетических затрат.

Таким образом, продемонстрирована практическая целесообразность использования предложенного метода совмещения электрического взрыва и "пассивного" гидродинамического излучателя, использующего расходящийся гидросток электровзрыва для получения дополнительного, интенсивного акустического излучения в разрядном реакторе. Такое излучение активизирует пульсации кавитационных резонансных пузырьков, усиливая кавитационную составляющую электровзрывного воздействия на вещество.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Малюшевский П.П.* Электрогидравлический излучатель: Авт. свид. СССР № 484819.
2. *Гаврилов Г.Н., Горовенко Г.Г., Малюшевский П.П., Гаврилов А.Г.* Разрядно-импульсная технология в обработке минеральных сред. Киев, 1983.

Поступила 3.07.02

Summary

The concept, affirmed actual applied researches encompassing by volume is set up that at fulfillment of an electrode system of the electroexplosive installations working in liquids, by the way of underwater acoustic projector, in an acoustic field created by it padding to a usually existing electroexplosive acoustic field in the reactor, there is an intensification of processes of emulsification and dispersion. It demonstrates high performance of electroexplosive hydrodynamic acoustic radiators.

ИЗУЧЕНИЕ АДсорбЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОКСИДА АЛЮМИНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО ПРИ ВЗРЫВЕ АЛЮМИНИЕВЫХ ПРОВОДНИКОВ В ВОДЕ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
проспект Октябрьский, 43А, г. Николаев, 54018, Украина*

Известно, что основным продуктом взаимодействия субмикронных порошков (СМП) алюминия с водой является рентгеноаморфный оксид с удельной поверхностью до $500 \text{ м}^2/\text{г}$ [1].

Получение оксидов с такими свойствами весьма перспективно с точки зрения их использования в качестве высокоактивных сорбентов и носителей катализаторов. Однако в настоящее время имеются достаточно противоречивые данные по кинетике взаимодействия СМП алюминия с водой, что обусловлено существованием зависимости окисления СМП алюминия от способа его приготовления. Так, выдержка СМП алюминия ($d = 0,17 \text{ мкм}$), приготовленных методом испарения-конденсации в воде при 295 К в течение 5 суток не приводила к изменению фазового состава, тогда как гидрозоли суспензии субмикронных порошков алюминия, полученные электроэрозионным методом, полностью окисляются уже при комнатной температуре с достаточно высокой скоростью [1].

Перспективным методом получения СМП алюминия, по мнению авторов [1], является электрический взрыв проводников, позволяющий варьировать дисперсность порошка изменением удельного энергосодержания взрываемого проводника. В этой работе авторы осуществляли взрыв алюминиевой проволоки в водородной среде с последующей пассивацией СМП алюминия и дальнейшим окислением в воде.

В отличие от этих исследований нами изучена возможность получения высокоактивных адсорбентов на основе $\Gamma_{\text{H}^+} - \Gamma_{\text{OH}^-}$ при взрыве алюминиевых проводников непосредственно в воде. При этом отпадает необходимость в поддержании восстановительной атмосферы взрыва, а также не возникает проблем, связанных с пирофорностью полученных СМП алюминия.

Экспериментальная часть

Взрыв алюминиевого проводника ($d = 0,33 \text{ мм}$ и $l = 150 \text{ мм}$) осуществляли в дистиллированной воде в разрядной камере с электродной системой острие–плоскость при следующих параметрах разрядного контура: напряжение – 40 кВ ; емкость конденсаторной батареи – 1 мкФ . Электрод выполнен из алюминиевой трубки, что обеспечивало непрерывную подачу проводника в зону разряда.

Полученный таким образом мелкодисперсный алюминий оставляли в воде до полного завершения химической реакции (прекращение выделения водорода).

Топографию поверхности оксида алюминия исследовали методом растровой электронной спектроскопии на электронно-зондовом микроанализаторе «Superprobe-733» фирмы «Jeol» (Япония).

Адсорбционные характеристики образцов определяли по адсорбционной плотности H^+ и OH^- донорных активных центров по следующей методике. Навеску оксида ($0,500 \text{ г}$) суспендировали в 50 мл $0,02 \text{ н}$ HCl и оттитровывали $0,20 \text{ н}$ KOH при перемешивании магнитной мешалкой со скоростью $100 - 150 \text{ об/мин}$. Поглощение H^+ и OH^- -ионов определяли по разнице, пошедшей на титрование испытуемой суспензии и холостого опыта (без оксида) до заданного значения рН. Величину рН, равной адсорбции водородных и гидроксильных ионов, определяли по пересечению кривых титрования суспензии и холостого опыта. Адсорбционную плотность ($\Gamma_{\text{H}^+} - \Gamma_{\text{OH}^-}$) рассчитывали в мг-эквивалентах на 1 г оксида относительно точки, равной адсорбции H^+ и OH^- -ионов.

Результаты и обсуждение

На рис.1 представлена сканограмма частиц продукта взаимодействия СМП алюминия с водой, полученного электрическим взрывом алюминиевого проводника в воде после полного заверше-

ния реакции окисления. Видно, что образующиеся частицы полидисперсны, их максимальный размер достигает ~ 500 мкм.

На рис.2 представлены те же частицы, но при увеличении $\times 1000$. Образовавшиеся частицы представляют собой агрегаты из более крупных частиц и распределенных на их поверхности частиц малых размеров. Такую же морфологию имеют и частицы оксида алюминия, сформированные при взаимодействии с водой порошков алюминия, полученных электровзрывом алюминиевого проводника в атмосфере водорода. Это позволяет сделать предположение о близком механизме взаимодействия с водой СМП алюминия, полученных при электрическом взрыве в водороде и непосредственно в воде. Также очевидно, что такая морфология обеспечивает высокие значения удельной поверхности, которые, как было установлено, зависят от дисперсности исходного порошка алюминия и температуры реакционной среды и достигают ~ 250 – 500 м²/г.



Рис.1. Сканограмма частиц продукта взаимодействия СМП алюминия с водой после полного завершения реакции ($\times 400$)



Рис.2. Сканограмма частиц продукта взаимодействия СМП алюминия с водой ($\times 1000$)

На рис.3 представлены результаты исследований по определению адсорбционной плотности активных центров на межфазной границе оксида алюминия, полученного традиционным методом Байера [2] и при взаимодействии СМП алюминия с водой.

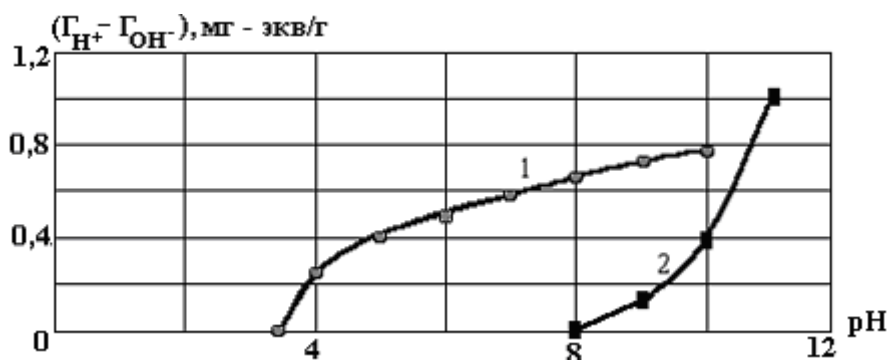


Рис.3. Распределение поверхностных кислородо-водородных групп на межфазной границе оксид-вода: 1 – оксид алюминия, полученный традиционным методом Байера; 2 – оксид алюминия, полученный после полного завершения реакции СМП алюминия с водой

Как видно, распределение поверхностных кислородо-водородных групп на межфазной границе этих оксидов имеет разный характер. Причем для оксида алюминия, полученного при взаимо-

действии СМП алюминия с водой, наблюдается резкий рост величины ($\Gamma_{H^+} - \Gamma_{OH^-}$) в достаточно узком диапазоне рН. Эта особенность представляется интересной с точки зрения повышения реакционной способности адсорбированных на Al_2O_3 реагентов, проявляющих свою активность в интервале рН = 8–10. Такими реагентами, в частности, могут быть иммобилизованные на поверхности оксида алюминия энзимоподобные соединения, образующие каталитически активные комплексы с подложкой.

Таким образом, предложен более экономичный способ получения субмикронных порошков алюминия. Оксид алюминия из таких порошков отличается от Al_2O_3 , полученного по традиционной технологии Байера, по своим адсорбционным характеристикам. Узкий интервал рН изменения адсорбционных свойств изученного Al_2O_3 позволит сделать предположение о его применимости в качестве активного носителя для ферментов и лекарственных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ляшко А.П., Медвединский А.А., Савельев Г.Г. и др. Особенности взаимодействия субмикронных порошков алюминия с жидкой водой: макрокинетика, продукты, проявление саморазогрева // Кинет. и катализ. 1990. Т. 31. Вып. 4. С. 967 – 972.
2. Стайлз Б. Носители и нанесенные катализаторы. Теория и практика. М., 1991.

Поступила 25.12.02

Summary

By the method of scanning electron spectroscopy and on the adsorptive characteristics alumina obtained by dissolution of submicron powder of aluminium in water has been studied. Submicron powder of aluminium were obtained at electrical explosion of an aluminium conductor in water. The abnormal adsorptive properties of the studied alumina in comparison with obtaining by traditional Bayer's technology, allow to suspect efficiency of its usage as the carrier for biocatalysts and drags.

Ю.А. Выжол, А.Н. Щербак, С.А. Щербак*

СТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ВОДЫ ЧЕРЕЗ ПОРИСТУЮ СРЕДУ

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

**Николаевский государственный университет Украины, г. Николаев
ул. Никольская 24, г. Николаев, 54030, Украина*

В настоящей работе основное внимание уделено теоретическому обоснованию существования эффективных режимов теплообмена при фильтрации воды через пористую среду, что предполагает оценку значений основных параметров процесса (расход воды, размер частиц, тепловые потери, параметры источника тепла) для достижения желаемого эффекта. Частично оценки такого рода проводились и ранее. Например, получена зависимость температуры горения порошков металла от значений параметров системы с учетом теплотерь реактора [1], при этом скорость межфазного теплообмена принималась равной бесконечности, что может давать верные результаты только в ограниченной области значений параметров, например, при малом размере частиц или при низкой скорости конвективной тепловой волны. Анализ фильтрационного горения с учетом межфазного теплообмена выполнен в работе [2]. Однако основное внимание при этом уделено теоретическому и экспериментальному исследованию пределов горения, и полученные результаты не позволяют определить зависимость адиабатической температуры от интересующих нас параметров.

Для полного описания распространения теплоты при фильтрации воды через пористую среду необходимо учесть межфазный теплообмен, тепловые потери аппарата, конвективный перенос теплоты, теплопроводность вдоль направления движения воды и выделение теплоты нагревателем. Ниже приведена одномерная двухтемпературная модель, учитывающая перечисленные факторы.

Рассмотрим распространение тепла при фильтрации воды через неподвижный слой твердых частиц, вдоль которого движется плоский, бесконечно тонкий источник тепла. В системе координат, связанной с источником движущегося справа налево по неподвижному бесконечному слою, который находится в точке $x = 0$, система уравнений, описывающая стационарные температурные профили твердой и жидкой фазы, имеет вид:

$$(U_f - U_0)\rho_0 C_0 \frac{dT_V}{dx} = \lambda_V \frac{d^2 T_V}{dx^2} + \frac{\alpha F}{m} (T_V - T_Z) + \frac{\alpha_V F_0}{m} (T_V - T_0); \quad (1)$$

$$U_f \rho_Z C_Z \frac{dT_Z}{dx} = \lambda_Z \frac{d^2 T_Z}{dx^2} + \frac{\alpha F}{1-m} (T_Z - T_V) + \frac{\alpha_Z F_0}{1-m} (T_Z - T_0).$$

Для полной формулировки необходимо задать мощность источника тепла, что позволит вычислить максимальную температуру в слое или задать максимальную температуру и вычислить мощность источника. При этом граничные условия принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} x = +0, \quad T_Z = T_m; \quad x = -0, \quad T_V = T_0; \\ x = +\infty, \quad T_V = T_0; \quad x = -\infty, \quad T_Z = T_0, \end{aligned} \quad (2)$$

где T_V – температура воды; T_Z – температура слоя; T_0 – температура окружающей среды; T_m – максимальная температура в слое; U_f – скорость источника тепла; U_0 – скорость воды в слое; ρ_0 – плотность воды; ρ_Z – плотность твердой фазы; C_0 – теплоемкость воды; C_Z – теплоемкость твердой фазы; λ_V – коэффициент теплопроводности воды; λ_Z – коэффициент теплопроводности твердой фазы; m – пористость (отношение объема пор к полному объему); α – коэффициент теплопередачи между водой и слоем; α_V – коэффициент теплопередачи воды в окружающую среду; α_Z – коэффициент теплопередачи слоя в окружающую среду; F – удельная поверхность теплообмена между водой и слоем; F_0 – удельная поверхность теплопередачи в окружающую среду.

Для упрощения дальнейших выкладок сделаем некоторые допущения, справедливость которых будет показана ниже.

1) Как показано в работе [1], равенство теплоемкостей потоков приводит к неограниченному росту максимальных температур при постоянной мощности источника или, что эквивалентно, к неограниченному снижению мощности источника при постоянной максимальной температуре в слое. Ограничим анализ теплообмена этим соотношением. В принятых обозначениях равенство теплоемкостей потоков имеет вид:

$$(U_0 - U_f)\rho_0 C_0 m = U_f \rho_Z C_Z (1 - m),$$

из которого можно определить требуемую скорость движения источника тепла

$$U_f = U_0 (1 - \gamma); \quad \gamma = \frac{\rho_Z C_Z m}{\rho_0 C_0 m + \rho_Z C_Z (1 - m)}.$$

При этом теплоемкость потока имеет вид

$$J_0 = U_0 \rho_Z C_Z (1 - m)(1 - \gamma) = U_0 \rho_0 C_0 m \gamma = \frac{G_0 C_0 \gamma}{S_0},$$

где G_0 – расход воды в теплообменнике; S_0 – сечение теплообменника.

2) Как будет показано ниже $|T_v - T_z| \ll T_v + T_z$, то есть температуры воды и твердой фазы близки. Поэтому не имеет значения, по какому именно веществу осуществляется кондуктивный теплообмен, если общий поток тепла остается тем же. Заменим значения λ_v и λ_z на λ_v^1 и λ_z^1 согласно следующим соотношениям:

$$\lambda_v m + \lambda_z (1 - m) = \lambda_0; \quad \lambda_v^1 m = \lambda_z^1 (1 - m) = \frac{\lambda_0}{2},$$

где λ_0 – эффективный коэффициент теплопроводности слоя, заполненного водой.

3) Определить коэффициенты теплопередачи α_v и слоя α_z в окружающую среду не представляется возможным, поскольку физический смысл имеет только коэффициент теплопотерь теплообменника α_0 . Кроме того, поскольку температуры воды и твердой фазы близки, то не имеет значение соотношение между параметрами α_v и α_z , что позволяет произвести замену коэффициентов, как и в предыдущем пункте:

$$\alpha_v + \alpha_z = \alpha_0; \quad \alpha_v^1 = \alpha_z^1 = \frac{\alpha_0}{2}.$$

4) Следует отметить, что при фильтрации жидкости или газа удельная поверхность внутреннего теплообмена F значительно превосходит удельную поверхность теплопередачи в окружающую среду F_0 , что обеспечивает выполнение соотношения:

$$\frac{\alpha F}{\alpha_0 F_0} \gg 1, \quad (3)$$

которое будет использовано при дальнейших выкладках.

После проведенных замен коэффициентов система уравнений (1) приобретает следующий вид:

$$-J_0 \frac{dT_v}{dx} = \frac{\lambda_0}{2} \frac{d^2 T_v}{dx^2} + \alpha \cdot F (T_v - T_z) + \frac{\alpha_0 F_0}{2} (T_v - T_0); \quad (4)$$

$$J_0 \frac{dT_z}{dx} = \frac{\lambda_0}{2} \frac{d^2 T_z}{dx^2} + \alpha \cdot F (T_z - T_v) + \frac{\alpha_0 F_0}{2} (T_z - T_0).$$

Нетрудно видеть, что система уравнений (4) и граничные условия (2) допускают замену $T_v(x) = T_z(-x)$, что указывает на симметричность профиля температуры относительно источника теплоты. Поэтому ограничим рассмотрение областью $x \geq 0$.

В переменных $\theta = T_z - T_v$, $\Sigma = T_z + T_v - 2T_0$ и с учетом соотношения (3) система уравнений (4) приобретает вид

$$2J_0 \frac{d\theta}{dx} = \lambda_0 \frac{d^2 \Sigma}{dx^2} - \alpha_0 F_0 \Sigma; \quad (5)$$

$$2J_0 \frac{d\Sigma}{dx} = \lambda_0 \frac{d^2 \theta}{dx^2} - \alpha_0 F_0 \theta. \quad (6)$$

Дифференцируя уравнение (5) по x и подставляя значения производных $\frac{d\Sigma}{dx}$ и $\frac{d^3 \Sigma}{dx^3}$ из уравнения (6), получаем обыкновенное дифференциальное уравнение относительно θ :

$$\frac{d^4 \theta}{dx^4} - a \frac{d^2 \theta}{dx^2} + b\theta = 0, \quad (7)$$

где $a = \frac{4}{\lambda_0}(J_0^2 + \alpha \cdot F)$; $b = \frac{4\alpha_0 F_0 \alpha \cdot F}{\lambda_0^2}$.

Решение уравнения (7) ищем в виде

$$\theta = \sum_{i=1}^4 C_i e^{\mu_i x}, \quad (8)$$

где C_i – константы интегрирования; μ_i – корни характеристического уравнения $\mu^4 - a\mu^2 + b = 0$, решение которого имеет вид

$$\mu_{1,2,3,4} = \pm \sqrt{\frac{a}{2} \pm \frac{a}{2} \sqrt{1 - 4 \frac{b}{a^2}}}. \quad (9)$$

$$(10)$$

Параметр $\frac{b}{a^2}$ является малым в силу соотношения (3):

$$\frac{4b}{a^2} = \frac{\alpha_0 F_0 \alpha \cdot F}{(J_0^2 + \alpha F)^2} < \frac{\alpha_0 F_0}{\alpha F} \ll 1. \quad (11)$$

Разлагаем уравнение (10) в ряд по малому параметру $\frac{b}{a^2}$ и отбрасывая малые члены, получаем приближенное значение корней характеристического уравнения (9) в виде

$$\mu_1 = -\mu_2 \cong \sqrt{\frac{b}{a}}; \quad \mu_3 = -\mu_4 \cong \sqrt{a}.$$

Между значениями корней характеристического уравнения (9) выполняется соотношение в силу уравнения (11):

$$\frac{\mu_1}{\mu_3} \cong \sqrt{\frac{b}{a^2}} \ll 1.$$

Члены уравнения (8), включающие большие корни μ_3 и μ_4 , вносят свой вклад только в узкой области вблизи источника тепла. Учитывая, что моделирование нагрева бесконечно тонким источником уже вносит ошибку в решение, анализ зависимости этих членов от значений параметров системы уравнений (4) не представляет интереса, и мы ограничим дальнейшее рассмотрение только малыми корнями μ_1 и μ_2 .

Проведенные выкладки позволяют записать простое приближенное аналитическое решение системы уравнений (4), удовлетворяющее граничным условиям (2) в виде:

$$\frac{T_Z - T_0}{T_m - T_0} = e^{-\frac{x}{L}}, \quad \frac{T_Z - T_V}{T_m - T_0} = \varepsilon \cdot e^{-\frac{x}{L}}, \quad (12)$$

где
$$L = \frac{1}{\mu_1} = \sqrt{\frac{\lambda_0}{\alpha_0 F_0} \left(1 + \frac{J_0^2}{\lambda_0 \alpha F} \right)}, \quad \varepsilon = \frac{J_0}{\alpha F L}. \quad (13)$$

Воспользуемся адиабатической температурой как меры удельных энергозатрат процесса термической обработки воды, которая равна затраченной энергии, деленной на теплоемкость и расход воды. При этом мощность источника тепла

$$W = T_a G_0 C_0 \quad (14)$$

расходуется в бесконечном теплообменнике только на внешние теплотери, которые можно записать в виде:

$$W = \alpha_0 F_0 S_0 \int_{-\infty}^{\infty} (T_V - T_0) dx = 2\alpha_0 F_0 S_0 (T_m - T_0) L. \quad (15)$$

Выражения для мощности источника (14), (15) позволяют определить отношение адиабатической температуры к максимальному перепаду температур

$$\frac{T_a}{T_m - T_0} = 2\gamma \sqrt{\frac{\alpha_0 F_0}{\alpha F} \left(1 + \frac{\lambda_0 \alpha F}{J_0^2} \right)}. \quad (16)$$

Проанализируем полученные зависимости в предельных случаях.

1) $J_0 \ll \sqrt{\lambda_0 \alpha F}$,

$$L = \sqrt{\frac{\lambda_0}{\alpha_0 F_0}}, \quad (17)$$

$$\frac{T_a}{T_m - T_0} = \frac{2\gamma \sqrt{\lambda_0 \alpha_0 F_0}}{J_0},$$

$$\varepsilon = \frac{J_0}{\sqrt{\lambda_0 \alpha F}} \sqrt{\frac{\alpha_0 F_0}{\alpha F}} \ll 1. \quad (18)$$

При малых расходах воды зоны прогрева L не зависят от теплообмена между фазами и определяются теплопроводностью аппарата и его тепловыми потерями, то есть конвективные потоки не оказывают влияния на профиль температуры в теплообменнике. Адиабатическая температура T_a обратно пропорциональна расходу воды, поскольку теплотерии от него не зависят (15), (17).

2) $J_0 \gg \sqrt{\lambda_0 \alpha F}$,

$$L = \frac{J_0}{\sqrt{\alpha_0 F_0 \alpha F}}, \quad (19)$$

$$\frac{T_a}{T_m - T_0} = 2\gamma \sqrt{\frac{\alpha_0 F_0}{\alpha F}}, \quad (20)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\alpha_0 F_0}{\alpha F}} \ll 1. \quad (21)$$

При большом расходе воды ширина зоны прогрева L пропорциональна J_0 (19), а адиабатическая температура T_a (20) от расхода воды не зависит, так как с его ростом пропорционально увеличиваются и теплотерии (15), (19). В этих условиях адиабатическая температура T_a минимальна и зависит от соотношения значений параметров внешнего и внутреннего теплообмена. Перепад температур между водой и твердой фазой $T_Z - T_V$ при $x = 0$ равен адиабатической температуре, деленной на 2γ (12), (21).

Во всем диапазоне изменения расхода воды в аппарате перепад температур между водой и твердой фазой значительно меньше температуры воды (12), (18), (21).

Выше мы привели расчеты для теплообменника бесконечной длины, в котором все выделившееся тепло расходуется на тепловые потери через стенку аппарата. В реальной установке длиной L_0 режим, близкий к распространению тепловой волны в бесконечном слое пористого материала, можно осуществить за счет изменения направления движения воды, как это делалось в работе [3]. Когда максимум температуры тепловой волны находится на расстоянии L_T от торца аппарата, направление движения воды меняют. При каждом переключении из аппарата вместе с водой выносятся теплота

$$Q = \rho_0 C_0 S_0 m \int_{L_T}^{\infty} (T_V - T_0) dx.$$

Разделив это тепло на время цикла $\frac{U_f}{L_0 - 2L_T}$, получаем с учетом (14) выражение для конвективных потерь:

$$\frac{T_k}{T_m - T_0} = \frac{L(1 - \gamma)}{L_0 - 2L_T} e^{-\frac{L_T}{L}}. \quad (22)$$

Оценим величину адиабатической температуры и ширины зоны прогрева при реальных значениях параметров экспериментальной установки.

Удельная поверхность (отношение поверхности теплообменника к его объему) теплопередачи аппарата диаметром $D_0 = 0,14$ м в окружающую среду

$$F_0 = \frac{4}{D_0} = 28 \text{ м}^{-1}.$$

Оценки коэффициента теплопередачи аппарата α_0 проводились по формулам, приведенным в [4] для теплообмена вертикальной стенки за счет свободной конвекции. Расчеты показывают, что при ширине зоны прогрева $L = 0,053$ м коэффициент теплопередачи аппарата в окружающий его воздух α_0 составляет 9,1 Вт/м²К.

В стационарном слое твердых частиц, когда их максимальные и минимальные размеры отличаются не более чем вдвое, пористость m согласно [5] составляет $0,5 \pm 0,01$.

При этом удельная поверхность теплообмена между водой и слоем при $d = 1$ мм достигает [6]

$$F = \frac{6(1 - m)}{d} = 3000 \text{ м}^{-1}.$$

Коэффициент теплопередачи между водой и слоем частиц вычислим по формулам, приведенным в [6]:

$$\text{при } Re < 30 \quad Nu = 0,395Re^{0,64}Pr^{1/3};$$

$$\text{при } Re > 30 \quad Nu = 0,725Re^{0,47}Pr^{1/3};$$

$$Nu \geq 2,$$

где $Nu = \frac{\alpha d_\varepsilon}{\lambda_v}$; $Re = \frac{U_0 d_\varepsilon}{\nu}$; $d_\varepsilon = \frac{2md}{3(1 - m)}$ – эквивалентный диаметр пор; Pr – критерий Прандтля

для воды; ν – коэффициент кинематической вязкости воды.

При расходе воды в аппарате $G_0 = 100$ кг/ч значения основных параметров следующие: $Re = 2,41$, $Nu = 2$, $\alpha = 1797$ Вт/м²К, что указывает на ламинарность режима течения воды в слое. При этом значение параметра $\alpha F / \alpha_0 F_0 = 2,07 \cdot 10^4$, что вполне соответствует соотношению (3).

Значения параметров γ и λ_0 от теплового режима не зависят и определяются только теплофизическими параметрами жидкой и твердой фаз (1). Для воды и гравия эти параметры имеют следующие значения: $\rho_0 = 1000$ кг/м³, $C_0 = 4183$ Дж/кгК, $\lambda_v = 0,55$ Вт/мК, $\rho_Z = 1840$ кг/м³, $C_Z = 880$ Дж/кг, $\lambda_Z = 0,36$ Вт/мК. При этом эффективный коэффициент теплопроводности слоя, заполненного водой, λ_0 достигает значения 0,455 Вт/мК, а $\gamma = 0,279$. Минимально возможная адиабатическая температура для выбранных значений параметров в соответствии с выражением (20) достигает 0,29 К.

Минимальное значение ширины зоны прогрева (13) наблюдается при малых расходах (17) и составляет 0,042 м, а при расходе воды в 100 кг/ч – 0,075 м. Расстояние максимального подхода тепловой волны к торцу теплообменника L_T и его длины L_0 должны выбираться с учетом ширины зоны прогрева L . При $L_0 = 1,5$ м и $L_T = 0,25$ м конвективные тепловые потери составляют $T_k = 0,15$ К и растут по мере увеличения расхода воды (22).

Таким образом, полные тепловые потери аппарата при расходе воды в 100 кг/ч составляют 0,25 К (16), (21), (22), для их компенсации требуется источник тепла мощностью $W = 60$ Вт (14).

Расчет адиабатической температуры процесса при различных размерах частиц и расходах, приведенный на рис.1, показывает следующее:

- при постоянном размере частиц адиабатическая температура имеет минимум при некотором оптимальном значении расхода воды;
- рост адиабатической температуры процесса при низких расходах связан с теплотерями;
- рост адиабатической температуры процесса при больших расходах связан с выносом теплоты из-за конечных размеров аппарата;
- оптимальный расход воды растет с уменьшением размера частиц и достигает 300 кг/ч при размере частиц, равном 0,1 мм;
- минимальная адиабатическая температура снижается с уменьшением размера частиц и при $d = 0,1$ мм достигает 0,17 К.

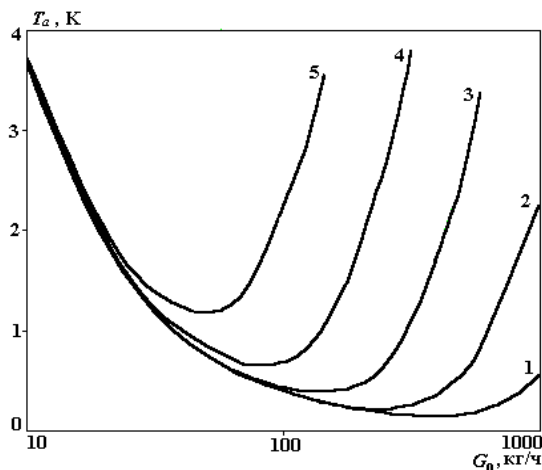


Рис.1. Зависимость адиабатической температуры от расхода воды при различных размерах частиц, мм: 1 – 0,1; 2 – 0,2; 3 – 0,5; 4 – 1; 5 – 2

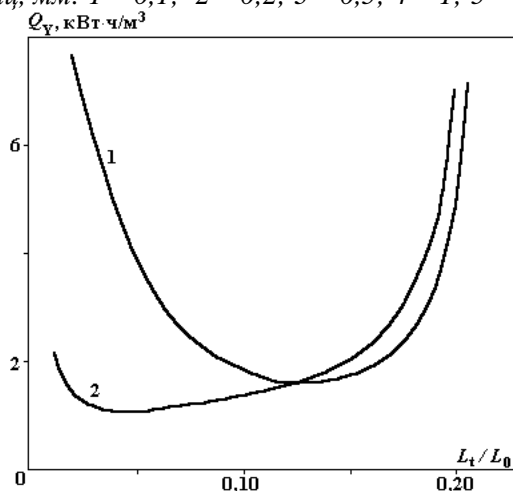


Рис.2. Зависимость удельных энергозатрат от расстояния между торцом и точкой поворота конвективной тепловой волны.
 L_0 , м: 1 – 1,5; 2 – 5

При расчете удельных энергозатрат необходимо учесть, что в выбранной схеме термической обработке подвергается не вся вода, а ее часть, которая прошла через зону максимальных температур. Кроме того, часть обработанной воды, находящейся между точкой поворота и торцом аппарата, остается в теплообменнике и обрабатывается повторно. Приведенные соображения позволяют записать выражения для удельных энергозатрат:

$$Q_Y = T_a C_0 \frac{\left(1 - 2 \frac{L_t}{L}\right)}{\left(\gamma - (1 + \gamma) \frac{L_t}{L}\right)},$$

где L_t – расстояние между торцом и точкой поворота конвективной тепловой волны, откуда видно, что при $\frac{L_t}{L_0} = \frac{\gamma}{1+\gamma} = 0,22$ удельные энергозатраты обращаются в бесконечность, так как вся обработанная вода остается в аппарате. На рис. 2 приведены зависимости удельных энергозатрат от расстояния между торцом и точкой поворота конвективной тепловой волны при различной длине теплообменника, которые имеют минимум. При малом L_t удельные энергозатраты растут из-за увеличения выноса теплоты из аппарата, при большом – за счет снижения производительности. При длине теплообменника 1,5 м минимальное значение Q_{γ} достигает 1,6 кВт ч/м³, а производительность – 50 кг/ч. С увеличением длины аппарата до 5 м они составляют 1,1 кВт ч/м³ и 75 кг/ч соответственно. Оптимальное расстояние между точкой поворота и торцом от длины аппарата не зависит и составляет 0,18 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алдушин А.П., Мержанов А.Г. Теория фильтрационного горения: общие представления и состояние исследований // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. Новосибирск, 1983. С. 9 – 52.
2. Потытняков С.И., Лаевский Ю.М., Бабкин В.С. Влияние тепловых потерь на распространение стационарных волн при фильтрационном горении газов // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20. № 1. С. 19 – 26.
3. Боресков Г.К., Бунимович Г.А., Матрос Ю.Ш., Иванов А.А. Осуществление каталитических процессов в нестационарных условиях. II Переключение направления подачи реакционной смеси в слой катализатора. Экспериментальные результаты. // Кинетика и катализ. 1982. Т. 23. № 2. С. 402 – 406.
4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М., 1981.
5. Потытняков С.И., Лаевский Ю.М., Бабкин В.С. Исследование тепловой структуры волны фильтрационного горения // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21. № 2. С. 19 – 25.
6. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Л., 1979.

Поступила 27.12.02

Summary

Mathematical simulation of heat exchange at filtration of water through the porous environment has been carried out in the work. The analytical solution of convective thermal wave propagation in the porous medium under the water motion has been obtained. The calculations have shown the possibility for water thermal treatment with specific energy consumption of 1,66 kW·h/m³, that is equivalent to water heating on 1,4 K.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

М.И. Бажал^{1,2}, М.О. Нгади¹, Ж.С.В. Рагаван¹

СИНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ДАВЛЕНИЯ И ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРЕССОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ

¹*Department of Agricultural and Biosystems Engineering, McGill University, Macdonald Campus,
21111 Lakeshore Road, Ste-Anne-de-Bellevue, Quebec, Canada H9X 3V9*

²*Национальный университет пищевых технологий,
ул. Владимирская, 68, г. Киев, 01033, Украина*

Введение

Практический интерес к импульсной электрообработке биологических объектов связан прежде всего с нетермическим увеличением проницаемости клеток в электрическом поле [1, 2]. Диэлектрический пробой [3] или так называемый электроплазмолиз [4 – 6] биологических клеток происходит в результате образования и роста пор в клеточных мембранах, поляризуемых электрическим полем [7, 8]. В пищевых технологиях импульсная электрообработка используется для нетермической пастеризации жидких продуктов [2, 9] и интенсификации массообменных процессов в растительных тканях [10, 11]. В производствах, связанных с переработкой растительного сырья, электроплазмолиз предлагается использовать как дополнительный метод для повышения эффективности таких процессов, как прессование [12], разделительное центрифугирование [13, 14], экстрагирование [15, 16], осмотическое обезвоживание [17], сушка [18, 19]. Как известно, эффективность данных процессов определяется структурными свойствами сырья. Поэтому изменение этих свойств в результате электроплазмолиза растительной ткани является важным фактором оптимизации условий как самой электрообработки, так и комбинирования ее с другими методами переработки сырья [11, 20].

Необходимо отметить, что природа электроплазмолиза и локализация пор изучены еще недостаточно. Общепринятым механизмом электроразрушения суспендированных клеток, таких как, например, микроорганизмы и эритроциты, является образование пор в липидном матриксе клеточных мембран [21]. Электроплазмолиз клеток биологических тканей (растительных и животных) также может быть объяснен электропорацией клеточных мембран [11] и нарушением целостности клеточных стенок [22]. При этом наблюдается собственно плазмолиз клеток, сопровождающийся вытеканием из них сока и уменьшением объема вакуоли [23, 24]. Однако сам механизм влияния электрического поля на клеточные стенки мало изучен и остается во многом неясным.

Многочисленные исследования показывают, что растительная ткань размягчается в результате плазмолиза различными методами, самым известным из которых является тепловая обработка (ошпаривание) [22, 25]. Исследуя электро- и термоплазмолиз сахарной свеклы, А.Б. Матвиенко [26] установил, что модуль сжимаемости ткани уменьшался с 12,5 МПа для необработанных образцов до 6,5 МПа – после электрообработки и до 3 МПа – после термоплазмолиза перегретым паром. Аналогичные результаты получены для яблок [27] и моркови [17], когда наблюдалось уменьшение модуля сжимаемости образцов в 1,5 и более раз после их обработки импульсным электрическим полем. Однако зависимость механических свойств тканей от степени электроплазмолиза практически не изучена.

Необходимо отметить, что в общем случае деформация растительной ткани является частично необратимой, причем степень этой необратимости усиливается с увеличением деформации образца [28]. Однако на начальной стадии прессования при небольшой степени деформации растительные ткани проявляют преимущественно эластичные свойства, когда наблюдается линейная зависимость между нагрузкой и деформацией. В большинстве практических случаев используют закон Гука для упрощенного описания эластичных свойств растительных материалов [29]:

$$P = G\delta, \quad (1)$$

где P – давление, приложенное к образцу, G – модуль сжимаемости (Юнга), δ – относительная деформация образца.

Различные компьютерные модели и микроскопические исследования позволили значительно продвинуться в изучении механизма развития плазмолиза клеток в биологических тканях. Установлено, что электроплазмолиз тканей характеризуется начальным, инициирующим пробоем отдельных одиночных клеток с последующим их объединением и ростом кластеров плазмоллизированных клеток [10]. Известно, что упругость плазмоллизированных клеток снижается в результате уменьшения тургорного давления. Таким образом, возникает задача исследования механических свойств системы, содержащей элементы с характеристиками упругости, различными для целых и плазмоллизированных клеток. Практическая важность такой задачи определяется необходимостью изучения влияния электрообработки на процессы прессования растительного сырья.

Целью настоящей работы является изучение влияния электроплазмолиза на структурные изменения растительной ткани и установление взаимосвязи между степенью плазмолиза и механическими свойствами ткани.

Приготовление образцов

Использовались яблоки сортов Кортланд (Cortland) и Макинтош (McIntosh). Образцы цилиндрической формы диаметром $57 \pm 0,5$ мм и толщиной $15 \pm 0,5$ мм вырезались из срединной части яблок. Начальная влажность ткани, определенная методом высушивания, составляла 81 – 84%.

Экспериментальная установка

Лабораторная пресс-ячейка включала цилиндр из изолирующего материала, а также металлические поршень и диск из нержавеющей стали, выполняющие роль параллельных дисковых электродов. Рабочая плоская поверхность поршня и диск имели перфорацию для дренажа сока из прессуемого материала. Образец размещался между электродами.

Электроплазмолиз проводился прямоугольными монополярными импульсами длиной 300 мкс с частотой 1 Гц при напряженности электрического поля 1000 В/см. Максимальное количество приложенных импульсов достигало 60. Параметры электрообработки выбраны таким образом, чтобы не допустить нагрев образца более чем на 3°C. Кроме того, эти условия препятствовали возникновению так называемого «джамминг» эффекта, при котором наблюдаются периоды замедления и ускорения кинетических зависимостей степени электроплазмолиза при недостаточно высокой электрической напряженности (< 800 В/см) плазмолизирующего поля [30]. Температура образцов в течение электрообработки контролировалась с помощью термометрической системы на основе термодары (Hotmex, DCC Corp., Pennsauken, NJ, USA).

В работе использован генератор электрических импульсов Velonex–350–12 (Pulse Engineering, Inc., CA, USA). Импульсное напряжение и ток измерялись с помощью высоковольтного щупа (модель P6015A, Tektronix Inc., OR, USA) и импульсного трансформатора тока (модель 411, Pearson Electronics, Inc., CA, USA), подсоединенных к цифровому запоминающему осциллографу Tektronix TDS 3012 (Tektronix Inc., OR, USA). Образцы яблок обрабатывались через 180–240 с после их получения, когда завершался переходный процесс увеличения проводимости ткани, связанный с миграцией влаги из поврежденных клеток поверхности образцов [31].

Электрофизические свойства образцов измерялись низковольтным (около 14 В) переменным током силой до 800 мА при частоте 60 Гц, позволяющей избегать нежелательных поляризационных эффектов [32]. Электропроводность ткани определялась по соотношению тока и падению напряжения на образце, измеренных с помощью мультиметра Fluke–187 (Fluke Corp., USA). Измерения проводились через 10 с после окончания электрообработки. Индекс дезинтеграции ткани z вычислялся как [33]

$$z = \frac{\sigma - \sigma_i}{\sigma_d - \sigma_i}, \quad (2)$$

где σ и σ_i – текущая и начальная электропроводности образца соответственно, σ_d – максимальная электропроводность полностью плазмоллизированного образца 60 импульсами длиной 300 мкс при напряженности электрического поля 1000 В/см.

После проведения электрообработки образцы подвергались тесту на сжатие. Механические свойства образцов исследовались с помощью установки Instron (модель 1011, Instron Corp., Canton, MA, USA) с максимальным усилием на плунжере до 20 кН. Каждый образец ткани, находясь после

электрообработки в той же цилиндрической пресс-ячейке, сжимался с постоянной скоростью 10 мм в минуту.

Определение пористости

Пористость, распределение пор по размерам, объемная и скелетная плотности яблочной ткани определялись с помощью ртутного порометра Autopore III 9400 (Micromeritics Instrument Corporation, GA, USA). Цилиндрические образцы яблок (контрольные и обработанные электрическим полем) разрезали на кубические кусочки со стороной от 3 до 5 мм, которые в течение 2 суток сушились в лабораторном сушильном шкафу (модель 750 F, Fisher Scientific, USA) при температуре 45°C, чтобы не допустить термоплазмолиза ткани, наступающего при температуре 50 – 55°C [15, 18, 34]. Для проведения измерений высушенные образцы яблочной ткани помещались в рабочую часть порометра объемом 5 см³. Используемая модель порометра позволяла определять наличие в среде пор размером от 0,015 до 72 мкм.

Пористость ткани ε определялась как отношение общего объема пор V_p к объему образца V :

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V}. \quad (3)$$

Распределение пор в ткани определялось парциальной пористостью ε_d , то есть долей объема пор $V_p(d)$ определенного диаметра d в общем объеме образца V :

$$\varepsilon_d = \frac{V_p(d)}{V}. \quad (4)$$

Тогда

$$V_p = \sum_{d=d_{\min}}^{d_{\max}} V_p(d). \quad (5)$$

Следовательно, согласно уравнениям (3) – (5), общая пористость ткани может быть также выражена в виде

$$\varepsilon = \sum_{d=d_{\min}}^{d_{\max}} \varepsilon_d. \quad (6)$$

Усушка S_v , то есть изменение объема образцов после их сушки определялась как

$$S_v = \frac{V}{V_i}, \quad (7)$$

где V_i и V – объем образца до и после сушки соответственно. Объем образцов определялся методом Архимеда с использованием пикнометра (точность $\pm 0,05$ мл). Рабочей средой служила вода, продолжительность пребывания образцов ткани в пикнометре не превышала 30 с.

Статистический анализ

Все данные получены путем усреднения по трем результатам, полученным в идентичных условиях. Статистическая обработка данных произведена с использованием системы Sigma Plot (SigmaPlot 2000, Ver. 6, SPSS Inc., Chicago, IL).

Результаты и обсуждение

Распределение пор в яблочной ткани

В таблице представлены показатели некоторых физических свойств высушенных яблочных образцов как контрольных, так и предварительно плазмолизированных импульсным электрическим полем.

Как видно из таблицы, электроплазмолиз значимо (с доверительным интервалом 5%) влияет на насыпную и скелетную плотность, размер пор и степень усушки яблочной ткани. При этом сокращение объема образцов в ходе их сушки на 22 – 30% меньше для ткани, подвергшейся электрообработке. Такой результат можно объяснить, по-видимому, тем, что по сравнению с контрольными образцами натяжение клеточных стенок плазмолизированной ткани в процессе ее сушки ослабляется в результате образования пор и фрагментации волокон клетчатки под воздействием электрического поля.

Объемная и скелетная плотности контрольных образцов составили соответственно 0,46 и 1,39 кг/м³, а также 0,51 и 1,42 кг/м³ – для сорта Кортланд и Макинтош. Для образцов, подвергнутых электрообработке, получены значения 0,38 и 1,52 кг/м³ для сорта Кортланд, а для сорта Макинтош – 0,45 и 1,47 кг/м³. Авторы [35] измеряли объемную и скелетную плотности яблочной ткани, высушен-

ной при 70°C, и получили при этом 0,51 и 1,60 кг/м³ соответственно. В работе [36] измеряли объемную плотность образцов различных растительных тканей, полностью обезвоженных с использованием различных методов, в диапазоне 0,12 – 0,73 кг/м³. При этом скелетная плотность яблок находилась в пределах 1,40 – 1,65 кг/м³ [36]. Некоторый разброс в измеренных величинах плотностей может быть отнесен к различиям в методах сушки и условиях измерений. Таким образом, значения плотности образцов, измеренные в настоящей работе, находятся в интервале, приводимом в литературе. Уменьшение объемной плотности ткани после ее электрообработки объясняется увеличением в результате этой обработки пористости ткани. Труднее объяснить увеличение действительной плотности ткани, подвергнутой электроплазмолизу. По всей видимости, это может быть связано с тем, что в контрольных образцах имелись поры диаметром менее 0,15 мкм, которые не заполнялись ртутью и таким образом их объем в расчетах считался заполненным материалом клетчатки. Под действием электрического поля какая-то часть этих пор расширилась до таких размеров, что их заполнение ртутью стало возможным. При этом объем скелетной части ткани уменьшился на величину объема этих увеличившихся пор, а масса практически не изменилась, в результате чего расчетная величина скелетной плотности должна была возрасти, что и наблюдалось экспериментально.

Распределение пор в яблочной ткани сорта Кортланд представлено на рис. 1. Экспериментальные данные объема пор в соответствие с их средним диаметром показаны на рис. 1,а. Рассчитанные по этим данным значения парциальной пористости яблочной ткани (4) представлены на рис. 1,б. В последнем случае, по сравнению с рис. 1,а, наблюдается некоторое сближение зависимостей для плазмолизированной и контрольной ткани, что объясняется меньшей усушкой, а следовательно, большим объемом плазмолизованных образцов. Аналогичные зависимости получены и для яблок Макинтош.

Анализируя графики на рис.1, можно заметить, что для плазмолизированной ткани по сравнению с контрольными образцами более высокие значения объема пор (рис. 1,а) и пористости (рис. 1,б) устойчиво наблюдаются в диапазоне среднего диаметра пор между ~ 0,1 и 5 мкм. Такой результат можно объяснить образованием новых пор при электрообработке, что привело к уменьшению среднего размера пор с 7,81 до 5,86 мкм для сорта Кортланд и с 6,64 до 5,32 для сорта Макинтош (см. таблицу).

Объемная (ρ_b) и скелетная (ρ_s) плотность, пористость (ε), средний диаметр пор ($\langle d \rangle$) и усушка (s_v) образцов яблок, высушенных при 45°C. Электроплазмолиз проводился 60 импульсами длиной 300 мкс с частотой 1 Гц при электрической напряженности 1000 В/см

Образец	ρ_b , кг/м ³	ρ_s , кг/м ³	ε	$\langle d \rangle$, мкм	s_v
Контроль					
Кортланд	0,46 ± 0,05	1,39 ± 0,06	0,67 ± 0,02	7,81 ± 0,29	0,20 ± 0,02
Макинтош	0,51 ± 0,04	1,42 ± 0,05	0,63 ± 0,015	6,64 ± 0,24	0,18 ± 0,02
Плазмолиз					
Кортланд	0,38 ± 0,03	1,52 ± 0,05	0,75 ± 0,03	5,86 ± 0,16	0,26 ± 0,01
Макинтош	0,45 ± 0,03	1,47 ± 0,03	0,69 ± 0,02	5,32 ± 0,14	0,22 ± 0,01

Средняя толщина клеточных стенок растительной ткани колеблется в пределах 0,1 – 10 мкм [37, 38]. Биологическая мембрана (плазмалемма), покрывающая стенки клеток, имеет толщину 7 – 10 мкм [39, 40]. Следовательно, при сопоставлении этих величин с полученными экспериментальными данными ясно, что электроплазмолиз приводит к образованию новых пор с размером, сопоставимым по порядку величины с толщиной клеточных стенок и таким образом можно сделать вывод, что поры в результате электрообработки образуются не только в мембранах, но и в клеточных стенках.

Тест на сжатие

Рис. 2 представляет характерные зависимости между давлением сжатия и относительной деформацией для контрольного и плазмолизованных образцов.

Характерное эластичное сжатие образцов наблюдалось при степенях сжатия не более 0,15. При дальнейшем сжатии отмечен перегиб кривых, соответствующий достижению равновесия между внешним сжимающим усилием и внутренним тургорным давлением клеток. Как видно из данных рис.2, электрообработка влияет на положение этих точек перегиба. Увеличение количества импульсов уменьшает величину равновесного давления, что свидетельствует об уменьшении тургорного давления в клетках. Дальнейшее повышение внешнего давления приводит к разрушению клеточных стенок и раздавливанию образца [38, 41, 42]. Внешнее давление уменьшается, как показано на рис.2. Максимально достигаемое давление сжатия соответствует давлению раздавливания.

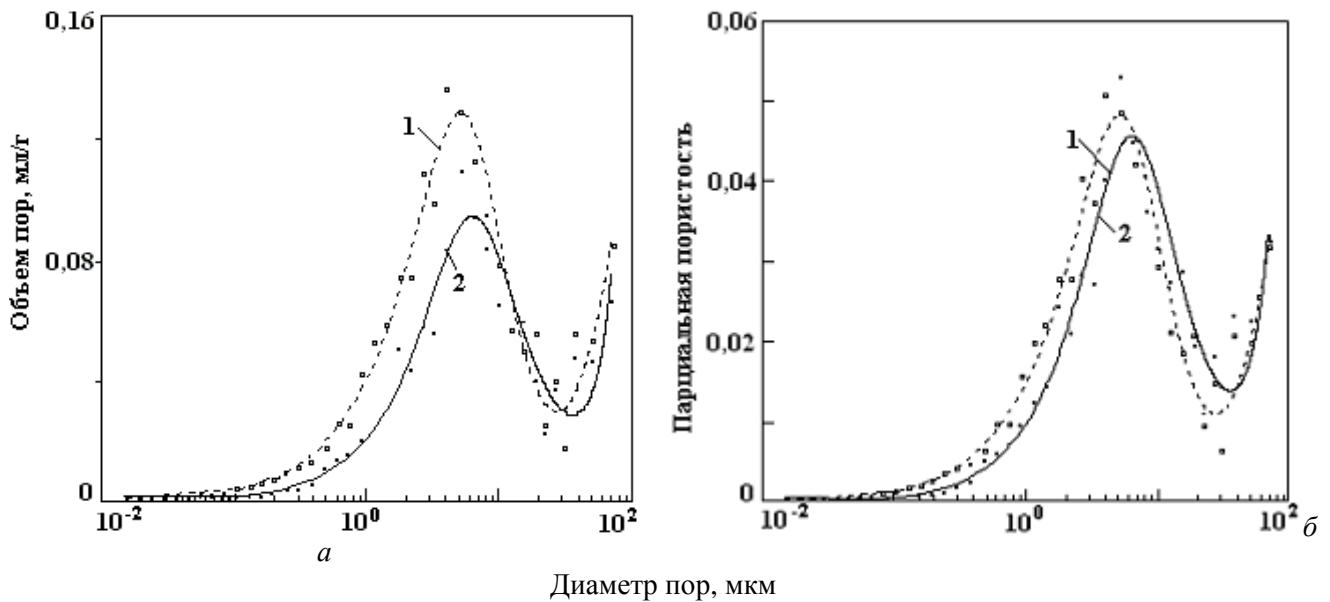


Рис. 1. Зависимость удельного объема пор (а) и парциальной пористости (б) от диаметра пор. Образцы обрабатывались 60 импульсами длиной 300 мкс с частотой 1 Гц при напряженности 1000 В/см. Индекс дезинтеграции $z = 0,9 - 1$. Точками представлены экспериментальные данные, усредненные по трем измерениям. Кривые на графике являются результатом сглаживания данных методом наименьших квадратов. 1 – плазмолиз; 2 – контроль

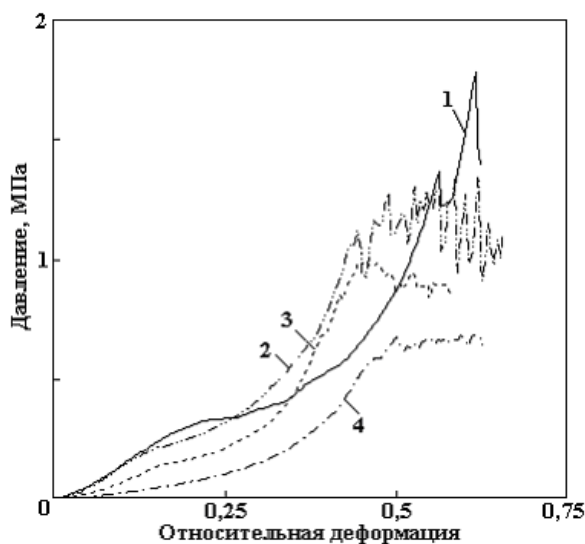


Рис. 2. Характерные кривые сжатия образцов ткани яблок (сорт Кортланд), обработанных электрическими импульсами n (1–0; 2–1; 3–2; 4 – 60) длиной 300 мкс с частотой 1 Гц при электрической напряженности 1000 В/см; кривая $n = 0$ соответствует контрольному образцу

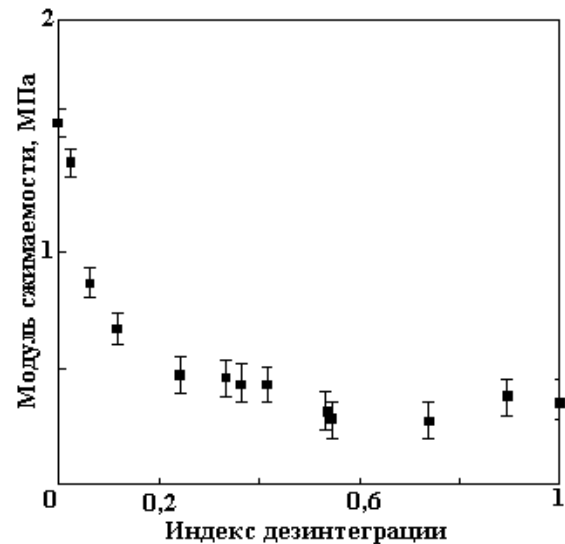


Рис. 3. Зависимость модуля сжимаемости от величины индекса дезинтеграции ткани яблок, обработанной различным количеством импульсов (до 60), длиной 300 мкс с частотой 1 Гц при напряженности 1000 В/см.

Величина модуля сжимаемости определялась по углу наклона кривых сжатия для малых степеней деформации, когда наблюдается эластичный характер сжатия. На рис. 3 представлена зависимость модуля сжимаемости образцов от индекса дезинтеграции ткани, рассчитанного по уравнению (2). Представленная зависимость обнаруживает резкое уменьшение модуля сжимаемости даже при небольшом увеличении индекса дезинтеграции до $z \approx 0,25$.

В работе [47] проведены исследования сжатия клеточных систем с помощью сеточной модели растительной ткани. Результаты позволили объяснить наблюдаемое экспериментально резкое увеличение сжимаемости растительной ткани после ее обработки электрическим полем. Это связано с тем, что плазмолиз клеток нарушает равновесное состояние тургорных давлений соседних целых клеток и необходимое для их сжатия внешнее давление значительно снижается. Таким образом, модуль сжимаемости этих клеток и всей системы в целом снижается.

С другой стороны, прессование во время электрообработки повышает эффективность электроплазмолиза, как показано в [32, 33]. В этом и проявляется синергетическое взаимодействие электроплазмолиза и давления. Расчеты по разработанной модели позволили оценить снижение модуля сжимаемости плазмолизованных и окружающих их клеток на 70 – 80% [47]. Этот результат доказывает, что эффективность процесса прессования растительной ткани в значительной степени определяется равновесием давления на клеточные стенки между соседними клетками. Даже относительно невысокая степень электроплазмолиза ткани (на уровне 25 – 30%) нарушает это равновесие, тем самым значительно снижая давление прессования и интенсифицируя процесс извлечения сока.

Для оценки влияния электрообработки на механические свойства самих клеточных стенок получена зависимость относительного давления раздавливания ткани $P^* = P/P_{\max}$ от индекса дезинтеграции z (рис. 4).

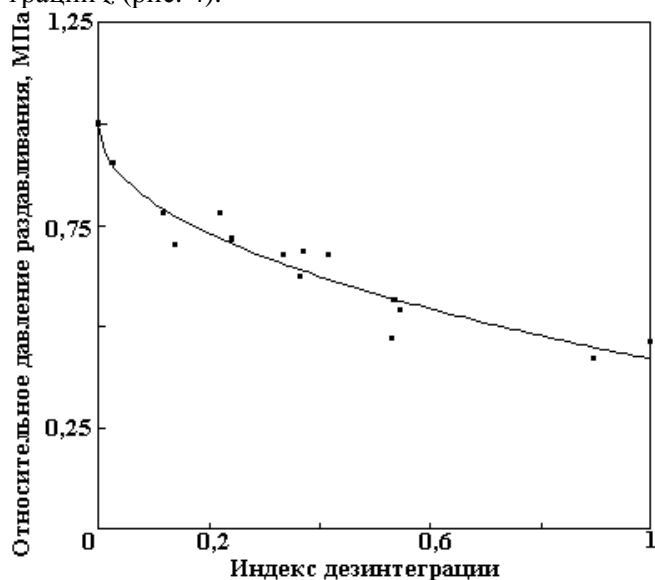


Рис. 4. Зависимость между относительным давлением раздавливания и индексом дезинтеграции для образцов ткани яблок (сорт Кортланд), обработанной импульсами (до 60) длиной 300 мкс с частотой 1 Гц при напряженности 1000 В/см.

Представленные на рис. 4 экспериментальные данные сглажены уравнением вида

$$P^* = 1 - kz^b, \quad (8)$$

где k – коэффициент сглаживания, b – показатель степени. Параметры уравнения (7) определены с помощью метода наименьших квадратов (коэффициент корреляции 0,922): $k = 0,58 \pm 0,03$ и $b = 0,47 \pm 0,06$.

Зависимость между индексом дезинтеграции z и степенью повреждения ткани (степенью плазмолиза) p описывается уравнением Арчи [33, 43]:

$$z = p^m, \quad (9)$$

где $m = 1,8 - 2,5$ для ткани яблок, плазмолизованной электрическим полем в диапазоне напряженностей от 100 до 1500 В/см [33]. Нелинейная зависимость между индексом дезинтеграции и степенью плазмолиза ткани объясняется влиянием неоднородности структуры ткани на ее электропроводность [44, 45]. Кроме того, в результате электроплазмолиза могут наблюдаться различные переходные процессы, происходящие в ткани, такие как миграция влаги, перераспределение жидкой (влага) и газовой (воздух) фаз в поровом пространстве клеточной системы, которые оказывают влияние на проводящие свойства растительной ткани [31, 46].

Преобразуя уравнения (8) и (9), получим

$$P = P_{\max} - kp^s, \quad (10)$$

где $s = mb$. Принимая во внимание величины $m = 1,8 - 2,5$ и $b = 0,47$, упомянутое выше, значение показателя степени s в уравнении (10) оказывается в диапазоне 0,85 – 1,18 со средним значением $s \approx 1$. Этот результат обнаруживает практически линейную зависимость между давлением раздавливания и степенью плазмолиза ткани. Таким образом, полученная зависимость показывает, что электрообработка уменьшает прочность каркасной структуры клеток.

Выводы

Изучено влияние импульсного электроплазмолиза на структурные свойства ткани яблок. Результаты показали, что после электрообработки пористость ткани исследованных образцов увеличилась с 67 до 75% и с 63 до 69% в зависимости от сорта яблок. Размер индуцированных пор по порядку величины был сравним с толщиной клеточных стенок. Анализ механических свойств ткани яблок показал, что тургорное давление и давление раздавливания уменьшаются с увеличением интенсивности электрической обработки. Эти данные позволили сделать вывод, что электроплазмолиз влияет не только на биологические мембраны, но и на целостность клеточных стенок.

Установлена линейная зависимость между давлением раздавливания и степенью плазмолиза ткани.

Проведенные исследования позволили расширить понимание синергетического механизма совместного действия механических и электрических факторов на плазмолиз растительной ткани.

ЛИТЕРАТУРА

1. Knorr D., Angersbach A. Impact of high intensity electric field pulses on plant membrane permeabilization // Trends Food Sci. Technol. 1998. V.9. P. 185 – 191.
2. Barbosa-Canovas G.V., Pierson M.D., Zhang Q.H., Schafner D.W. Pulsed electric fields // J. Food Sci. 2000. V.65(supplement). P. 65 – 79.
3. Zimmermann U., Pilwat G., Beckers F., Rieman F. Effects of external electric fields on cell membranes // Bioelectrochem. Bioenerg. 1976. V.3. P. 58 – 83.
4. McLellan M.R., Kime R.L., Lind L.R. Electroporation and other treatments to improve apple juice yield // J. Sci. Food Agric. 1991. V.57. P. 303 – 306.
5. Gudmundsson M., Mafsteinsson H. Effect of electric field pulses on microstructure of muscle foods and roes // Trends Food Sci. Technol. 2001. V.12. P.122 – 128.
6. Лазаренко Б.П., Фурсов С.П., Щеглов Ю.А. и др. Электроплазмолиз. Кишинев, 1977.
7. Winterhalter M., Helfrich W. Effect of voltage on pores in membranes // Phys. Rev. A. 1987. V.36(12). P. 5874 – 5876.
8. Teissie J., Eynard N., Gabriel B., Rols M.P. Electroporation of cell membranes // Advanced Drug Delivery Rev. 1999. V.35. P.3 – 19.
9. Barsotti L., Dumay E., Mu T.H., Diaz M.D.F., Cheftel J.C. Effects of high voltage electric pulses on protein-based food constituents and structures // Trends Food Sci. Technol. 2001. V.12. P.136 – 144.
10. Гулый И.С., Лебовка Н.И., Манк В.В. и др. Научные и практические принципы электрической обработки пищевых продуктов и материалов. Киев, 1994.
11. Ade-Omowaye B.I.O., Angersbah A., Taiwo K.A., Knorr D. Use of pulsed electric field pretreatment to improve dehydration characteristics of plant based foods // Trends Food Sci. Technol. 2001. V.12(8). P. 285 – 295.
12. Bazhal M.I., Vorobiev E.I. Electrical treatment of apple slices for intensifying juice pressing // J. Sci. Food Agric. 2000. V.80. P.1668 – 1674.
13. Beveridge T. Juice extraction from apples and other fruits and vegetables. Critical Rev. Food Sci. Nutr. 1997. V.37(5). P.449 – 469.
14. Knorr D., Angersbach A., Eshtiaghi M.N., Heinz V., Lee D.U. Processing concepts based on high intensity electric field pulses // Trends Food Sci. Technol. 2001. V.12(4). P.129 – 135.
15. Jemai A.B. Contribution a l'étude de l'effet d'un traitement électrique sur les cossettes de betterave a sucre. Incidence sur le procédé d'extraction. Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France, 1997.
16. Купчик М.П. Разработка технологии сахара из свеклы с применением электрических полей низкой частоты: Автореф. дис. докт. техн. наук. М., 1991.
17. Rastogi N.K., Eshtiaghi N.M., Knorr D. Accelerated mass transfer during osmotic dehydration of high intensity electrical field pulse pretreated carrots // J. Food Sci. 1999. V.64(6). P.1020 – 1023.
18. Ade-Omowaye B.I.O., Angersbah A., Eshtiaghi N.M., Knorr D. Impact of high intensity electric field pulses on cell permeabilisation and as pre-processing step in coconut processing // Innovative Food Sci. Emerging Technol. 2000. V.1(3). P.203 – 209.
19. Бордиян В.В. Интенсификация сушки растительного сырья электроплазмолизом: Автореф. дис. канд. техн. наук. М., 1991.
20. Bazhal M.I., Lebovka N.I., Vorobiev E.I. Pulsed electric field treatment of apple tissue during compression for juice extraction // J. Food Eng. 2001. V.50(3). P.129 – 139.
21. Weaver J.C., Chizmadzhev Y.A. Theory of electroporation: a review // Bioelectrochem. Bioenerg. 1996. V.41. P.135 – 160.
22. Rojas A.M., Castro M.A., Alzamora S.M., Gershenson L.N. Turgor pressure effects on textural behaviour of honeydew melon // J. Food Sci. 2001. V.66(1). P.111 – 117.
23. Чебану В.Г. Повышение эффективности электроплазмолиза растительного сырья: Автореф. дис. канд. техн. наук. Киев, 1987.
24. Fincan M., Dejmek P. In situ visualization of the effect of a pulsed electric field on plant tissue // J. Food Eng. 2002. V.55(3). P.223 – 230.
25. Krokida M.K., Oreopoulou V., Maroulis Z.B., Marinos-Kouris D. Effect of pre-treatment on viscoelastic behaviour of potato strips // J. Food Eng. 2001. V.50. P.11 – 17.

26. *Матвиенко А.Б.* Интенсификация извлечения растворимых веществ электрообработкой растительного сырья и воды: Автореф. дис. докт. техн. наук. Киев, 1996.
27. *Taiwo K.A., Angersbach A., Ade-Omowae B.I.O., Knorr D.* Effects of pretreatments on the diffusion kinetics and some quality parameters of osmotically dehydrated apple slices // *J. Agric. Food Chem.* 2001. V.49. P.2804 – 2811.
28. *Blahovec J.* Improved rate controlled model for stress relaxation in vegetable tissue // *Int. Agrophysics.* 2001. V.15. P.73 – 78.
29. *Finney E.E., Hall C.W.* Elastic properties of potatoes // *Trans. ASAE.* 1967. V.10(1). P.4 – 8.
30. *Lebovka N.I., Bazhal M.I., Vorobiev E.* Simulation and experimental investigation of food material breakage using pulsed electric field treatment // *J. Food Eng.* 2000. V.44. P.213 – 223.
31. *Lebovka N.I., Bazhal M.I., Vorobiev E.* Pulsed electric field breakage of cellular tissues: visualization of percolative properties // *Innovative Food Sci. Emerging Technol.* 2001. V.2(2). P.113 – 125.
32. *Bazhal M.I.* 2001. Etude du mécanisme d'électroperméabilisation des tissus végétaux. Application à l'extraction du jus des pommes. Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France, 2001.
33. *Lebovka N.I., Bazhal M.I., Vorobiev E.* Estimation of characteristic damage time of food cellular materials in pulsed electric fields // *J. Food Eng.* 2002. V.54. P.337 – 346.
34. *Серебряков Р.А., Бажал М.И., Купчик М.П. и др.* Определение энергетического барьера тепловой денатурации клеток при термоплазмолизе сахарной свеклы // Научные труды Национального университета пищевых технологий. 2002 (на украинском языке).
35. *Zogsas N.P., Maroulis Z.B., Marinos-Kouris D.* Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying // *Drying Technol.* 1994. V.12(7). P.1653 – 1666.
36. *Krokida M.K., Maroulis Z.B.* Structural properties of dehydrated products during rehydration // *Int. J. Food Sci. Technol.* 2001. V.36. P.529 – 538.
37. *Mauseth J.D.* Botany: An Introduction to Plant Biology. Philadelphia. Saunders College Pub. 1991. P.50 – 56.
38. *Jackman R.L., Stanley D.W.* Perspectives in the textural evaluation of plant foods // *Trends Food Sci. Technol.* 1995. V.6(6). P.187 – 194.
39. *Raven P.H., Evert R.F., Curtis H.* Biology of plants. 3^d ed. N.-Y. Worth Publishers, 1981. P.16 – 17.
40. *Stanier R.Y., Doudoroff M., Adelberg E.A.* The microbial world. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Inc., 1970. P.325 – 326.
41. *Sajnin C., Gerschenson L.N., Rojas A.M.* Turgor pressure in vegetable tissues: comparison of the performance of incipient plasmolysis technique using mannitol and polyethylenglycol // *Food Res. Int.* 1999. V.32(8). P.531 – 537.
42. *Wu H., Pitts M.J.* Development and validation of a finite element model of an apple fruit cell // *Postharvest Biol. Technol.* 1999. V.16. P.1 – 8.
43. *Archie G.E.* The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics // *Trans. AIME.* 1942.. V.146. P.54 – 62.
44. *Angersbach A., Heinz V., Knorr D.* Effects of pulsed electric fields on cell membranes in real food systems // *Innovative Food Sci. Emerging Technol.* 2000. V.1. P.135 – 149.
45. *Wang C.S., Kuo S.Z., Kuo-Huang L.L., Wu J.S.B.* Effect of tissue infrastructure on electric conductance of vegetable stems // *J. Food Sci.* 2001. V.66(2). P.284 – 288.
46. *Aguilera J.M., Stanley D.W., Baker K.W.* New dimensions in microstructure of food products // *Trends Food Sci. Technol.* 2000. V.11(1). P.3 – 9.
47. *Bazhal M.I., Ngadi M.O., Raghavan G.S.V.* Modeling compression of cellular systems exposed to combined pressure and pulsed electric field // *Trans. ASAE.* 2002 (submitted).

Поступила 16.12.02

Summary

The influence of pulsed electric field (PEF) electroplasmolysis on compressibility of apple tissue were investigated as a function of the tissue plasmolysis degree. It has been established that PEF treatment increases apple tissue porosity from 63 to 69% and from 67 to 75% in dependency of apple variety. Sizes of the PEF induced pores were comparable with the cell wall thickness. The analysis of changes in structural and mechanical properties of the samples after PEF treatment allowed to make conclusion that electroplasmolysis affects not only biological membranes but also cell wall integrity of tissue. Significant reduction in tissue elastic modulus even at low plasmolysis degree (about 25 – 30%) has been explained in the term of synergy between pressure and PEF.

А.Р. Ризун, И.С. Швец, Ю.В. Голень

ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОЧИСТКИ ТРУБ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
просп. Октябрьский, 43А, г. Николаев, 54018, Украина*

Основными отраслями промышленности, в которых массово применяются теплообменные аппараты (ТА), являются химическая, коксохимическая, нефтехимическая, энергетическая; ТА используются и на отдельных предприятиях других отраслей, например, глиноземные, сахарные заводы и другие.

В результате многократного использования оборотной воды в процессах теплообмена возрастает ее жесткость, что приводит к образованию минеральных отложений на стенках ТА. Уже при толщине отложений 1,5 – 2,0 мм резко снижается коэффициент теплопередачи, возрастают потери энергии и снижается выход основного технологического продукта.

Изучение проблемы очистки труб ТА непосредственно на предприятиях показало, что особенно остро стоит проблема удаления прочных отложений. Существующие технологии очистки теплообменных поверхностей базируются на химическом, абразивном, механическом или гидромеханическом способах. Наиболее часто применяют одновременно несколько способов: размягчение отложений с помощью 5 – 15% раствора соляной кислоты или углеводородных растворителей с последующим удалением отложений абразивными способами: механическим – бурами, шарошками и тому подобное, или гидромеханическими – струей воды высокого давления [1]. К недостаткам вышеназванных способов следует отнести:

- химический способ не является экологически чистым, высокая стоимость реагентов, необходимость нейтрализации и захоронения отходов, кроме того, травильные растворы могут вызвать последующую коррозию материала труб;

- абразивный – недостаточная полнота очистки, высокая трудоемкость, запыленность;

- гидромеханический – высокая стоимость оборудования и эксплуатационных затрат.

Проблема образования отложений и их последующего удаления существует и на нефтепромыслах [2]. Отложение солей и других минеральных веществ происходит на различных участках насосно-компрессорных труб, вплоть до призабойных зон скважин.

Особо интенсивные отложения наблюдаются в выкидных линиях и на внутривыпускных коммуникациях. Скорость и глубина зарастания насосно-компрессорных труб зависит от объема и минерализации попутно извлекаемой с нефтью воды.

Минеральные отложения в трубах представляют собой CaCO_3 , MgCO_3 и ряд солей других. Кроме минеральных в насосно-компрессорных трубах образуются отложения высокомолекулярных углеводородов (парафинов) от $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$ до $\text{C}_{130}\text{H}_{262}$.

Кристаллизация парафинов происходит вследствие изменения термодинамического состояния лотка. В условиях нефтепромыслов отложения парафинов, начиная с глубины 800 – 900 м с нарастанием простираются до устья скважин, а в осенне-зимние периоды и по выкидным линиям. Период замены труб составляет от 10 суток до нескольких месяцев.

Электрогидроимпульсная технология основана на использовании энергии высоковольтного электрического разряда в водной среде между специальным электродом и трубой, который генерирует ударные волны и гидротоки жидкости, обеспечивающие разрушение и удаление отложений или других нежелательных покрытий [3].

Такая технология и оборудование могут найти применение в следующих отраслях промышленности:

- химическая и нефтеперерабатывающая (теплообменники и коммуникации);
- металлургия (теплообменники);
- нефтедобыча (насосно-компрессорные трубы, внутрипромысловые коммуникации);
- теплоэнергетика (теплообменники, котлы, бойлеры, коммуникации).

Основными преимуществами электрогидроимпульсной технологии являются простота эксплуатации оборудования и низкое энергопотребление; высокое качество очистки и экологическая чистота; возможность удаления отложений высокой прочности; невысокая стоимость оборудования и низкие эксплуатационные расходы по сравнению с традиционными механическими и химическими методами.

Оборудование типа «Искра» для электрогидроимпульсной очистки (ЭГИО) поверхности труб от отложений состоит из технологического узла, высоковольтного блока, системы управления и контроля.

Оборудование имеет блочную схему компоновки, легко транспортируется и может работать как на стационарных участках в производственных помещениях, так и на открытых площадках, эстакадах и промыслах.

При обработке теплообменных аппаратов работа оборудования сводится к следующему. Технологический узел осуществляет ввод электрода в трубу, его перемещение и обеспечивает подачу в трубу воды. При включенном генераторе импульсных токов происходит обработка внутренней поверхности трубы. Скорость перемещения электрода определяется при разработке техпроцесса.

Производительность очистки труб зависит от параметров разрядного контура и характеризуется скоростью очистки

$$V = f \frac{L_{\text{тр}}}{\sum N}, \quad (1)$$

где V , м/с; $L_{\text{тр}}$ – длина очищаемого участка трубы, м; $\sum N$ – суммарное количество разрядов, затраченных на очистку участка $L_{\text{тр}}$; f – частота следования разрядов, Гц.

В свою очередь количество разрядов, затраченных на ЭГ очистку участка трубы, зависит от прочности отложений ($\sigma_{\text{сж}}$). Радиус разрушения отложений от единичного разряда определяется эмпирической зависимостью, установленной по результатам большого количества экспериментов при разрушении неметаллических материалов (4)

$$R = 0,01 \sqrt{\frac{P}{\sigma_{\text{сж}}}}, \quad (2)$$

где P – давление волны сжатия, генерируемой электроразрядом, зависит от параметров разряда и расстояния r от канала разряда до точки разрушения (нахождения отложений) и определяется выражением [5]:

$$P = 6 \left(l U_0^2 \right)^{1/3} \frac{1}{r}, \quad (3)$$

где l – разрядный промежуток, равный 0,04 – 0,06 м; U_0 – рабочее напряжение; r – расстояние объекта разрушения от канала разряда, может быть равным 0 – 0,12 м; $\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности отложения при сжатии (3 – 6 ед. по шкале Мооса);

Таким образом, зная параметры установки, диаметр трубы, прочностные характеристики отложений, их объем по формулам (1) – (3), устанавливается скорость движения электрода в трубе, заполненной водой.

Разрушенная масса отложений или других нежелательных покрытий удаляется потоком воды через восстановленное сечение трубы в сборный бункер.

В таблице представлена краткая техническая характеристика ЭГ оборудования типа «Искра» по очистке труб с учетом расчетных показателей производительности и энергозатрат.

Участок электроразрядной очистки труб нефтяных скважин или наземных коммуникаций может содержать три позиции: прошивку отверстия в отложениях, электрогидроимпульсную обработку и гидроиспытание труб. Операция прошивки предусмотрена для случаев, когда отверстие в

отложениях недостаточно для прохождения электродной системы. Порядок выполнения рабочих операций очистки насосно-компрессорных труб принципиально не отличается от – выполнения операций, изложенных для очистки труб в ТА на установках типа «Искра».

Основные технические характеристики

Производительность в зависимости от диаметра труб, толщины и прочности отложений, м/ч	10 – 40
Энергопотребление, кВт·ч/м	0,1 – 0,4
Диаметр обрабатываемых труб, мм	25 – 500
Длина труб, мм, не более	12000
Масса оборудования, кг	150 – 400
Количество обслуживающего персонала, чел.	1 – 2
Сроки окупаемости установки, год, не более	1

Освоение оборудования и технологии 6 – 12 месяцев с учетом отработки технологии в производственных условиях “Заказчика”.

Таким образом, использование электрогидроимпульсной очистки позволяет в первую очередь экономить дорогостоящие трубы в ТА, повысить производительность добычи нефти, воды, значительно улучшить санитарно-гигиенические условия при проведении ремонтных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Поникаров И.И.* Машины и аппараты химических производств и предприятий строительных материалов. М., 1989.
2. *Алагаров Ф.Ф., Рзазаде Н.А.* Проблемы борьбы с твердыми отложениями при добыче нефти. Баку. 1995. С 26 – 32.
3. *Гаврилов Г.Н., Горовенко Г.Г., Малюшевский П.П., Рябинин А.Г.* Разрядноимпульсная технология обработки минеральных сред. Киев, 1979.
4. *Ризун А.Р., Цуркин В.Н.* Электроразрядное разрушение неметаллических материалов // Электронная обработка материалов. 2002. № 1. С. 83 – 85.
5. *Гулый Г.А., Малюшевский П.П.* Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах. Киев, 1977.

Поступила 22.10.02

Summary

The method of pulsed electrical discharge treatment is environmentally appropriate and effective enough for crushing high strength materials. It is widely used at crushing moulds and cores in the process of cast cleaning, destruction of materials in porcelain and fireproof industry. In this work the schemes and technical calculations are presented for the problem of cleaning tubes of heat exchange apparatus or tubes intended for other applications. The radius of the deposit destruction has been evaluated as well its volume and the method's productivity. The work may be of interest for specialists in the field of material destruction as well as in the fields of industry where heat exchange apparatus are used.

А.В. Кравченко¹, В.С. Кублановский²

ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ЭЛЕКТРОЛИЗА ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД*

¹*Украинский государственный химико-технологический университет,
проспект Гагарина, 5, г. Днепропетровск, 49600, Украина*

²*Институт общей и неорганической химии НАН Украины им. В.И. Вернадского,
просп. Палладина, 32–34, г. Киев, 03680, Украина*

Резкое повсеместное ухудшение экологической ситуации привело к существенному многокомпонентному загрязнению водоемов и поверхностного слоя земли. В воде и почве в опасных концентрациях могут содержаться нефтепродукты, поверхностно-активные вещества, ионы тяжелых металлов, пестициды, органические вещества и др.

Основным источником загрязнений водоемов и почвы являются сточные воды, содержащие загрязнения в опасных концентрациях. Так как водоемы являются основным источником водоснабжения населения, а эффективность водопроводных очистных сооружений в отношении многих указанных выше веществ незначительна, то весьма актуально стоит вопрос о высокоэффективной очистке сточных вод и обеспечении населения качественной питьевой водой.

Известные реагентные методы очистки жидких стоков наряду с достоинствами не лишены и недостатков. Упомянем основные из них:

- при введении реагента в раствор лишь некоторая его часть необходима для проведения реакции, другая часть является балластом, загрязняющим обрабатываемый раствор;
- при реакции действующего начала реагента с загрязнителем в воде накапливаются продукты реакции действующего начала реагента;
- при очистке разбавленных сточных вод технологически необходимо для обеспечения полноты реакции поддерживать избыточное количество реагента, что может способствовать вторичному загрязнению воды.

Для решения проблемы очистки сточных вод предлагается метод и установка люминесцентного электролиза, обеспечивающая очистку и тонкую доочистку промышленных сточных вод от органических и неорганических загрязнений до санитарных норм, позволяющих обеспечивать их сброс.

Применение метода низкотемпературного плазменного (люминесцентного) электролиза позволяет обеспечить уменьшение содержания вредных веществ в водном растворе не менее 95 – 99% при исходном уровне концентрации загрязнений, присутствующих в реальных сточных водах на уровне 2 – 5 предельно допустимых концентраций:

- ионов металлов (Hg, Cu, Zn, Fe, Pb, Cr, Ni, Mg, Ca, Ag, Au, Pb, Mn, Cd, U, Th и др.);
- анионов SCN^- , CN^- , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, HCO_3^- , NO_2^- и др.;
- органических соединений предельного и непредельного ряда и их производных – спиртов, альдегидов, эфиров, галогенпроизводных (хлороформ);
- ароматических и уникальных органических соединений и их производных – фенолов, анилина, бензпирена и др.;
- нефтепродуктов;
- поверхностно-активных веществ;

* Доклад на заседании Международной школы–семинара по прикладной электрохимии и электрическим методам обработки материалов “Петровские чтения” 11 октября 2002 г.

– бактериальных, микробных и вирусных загрязнений – *E. coli*, *Aerococcus viridans*, *Salmonella typhimurium*, *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aerogenosae*, *Proteus vulgaris*, *Candida albicans*, *Staphylococcus aureus*.

Уникальность метода люминесцентного электролиза состоит в том, что он позволяет оказывать воздействие на жидкость с помощью электрического и фотохимического эффектов, а также электрохимических реакций, протекающих на электроде, погруженном в жидкость, и пролонгированного воздействия продуктов, образующихся в водном растворе при воздействии двух первых факторов.

На рис. 1 представлена схема установки для реализации метода люминесцентного электролиза в пленочном режиме протекания жидкости. Реактор 1 представляет собой полую трубку из диэлектрического материала с катодом 4, выполненным в виде кольца, и коаксиально расположенным анодом 3. Обрабатываемая жидкость, равномерно распределяемая с помощью форсунки 2 на стенки реактора, в виде пленки стекает вниз и попадает в зону обработки тлеющим разрядом, после чего собирается в приемной емкости 13, откуда при необходимости подается на фильтры 14. В дальнейшем обработанная жидкость может быть возвращена в технологический процесс, направлена в слив или на повторную обработку с целью повышения качества очистки.

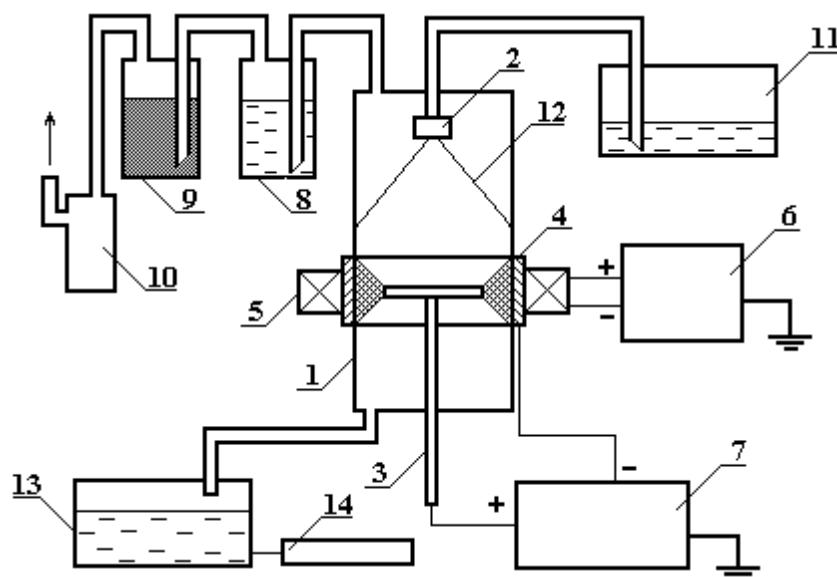


Рис. 1. Блок-схема установки для обработки жидкостей в проточном режиме: 1 – реактор; 2 – форсунка; 3 – анод; 4 – катод; 5 – электромагнит; 6 – источник питания электромагнита; 7 – источник питания разряда; 8 – поглотитель влаги первой ступени; 9 – поглотитель влаги второй ступени; 10 – вакуумный насос; 11 – необработанный раствор; 12 – пленка жидкости; 13 – раствор после обработки; 14 – фильтры

В методе низкотемпературного плазменного электролиза электрохимический фактор воздействия присутствует, но в весьма своеобразном аспекте. Анодные процессы протекают на границе газ-жидкость, обращенной в сторону жидкости и снабжают обрабатываемый раствор ионами и радикалами деструкции воды под действием электроразряда люминесцентного электролиза на жидкость, эти высокорекреакционные соединения способствуют образованию реакций лавинного характера с примесями присутствующими в воде [1 – 4].

Катодные процессы протекают в основном в виде образования атомарного и молекулярного водорода на поверхности электрода погруженного в жидкость. Атомарный водород является одним из самых сильных химических восстановителей. Такое направленное с двух сторон воздействие на обрабатываемую жидкость приводит к протеканию реакционных взаимодействий, приводящих к окислительно-восстановительным изменениям загрязнений, и, как следствие, высокой степени очистки воды.

При этом в исходный водный раствор не вносятся какие-либо дополнительные химические вещества, которые бы в последствии могли накапливаться в воде и вызывать ее дополнительное загрязнение. При очищении воды от одних загрязнений в нее не вносятся другие. Единственным расходным фактором является электрический ток, рост которого пропорционален росту количеству исходных загрязнений.

При использовании метода люминесцентного электролиза в жидкофазных системах использовали давление 50 – 100 мм рт. ст. Нижний предел обусловлен интенсивным парообразованием и вскипанием обрабатываемой жидкости, что приводит к дестабилизации тлеющего разряда и значительному снижению его эффективности. Верхний предел обусловлен резким повышением силы тока в электрохимической цепи и изменением протекающих в жидкости физико-химических процессов, что связано с переходом тлеющего разряда в дуговой [5].

Предлагаемый метод для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов позволяет производить очистку от ионов и анионов слабых кислот без внесения сторонних реактивов и балластных элементов, так как действующим началом процесса очистки является спектр физико-химических воздействий, оказываемых методом люминесцентного электролиза, пролонгированным химическим действием перекисных и надперекисных соединений, короткоживущих ионов и радикалов, образующихся в воде при контакте с плазмой. Результатом этого комплексного воздействия на водный раствор являются соединения, образующиеся при окислительно-восстановительных реакциях с элементами-загрязнителями. Например: цианид-ион разрушается с образованием углекислого газа и азота; ионы меди, цинка, никеля, железа образуют соответствующие гидроксиды, переходящие на стадии разделения фаз в осадок; ионы шестивалентного хрома восстанавливаются до трехвалентного и при соответствующем значении pH образуют гидроксид хрома трехвалентного [6 – 7].

Если к вопросу извлечения ионов тяжелых металлов подойти комплексно, то есть подвергать очистке выделенные разделенные стоки, то представляется возможным значительно упростить дальнейшую утилизацию образующегося осадка, так как в результате такой очистки образуется гидроксидный осадок, состоящий в значительной мере из гидроксидов одного металла и лишь незначительно загрязненный примесями других тяжелых металлов, неизбежно присутствующих в растворе. Это предотвращает проблему захоронения образующихся шламов, состоящих из большого числа элементов, присутствующих в совмещенном стоке, так как ил, состоящий из гидроксидов одного элемента, легко может быть переработан металлургическим или гидрометаллургическим способом в товарный продукт.

Помимо этого нужно отметить, что чем более разбавленным является сток, тем более эффективно применение устройств очистки методом люминесцентного электролиза, так как они позволяют очищать стоки с исходной концентрацией порядка 10^{-3} г/л до концентрации порядка 10^{-6} г/л, тем самым достигая уровня санитарных норм практически для любого загрязнителя.

Использование этого метода для очистки воды от органических загрязнителей позволяет одновременно сочетать физические возможности флотационного метода за счет присутствующего в объеме газообразного водорода, образующегося на электроде в жидкой фазе, и химические возможности окислительных методов за счет образования в поле действия люминесцентного пятна на жидкости высокорективных окислительных ионов, радикалов, перекисных и надперекисных соединений и контактного воздействия на поверхности жидкости люминесцентного пятна, заключающегося в одновременном воздействии электронного, ионного, атомного, молекулярного, фотонного ударов в поле действия образованных плазмой электрического и магнитного полей. Это комплексное воздействие приводит к деструкции органических соединений и, как правило, к их коагуляции. Обработанные этим методом сточные воды значительно легче подвергаются разделению по фазовым состояниям и, как правило, представляют желеобразные включения в основной массе воды.

На рис. 2 представлены зависимости деструкции поверхностно-активного вещества ДС-10 различными методами при одинаковых энергетических затратах. На основании этих зависимостей можно сделать вывод о несомненных преимуществах метода люминесцентного электролиза по отношению к другим рассмотренным методам [8 – 11].

При антимикробной очистке обработкой разрядом воды, не требующей очистки и имеющей коли-индекс 10^5 , обеспечивает ее обеззараживание по микробиологическим показателям в соответствии с ГОСТ "Вода питьевая". Эффективность обеззараживания воды не зависит от степени ее заражения кишечной палочкой в пределах 10^3 – 10^5 микробных клеток на один литр. В процессе обработки разрядом в воде образуются окислители, которые обеспечивают пролонгированное воздействие на микроорганизмы, что может представлять интерес для практического использования. Тлеющий разряд в водной среде обладает широким спектром антимикробной активности: он вызывает гибель вегетативных форм бактерий (*S. aureus*, *P. aeruginosa*), микробактерий, патогенных грибов (дрожжеподобных грибов *C. albicans*), вирусов (вирус полиомиелита I типа), среди которых наиболее резистентными к действию разряда являются *S. aureus* и микобактерий B5 [12 – 14].

Исследования показали возможность достижения высокой степени очистки природных вод от изотопов урана 238, 234 и радия 226. Известно, что содержание урана регламентируется по его токсичному действию и радиоактивности [15]. В настоящее время не существует эффективных систем для очистки воды от указанных элементов.

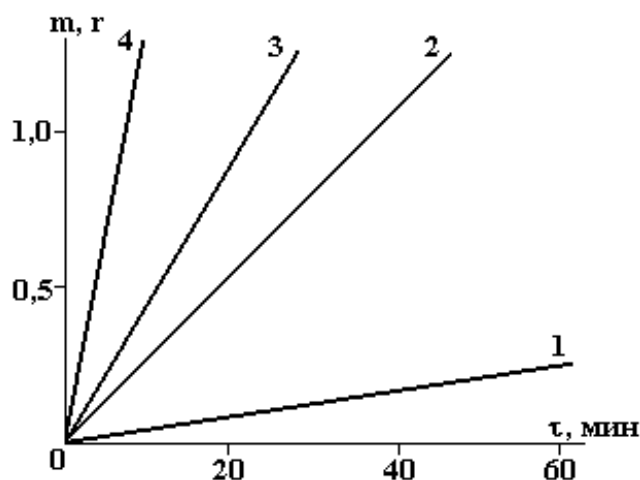


Рис. 2. Сравнительная характеристика деструкции синтанола ДС-10 различными методами при мощности электрических установок 500 Вт: 1 – озонирование; 2 – электрохимическое окисление; 3 – тлеющий разряд (периодический реактор); 4 – тлеющий разряд (пленочный режим протекания жидкости)

Исследования показали перспективность данного метода, а затраты на его реализацию вполне приемлемы [16 – 18]. Целесообразно проведение дальнейших исследований по оптимизации технологии очистки в зависимости от активности и состава радионуклидов. С помощью лабораторной установки достигнуто уменьшение α - и β -излучателей более чем в 300 раз (образец активностью 1570 Бк/л был очищен до 5 Бк/л).

В таблице представлены данные по очистке модельных растворов солей некоторых радиоактивных элементов. Радиохимическое определение плутония проводилось по методике НЦРМ АМН Украины, измерение радиоактивности производили на альфа-спектрометре фирмы "Canberra".

Калибровка и градуировка прибора проводилась по эталонам ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu и образцовому раствору ^{242}Pu . Раствор америция приготавливался на дистиллированной воде.

Как видно из представленных в таблице данных, после первого прохода и фильтрования наблюдается практически полная очистка водных растворов, содержащих изотопы плутония.

Зависимость изменения удельной активности и степени очистки от количества рециклов при применении люминесцентного электролиза

Количество проходов	Удельная активность				Степень очистки, %			
	Бк/л			имп/с				
	^{242}Pu	$^{239,240}\text{Pu}$	^{238}Pu	Am	^{242}Pu	$^{239,240}\text{Pu}$	^{238}Pu	Am
0	56,10	3,600	0,600	8,76	—	—	—	—
1	0,71	0,040	0,010	1,03	98,73	98,88	98,33	88,24
2	0,44	0,030	0,001	0,29	99,22	99,16	99,83	96,70
3	0,16	0,004	0,001	0,15	99,71	99,88	99,83	98,29
4	0,07	0,003	< 0,001	0,11	99,88	99,91	> 99,83	98,74
5	0,05	< 0,001	< 0,001	0,08	99,91	99,97	> 99,83	99,09

При очистке сточных вод кино-фотопроизводств воздействию тлеющего разряда подвергались промывные воды цеха обработки киноматериалов содержащие тиосульфатные комплексы серебра и свободный тиосульфат натрия, гексацианофераты, проявляющие вещества в разделенных смешанных потоках. Проведенные испытания показали: серебро из тиосульфатных растворов с исходной концентрации 60 – 100 мг/л извлекается на 99 – 99,5%, при этом концентрация тиосульфата снижается с

6 – 12 до 1 – 2,5 г/л; энергозатраты составляют 20 кВт·ч/м³. При обработке растворов, содержащих цветное проявляющее вещество и гексацианоферрат, снижение концентрации происходит на 90 и 75% соответственно, исходные концентрации 2 – 40 мг/л, энергозатраты 19 кВт·ч/м³ [19 – 20].

Таким образом, метод люминесцентного электролиза может применяться для очистки сточных вод предприятий коммунальных хозяйств, предприятий хлебопекарной, мясомолочной, сахарной промышленности, предприятий по производству медпрепаратов и биопродуктов, станций питьевого водоснабжения, инфекционных клиник, обогатительных комбинатов, атомных электростанций, специальных лечебных заведений, станций питьевого водоснабжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кравченко А.В., Нестеренко А.Ф. Деструкция химически чистой воды в разрядах пониженного давления // Укр. хим. журнал. 1994. Т. 60. С. 429 – 432.
2. Кравченко А.В., Нестеренко А.Ф., Кублановский В.С. О некоторых реакциях, протекающих при люминесцентном электролизе // Доклады НАН Украины. 1996. № 7. С. 115 – 120.
3. Кравченко А.В., Нестеренко А.Ф. Особенности протекания электрохимических реакций на границе раздела газ–жидкость // Укр. хим. журнал. 1994. Т. 60. С. 289 – 292.
4. Кравченко А.В. Физико-химические процессы при обработке водных сред люминесцентным электролизом // Вопросы химии и химической технологии. 1999. № 1. С. 196 – 198.
5. Еремин Е.Н. Элементы газовой электрохимии. М., 1968.
6. Кравченко А.В., Барский В.Д., Рудницкий А.Г. и др. Люминесцентный электролиз вод, содержащих ионы тяжелых металлов // Химия и технология воды. 1997. Т. 19. № 2. С. 196 – 201.
7. Кравченко А.В., Подгорный О.А., Царенко В.В. и др. Физико-химический состав и органолептические свойства воды, обработанной тлеющим разрядом // Химия и технология воды. 1997. Т. 19. № 1. С. 102 – 107.
8. Кравченко А.В., Рудницкий А.Г., Нестеренко А.Ф., Кублановский В.С. Разложение синтанола ДС-10 с использованием реакции переноса энергии // Укр. хим. журнал. 1994. Т. 60. С. 749 – 752.
9. Кравченко А.В., Рудницкий А.Г., Нестеренко А.Ф., Кублановский В.С. Эффективность использования электрических методов деструкции неионогенных ПАВ–отходов производства // Гальванотехника и обработка поверхности. 1996. Т. 4. № 3. С. 49 – 54.
10. Рудницкий А.Г., Кравченко А.В., Барский В.Д. и др. Влияние основных технологических факторов на процесс воздействия контактного тлеющего разряда на водные растворы, содержащие неионогенные ПАОВ // Вопросы химии и химической технологии. 1999. № 1. С. 283 – 285.
11. Рудницкий А.Г., Кравченко А.В., Барский В.Д., Нестеренко А.Ф., Кублановский В.С. Об использовании различных электрических методов разрушения неионогенных ПАОВ // Вопросы химии и химической технологии. 1999. № 1. С. 285 – 287.
12. Кравченко А.В., Подгорный О.А., Царенко В.В. и др. Антимикробное действие тлеющего разряда на патогенные, условно-патогенные и индикаторные бактерии в воде // Химия и технология воды. 1995. Т. 17. № 5. С. 549 – 553.
13. Кравченко А.В., Подгорный О.А., Царенко В.В. и др. Влияние тлеющего разряда на гибель колифагов и вирусов в питьевой воде // Химия и технология воды. 1996. Т. 18. № 4. С. 430 – 435.
14. Берлизова С.А., Кравченко А.В., Нестеренко А.Ф., Кублановский В.С. Применение люминесцентного электролиза для снижения бактериального загрязнения вод // Коммунальное хозяйство городов. 2001. Т. 30. С. 46 – 51.
15. Марков В.К., Виноградов А.В., Еминсон С.В. и др. Уран, методы его определения. М., 1960.
16. Кравченко А.В., Царенко В.В., Нестеренко А.Ф., Кублановский В.С. О возможности использования люминесцентного электролиза в процессах очистки жидких радиоактивных сред // Журнал прикладной химии. 1996. Т. 69. Вып. 1. С. 55 – 59.
17. Кублановский В.С., Кравченко А.В., Нестеренко А.Ф. и др. Выделение трансурановых элементов при люминесцентном электролизе с использованием реакторов проточного типа // Химия и технология воды. 1997. Т. 19. № 4. С. 334 – 350.
18. Кравченко А.В. Использование реакторов проточного типа при выделении трансурановых элементов люминесцентным электролизом // Вопросы химии и химической технологии. 1999. № 1. С. 194 – 196.
19. Кравченко А.В., Барский В.Д., Рудницкий А.Г. и др. Люминесцентный электролиз электролитов, содержащих ионы серебра (I) и тиосульфат–ионы // Журнал прикладной химии. 1999 Т. 72. Вып. 3.

С. 447 – 450.

20. Кравченко А.В., Рудницкий А.Г., Нестеренко А.Ф., Кублановский В.С. Очистка сточных вод, содержащих цветные проявляющие вещества и ионы серебра, в условиях низкотемпературного плазменного электролиза // Журнал прикладной химии. 2002. Т. 75. Вып. 8. С. 1291 – 1294.

Поступила 12.11.02

Summary

Peculiarities of the action of glow discharge plasma on aqueous solution containing different types of industrial contaminants, including soluble heavy and radioactive metal salts, surfactants, and pathogenic organisms, have been considered. A high effectiveness of the use of the method of low-temperature glow-discharge electrolysis in the purification of industrial wastewater of different composition has been shown.

С.А. Баранов

КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ МИКРОПРОВОДА ДЛЯ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ЭКРАНОВ

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

Использование высоких и сверхвысоких частот в технике привело к необходимости создания защитных экранов. Литой аморфный микропровод может применяться как радиопоглощающий элемент в композиционном материале, например в каучуке [1]. Широкополосный радиопоглощающий материал можно создавать из микропровода различных сплавов с разной частотой естественного ферромагнитного резонанса. Явление естественного ферромагнитного резонанса в литом аморфном магнитом микропроводе подробно описано в работах [2 – 6]. Обсудим задачи оптимального конструирования композитов на основе микропровода. Так как поглощающие свойства материала связаны с высокочастотной проводимостью, проведем анализ обобщенной проводимости композитов.

Обобщенная проводимость композита

Радиопоглощающий материал с применением микропровода может быть основан на двух принципах размещения поглощающих элементов: а) стохастическая смесь из поглощающих отрезков, б) упорядоченная решетка. На самом деле можно использовать комбинацию этих способов размещения микропровода, но здесь рассмотрим их в отдельности. Важной электродинамической характеристикой поглощающей системы в обоих случаях является обобщенная высокочастотная проводимость. Воспользуемся результатом работ [7 – 9] и представим обобщенную проводимость композита в случае а) в следующей форме:

$$\begin{aligned} \Sigma_{\text{ср}} &= A + \sqrt{A^2 + a\Sigma_1\Sigma_2}, \\ A &= \frac{1}{2}[\Sigma_1(x_1 - ax_2) + \Sigma_2(x_2 - ax_1)]. \end{aligned} \quad (1)$$

Для второго случая представим обобщенную проводимость

$$\begin{aligned} \Sigma_{\text{эф}} &= \Sigma_0(1 + x_2/B), \\ B &= (1 - x_2)/(1/a + 1) + \Sigma_0/(\Sigma_2 - \Sigma_0) \end{aligned} \quad (2)$$

(напомним, что это матричная система с эффективной проводимостью $\Sigma_{\text{эф}}$).

Индексы $i = 0; 1$ относятся к непоглощающей компоненте (0 – это, например, основа на которую наматывается микропровод, 1 – это непроводящий элемент стохастической смеси, например, резина), индекс $i = 2$ – микропровод, x_i – объемная концентрация и Σ_i – обобщенная проводимость данной компоненты смеси (которая в данном случае может быть импедансом или комплексной магнитной проводимостью).

Параметр фрактальной размерности системы в обоих случаях a согласно [7 – 9] определяется:

$$a = 1/(L - 1), \quad (3)$$

где L – фрактальная размерность пространства, которая, как показано в [7], определяется из уравнения, имеющего для плоской задачи (с геометрической размерностью $L_2^0 = 2$) формальное решение вида

$$1/L = 1/L_2^0 + \Sigma_{cp}/(\Sigma_2 - \Sigma_1 + M), \quad (4)$$

где $\Sigma_{cp} \sim \sqrt{\Sigma_1 \Sigma_2}$, а $M \sim \Sigma_{cp}/(\Sigma_2 - \Sigma_1 + M)$ (строится итерационная система вычисления). Для трехмерной системы подобное вычисление параметра $1/L_3$ сложнее и не сводится к замкнутому виду. Пример простейшего расчета для трехмерной системы приведен в [9].

В высокочастотную проводимость входят параметры – действительная и мнимая часть импеданса микропровода. Ниже рассматривается методика измерения этих параметров.

Методика измерений отрезка из микропровода

В работах [5 – 7] предложен волноводный метод измерения импеданса, основывающийся на формулах

$$\begin{aligned} \alpha &= 0,5 \cdot [(1 - |T|^2 - |R|^2)/|R|^2], \\ \beta^2 &= |T|^2/|R|^2 - 0,5 \cdot [1 - |T|^2 - |R|^2]^2/|R|^4, \end{aligned} \quad (5)$$

$|T|$, $|R|$ – коэффициенты прохождения и отражения от микропровода в волноводе; α , β относительные (деленные на половину сопротивления волновода) действительная и мнимая части импеданса. Значение величины β необходимо изменить на β' , учитывающее приконтактное емкостное сопротивление. Для этого комплексные величины

$$\begin{aligned} R &= 1/(1 + \alpha + i\beta'), \\ T &= (\alpha + i\beta')/(1 + \alpha + i\beta') \end{aligned} \quad (6)$$

должны удовлетворять уравнению [10]:

$$\alpha + i\beta' = \{1 - R + T + 0,5 \cdot [(1 - T)^2 - R^2]\}/[(1 - R)^2 - T^2]. \quad (7)$$

Вычисление величины приконтактной емкости в модели плоскость – цилиндр (покрытый стеклянной оболочкой) приводит к формуле

$$\begin{aligned} C &= \pi \epsilon \epsilon_0 L \Phi(r_{ж}, h_{изол}), \\ \Phi(r_{ж}, h_{изол}) &= \left[\ln \left| h_{изол} / r_{ж} + \sqrt{(h_{изол} / r_{ж})^2 + 1} \right| \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $h_{изол}$ – толщина стеклянной изоляции, $r_{ж}$ – радиус жилы, L – длина, через которую осуществляется емкостная связь (обычно $L \sim 0,01$ м), а также ее измерение приводит к величинам 1 – 10 ПФ. Эта величина даст несущественный вклад в β в области, далекой от ферромагнитного резонанса. Как отмечалось в [7 – 11] вблизи резонанса необходимо учитывать реактивное сопротивление контакта провода с волноводом. Осуществить это позволяет численное решение (7) относительно β' с учетом емкостного сопротивления с емкостью (8).

Электродинамические характеристики решетки из микропровода

Ранее нами подробно рассматривался вариант создания радиопоглощающего материала из хаотических диполей микропровода, которые находились в резине (то есть стохастическая смесь) [1]. Ниже рассмотрим подробно дифракционную решетку из микропровода с шагом $A < \lambda$, где λ – длина волны электромагнитного поля. В этом случае имеет смысл рассматривать поверхностный импеданс

$$Z = R + iX. \quad (9)$$

Измеряемой величиной могут быть коэффициенты прохождения $|T|$ и отражения $|R|$, которые, как и в предыдущем пункте, определяются через относительные реальную и мнимую части импеданса

$$\begin{aligned} |T|^2 &= (\alpha^2 + \beta^2)/[(1 + \alpha)^2 + \beta^2], \\ |R|^2 &= 1/[(1 + \alpha)^2 + \beta^2], \end{aligned} \quad (10)$$

где $\alpha = 2R/Z_0$; $\beta = 2X/Z_0$; $Z_0 = 120\pi/A$.

Здесь используется аналогия между задачей проводника в волноводе и дифракционной решетке, отмеченное в [10, 12]. Введем функцию:

$$|G|^2 = 1 - |T|^2 - |R|^2 = 2\alpha / [(1 + \alpha)^2 + \beta^2], \quad (11)$$

которая является функцией поглощения. Несложно видеть, что данная функция имеет максимум при согласовании

$$\alpha \rightarrow 1 \text{ и } \beta \rightarrow 0.$$

$$\text{Тогда } |G|^2 = 1/2, |T|^2 = |R|^2 = 1/4. \quad (12)$$

Таким образом, поглощательные свойства нитей в данной модели сильно ограничены, что также не соответствует реальным экспериментальным данным.

Результаты исследований и выводы

Показатели ослабления электромагнитного поля дифракционной решетки с шагом 10^2 м^{-1} (измерения проводились согласно [13, 14]) в диапазоне 0,1 – 10 ГГц изменялись от 18 до 15 дБ. Для решетки с шагом 10^3 м^{-1} – от 20 до 40 дБ.

Теоретические оценки при учете только активного сопротивления провода дают гораздо меньшие значения коэффициента поглощения в пределах 5 – 15 дБ.

Существование ненулевой магнитной проницаемости позволяет расширить условия согласования для решетки. Как видно из экспериментальных данных, у полученных экранов аномально большие коэффициенты поглощения. Указанное различие нельзя объяснить только резистивными свойствами микропровода. Существенное увеличение поглощения обусловлено мнимой частью комплексной величины магнитной проницаемости μ – магнитной вязкостью μ'' . Зависимость β от μ'' носит линейный характер, что приводит к уменьшению коэффициента отражения. Поскольку одновременно уменьшается и коэффициент прохождения, это означает, что энергия электромагнитного излучения поглощается в материале с элементами поглощения из микропровода.

Управляя магнитной проницаемостью микропровода, изменяя состав и диаметр жилы, возможно получение ряда материалов с различными диапазонными поглощающими свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов С.А. Использование микропровода с естественным ферромагнитным резонансом для радиопоглощающих материалов // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 14. С. 21 – 23.
2. Баранов С.А., Бержанский В.Н., Зотов С.К. и др.. Ферромагнитный резонанс в аморфных магнитных проводах // ФММ. 1989. Т. 67. В. 1. С. 73 – 78.
3. Баранов С.А., Зотов С.К., Ларин В.С., Торкунов А.В. Особенности естественного ферромагнитного резонанса в аморфном микропроводе // ФММ. 1991. Т. 69. В. 12. С. 172 – 173.
4. Баранов С.А., Зотов С.К., Ларин В.С., Торкунов А.В. Структура и свойства аморфного микропровода // Металловедение и термическая обработка металлов. 1992. № 9. С. 26 – 28.
5. Баранов С.А. Магнитные свойства аморфного микропровода в СВЧ диапазоне // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 1. С. 136 – 137.
6. Баранов С.А. Исследование микропровода методом ферромагнитного резонанса // Электронная обработка материалов. 1998. № 1 – 2. С. 66 – 68.
7. Баранов С.А. Обобщенная проводимость и оптимальное выделение энергии // ЖТФ. 1999. Т. 69. № 7. С. 128 – 129.
8. Баранов С.А. Обобщенная проводимость композита на основе микропровода // Вестник Приднестровского университета. 1994. № 1(2). С. 126 – 130.
9. Баранов С.А., Щеглов Ю.А. Электропроводность водно-стружечных смесей // Электронная обработка материалов. 1985. № 1. С. 71 – 72.
10. Газян Л.Г., Суслов Л.И. Номограмма определения параметров эквивалентного четырехполюсника для рефлектометрического метода измерений // Радиотехника. 1988. № 7. С. 92 – 93.
11. Баранов С.А., Щеглов Ю.А. Электропроводность водно-стружечных смесей // Электронная обработка материалов. 1983. № 6. С. 73 – 74.
12. Чебану В.Г., Баранов С.А., Щеглов Ю.А. Роль клеточных структур в определении электропроводности растительной ткани // Электронная обработка материалов. 1983. № 5. С. 77 – 79.
13. Материалы магнитомягкие высокочастотные (методы испытаний в диапазоне частот от 20 до 2000 МГц) ГОСТ 12637-67. М., 1967.
14. Поглотители электромагнитных волн для экранирования камер. ГОСТ Р500 11. 1992. С. 1 – 15.

Поступила 07.10.02

Summary

Special absorbing screens and coverings made of microwire-based composite materials can serve as effective protection of data processing and data transfer devices from undesirable electromagnetic radiation. There are some significant achievements in the area of manufacturing of microwires based on various metals, alloys. Due to discovery of some special microwire properties such as natural ferromagnetic resonance the magnetic materials-based microwires are of great interest at the time being. In case of microwire, natural ferromagnetic resonance becomes apparent by abnormal absorption of electromagnetic wave energy and is caused by interaction of substance and electromagnetic radiation field. Phenomenon of electromagnetic radiation absorption has been investigated in a wide range of frequencies, up to 12 GHz. Depending on microwire strand material composition absorption characteristics of desirable frequency range and frequency bands, starting from unities GHz, can be achieved. Propagation of electromagnetic wave through an absorbing screen with microwire-based absorption elements can be characterized by propagation, reflection and absorption factor ~ 20 dB.

ИНФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА-СЕМИНАР В ОБЛАСТИ ПРИКЛАДНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ «ПЕТРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ»

Очередное заседание Международной школы-семинара в области прикладной электрохимии и электрических методов обработки материалов «Петровские чтения» состоялось 13 мая 2003 года в Институте прикладной физики АН РМ и было посвящено теме «Физико-химические методы модифицирования поверхности и некоторые аспекты их использования».

В заседании приняли участие около 50 человек из различных научных, научно-технических отраслевых, государственных и негосударственных учреждений, а также вузов Молдовы и России.

Во вступительном слове руководителя семинара проф. А.И. Дикусара был сделан акцент на сегодняшнем уровне развития электрохимии и электрических методов обработки поверхности в Молдове, широких возможностях их развития, особенностях применения различных методов в настоящее время.

В докладе акад. АН РМ М.К. Бологи «Исследование процессов и разработка технологий электрической обработки материалов в Институте прикладной физики АН РМ (к шестидесятилетию открытия электроэрозионной обработки материалов)» подробно проанализированы: история открытия Б.Р. и Н.И. Лазаренко электроэрозионной обработки, современный уровень исследований и использования различных технологий, основанных на этом методе, в мире, странах СНГ и Молдове. Отмечены неосценимая роль Б.Р. Лазаренко в развитии технологий электрической обработки в АН РМ и Республике, создании Опытного завода ИПФ АН РМ и журнала «Электронная обработка материалов».

Активную дискуссию вызвал доклад В.И. Петренко (ИПФ АН РМ) «Электроника и электрохимия. Взаимное влияние и развитие. Наукометрический анализ мировых информационных потоков в области электрохимии за 1999 – 2002 годы». На базе сравнительного наукометрического анализа публикаций в журналах, анализируемых SCI по разделу «Электрохимия», и публикаций в журналах, анализируемых SCI по всем отраслям знания за эти годы, показаны существенные отличия в распределении вклада различных стран в мировой информационный процесс. Показано, что эти различия обусловлены современным уровнем развития электрохимии как науки, тесно связанной с развитием электронной промышленности.

Большой интерес вызвал доклад М.В. Иванова (Институт физической химии РАН, г. Москва) «Поверхностные свойства, структура и некоторые функциональные свойства химико-каталитических покрытий». В докладе представлен обзор современных методов получения химико-каталитических покрытий, их физико-механических и эксплуатационных свойств. В докладе А.И. Дикусара (ИПФ АН РМ) на основе наукометрического анализа публикаций в журналах, анализируемых SCI по разделу «Электрохимия» за 1999 – 2002 годы, показана роль молдавской электрохимической школы в мировом информационном процессе в области электрохимии.

Интерес вызвало сообщение В.П. Косова (Научно-исследовательская лаборатория по очистке сточных вод и получению покрытий, г. Кишинев) о нетрадиционном методе защиты поверхности металлов от коррозии в жидких агрессивных средах, при котором на границе раздела реализуются условия поддержания потенциала нулевого заряда.

В докладе О.О. Редкозубовой (ИПФ АН РМ) представлены материалы, свидетельствующие о повышении локализации химического травления при наличии изолирующих масок в условиях химико-электрохимического травления. Повышение локализации достигалось при использовании катодного тока определенной величины при химическом травлении малоуглеродистой стали и сплава инвар.

Доклад Т. Борцюя (ИПФ АН РМ) был посвящен разработке методов, обеспечивающих поддержание однородности состава и физико-механических свойств покрывающих слоев при получении электрохимических композиционных покрытий.

Живой интерес у слушателей вызвало информационное сообщение В.В. Ковалева (Молд. ГУ, г. Кишинев) о Всероссийской научно-практической конференции и выставке «Гальванотехника, обработка поверхности и экология в XXI веке. Современное состояние и перспективы развития» (22 – 25 апреля 2003 года, г. Москва). Был представлен обзор научных докладов, сделанных на конференции. Слушатели имели также возможность ознакомиться с различными рекламными материалами, представленными на выставке.

В заключительном слове руководителем проекта были подведены итоги работы семинара.

А.И. Дикусар