

Б.П. Саушкин

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В ЖИДКИХ И ГАЗОВЫХ СРЕДАХ – ОСНОВА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Российский государственный технологический университет (МАТИ-РГТУ),
Берниковская наб., 14, г. Москва, 109240, Россия*

Несмотря на то, что электроразрядные явления известны достаточно давно, их использование для технологических целей машиностроительного производства получило широкое распространение лишь во второй половине прошлого века в связи с открытием Б.Р. и Н.И. Лазаренко метода электроэрозионной обработки (ЭЭО) [1]. Это открытие оказало каталитическое воздействие на умы инженеров и исследователей и стимулировало появление множества теоретических и прикладных работ, направленных на всестороннее изучение и практическое применение различных видов электрических разрядов в технологиях машино- и приборостроения [2 – 6]. К настоящему времени разработаны многочисленные методы и способы целенаправленного воздействия на материал электрическими разрядами, которые можно классифицировать следующим образом:

- по технологическому (функциональному) назначению выделяют методы размерного формообразования и методы модификации свойств поверхностного слоя изделий;
- по агрегатному состоянию рабочей среды, в которой реализуется разряд, выделяют методы обработки, осуществляемые в жидкой, газообразной или аэрозольной средах. В зависимости от электрической проводимости жидкой среды различают методы, основанные на электрическом разряде в диэлектрике и проводящей среде (электролите);
- по виду применяемых электродов, между которыми реализуется разряд, можно указать две группы методов – с электродными системами “металл-металл” и “металл-электролит” соответственно;
- по величине плотности потока мощности (энергии), вводимой в рабочую зону. Например, электроэрозионную размерную обработку по этому признаку часто подразделяют на черновую, чистовую и доводочную;
- по характеру электрического разряда между электродами (искровой, тлеющий, искродуговой, дуговой);
- по характеру изменения объема заготовки в процессе формообразования различают методы аддитивные (нанесение материала), субтрактивные (удаление припуска) и совмещенные;
- по числу элементарных воздействий на поверхность изделия рассматривают собственно электроразрядные и комбинированные методы обработки.

Данная классификация иллюстрируется схемой (рис. 1).

Обсудим современное состояние и некоторые тенденции развития основных методов и способов обработки, представленных в данной схеме и получивших наибольшее промышленное распространение. Прежде всего, рассмотрим те, в основе которых лежит электрический разряд между металлическими электродами, помещенными в диэлектрическую среду. При определенных условиях такой разряд приводит к заметной эрозии металлических электродов, эффективное управление которой позволяет осуществить размерное формообразование.

Электроэрозионная обработка изделий

При наложении достаточно высокого напряжения от внешнего источника питания происходит электрический пробой межэлектродного промежутка (МЭП) с образованием канала разряда,

окруженного газовым пузырем [7]. При преобразовании электрической энергии в тепловую в зоне разряда формируется нестационарное поле температур, которое при определенных условиях приводит к образованию на поверхности электродов локальных областей расплавленного материала. Ниже расплава в теле электрода располагается область термического воздействия, которая характеризуется протеканием структурно-фазовых превращений и термомеханических явлений. Часть поверхностного материала испаряется с поверхности расплава или сублимируется. При удалении расплава из микрованны на поверхности электрода появляется эрозионная лунка, размеры которой зависят в первую очередь от энергии разряда. В результате разряда и сопутствующих явлений рабочая среда обогащается газопаровыми пузырьками, твердыми частицами удаленного из лунки материала электрода и продуктами термического разложения рабочей среды [8].

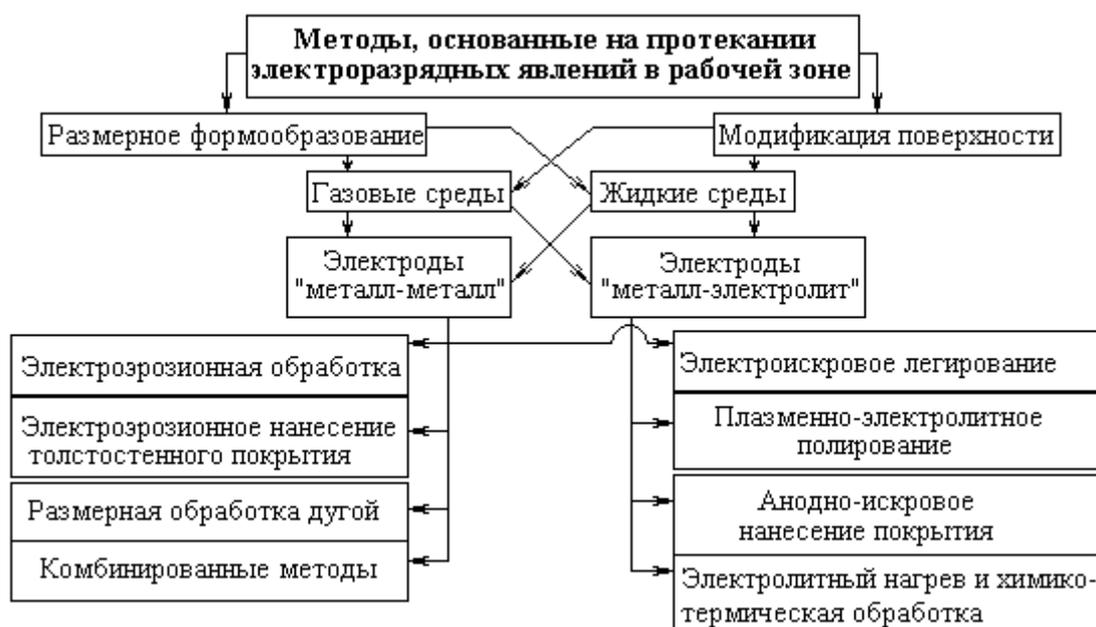


Рис.1. Классификация методов обработки, основанных на электроразрядных явлениях

Сказанное означает, что необходимым условием эрозии электродов является электрический пробой межэлектродного промежутка, который осуществляется при достижении некоторого значения напряжения на электродах, называемого напряжением пробоя $U_{пр}$, величина которого сильно зависит от размера МЭП и свойств рабочей среды. Пробой характеризуется образованием канала сплошной проводимости (канала разряда), резким падением напряжения и возрастанием тока. Послепробойные явления обычно подразделяют на две стадии. Искровая стадия разряда длительностью $t_{и.р.}$ порядка 10^{-7} с характеризуется звуковым, световым и тепловым эффектами. По завершении этой стадии канал разряда расширяется, плотность потока мощности снижается, напряжение и ток стабилизируются – начинается стадия дугового разряда, время протекания которой $t_{д.р.}$ определяется длительностью импульса напряжения, накладываемого на электроды.

При высокой частоте наложения импульсов напряжения единичные лунки многократно воспроизводятся на участке поверхности рассматриваемого электрода, расположенном наиболее близко к противозлектроду. Суперпозиция таких лунок приводит к удалению некоторого припуска с поверхности электрода, а локализация снимаемого припуска в области малых значений МЭП обуславливает размерный характер формообразования при поступательном сближении электродов [9].

Из сказанного следует, что электроэрозионная обработка материалов характеризуется совместным или последовательным осуществлением ряда физико-химических процессов, экспериментальное изучение которых представляет значительные трудности из-за их быстротечности, локализации в ограниченном и весьма малом объеме пространства, сложности точного измерения отдельных параметров. К числу основных процессов при осуществлении ЭЭО относятся [10]: энергетические процессы в канале разряда и на поверхности электродов, отражающие энергетический баланс; тепловые процессы на электродах; гидродинамические процессы в МЭП; термомеханические процессы на электродах.

Предложены различные методы описания таких процессов, базирующиеся на гипотезах и до-

пущениях, правомерность которых трудно однозначно обосновать экспериментальным путем. Несмотря на значительные успехи в этой области, отраженные, например, в монографиях [3, 11, 12], многие теоретические вопросы не имеют в настоящее время однозначного толкования, и теоретическое описание метода ЭЭО нельзя считать завершенным. Вместе с тем отдельные стороны процесса электрической эрозии электродов при ЭЭО подробно исследованы в ряде теоретических [10, 13 – 15] и прикладных [16 – 20] работ.

Все вышесказанное предопределяет необходимость использования в ряде случаев эмпирических и полуэмпирических зависимостей при разработке технологий ЭЭО и выдвигает на первый план задачу обобщения опыта промышленного освоения таких технологий [21 – 26]. Широкое распространение получили инженерные методики расчета параметров режима и оценки технологических результатов [9, 27, 28].

Современное состояние и технический уровень ЭЭО позволяют в настоящее время ставить и эффективно решать широкий круг технологических задач. Это стало возможным в результате формирования, быстрого развития и расширения рынка соответствующего технологического оборудования [29]. Вместе с тем считается общепризнанным наличие нереализованных технологических резервов ЭЭО [30 – 32]. Анализ данных показывает, что к числу важнейших проблем дальнейшего развития ЭЭО относятся следующие:

– *разработка технологических основ ЭЭО*, переход от эмпирических и полуэмпирических знаний к теоретическому описанию процесса [22, 33]. Так, в [21] справедливо замечено, что многие годы исследования в области ЭЭО ограничивались достаточно узким диапазоном режимных параметров, определяющих достижение максимальной производительности процесса. Такой подход, безусловно, затруднил теоретическое обобщение имеющихся экспериментальных результатов хотя бы потому, что в ряде практически важных задач производительность не является главным показателем эффективности технологии. Вместе с тем разработка методов и средств повышения производительности ЭЭО остается одним из основных условий сохранения и повышения конкурентоспособности электроэрозионной обработки [34, 35];

– *разработка методов и средств повышения точности и качества обработанной поверхности* как важнейшее условие применения ЭЭО в микромашиностроении [36 – 38]. К настоящему времени средствами ЭЭО удается надежно обрабатывать объекты с размерами порядка 10 мкм. Есть основания предполагать, что в обозримом будущем применение ЭЭО в этой области будет расширяться [39, 40];

– *повышение уровня автоматизации* как при технологической подготовке, так и при производстве изделий [41]. Применение современных адаптивных систем управления станками, повышение уровня надежности таких систем, создание высокоэффективной системы сервиса – все это обеспечивает переход к безлюдным и безбумажным технологиям в практике применения ЭЭО;

– *повышение технического уровня средств технологического оснащения*. Совершенствование конструкций станков для ЭЭО идет по пути их дальнейшей унификации, модульного принципа построения основных элементов, повышения геометрической и кинематической точности за счет применения новых конструкционных материалов, достижений в области мехатроники и линейных электрических машин [42, 43]. Кроме того, быстрое развитие элементной базы для сильноточной электроники раскрывает новые перспективы создания источников питания для эрозионных станков [44]. Есть основания предполагать, что значительные технологические резервы могут быть реализованы при разработке новых рабочих сред для ЭЭО [6, 45];

– *создание интегрированных технологических систем* на основе процессов электроэрозионной обработки. Такие системы могут создаваться путем модернизации металлообрабатывающих станков фрезерной, сверлильной и токарной групп за счет оснащения их рабочими органами и источниками питания для проведения ЭЭО. Создание гибких технологических модулей для осуществления операций физико-химической обработки и обработки резанием позволит, на наш взгляд, существенно повысить эффективность обработки многих деталей авиационно-космической техники [47];

– *разработка научных основ и соответствующих технологий защиты окружающей среды и безопасности жизнедеятельности* при выполнении электроэрозионных работ. В последние годы этому вопросу уделяется все больше внимания. Детально проанализирован состав, концентрация и токсикологическое действие продуктов разложения рабочих сред при осуществлении мощных электрических разрядов [48], установлено образование высокотоксичных веществ при электроэрозионной резке некоторых материалов [49], предложены эффективные способы очистки рабочей среды от токсичных загрязнений [50];

– расширение номенклатуры материалов, эффективно обрабатываемых данным методом [51]. Особый интерес представляют, на наш взгляд, работы, направленные на создание технологий электроэрозионной обработки перспективных керамических материалов [52];

– создание новых и совершенствование существующих комбинированных методов обработки на основе или с привлечением метода ЭЭО. Получили промышленное применение технологии электроконтактной, электроэрозионно-электрохимической, электроэрозионно-механической, электроэрозионно-ультразвуковой обработки материалов [6].

Таким образом, к настоящему времени электроэрозионная размерная обработка получила значительное теоретическое и прикладное развитие. Создано и совершенствуется современное технологическое оборудование, широко используются высокоэффективные технологические процессы как в основном [18, 53, 54], так и в инструментальном [55, 56] производстве.

Электроэрозионное наращивание и нанесение толстостенных покрытий

Применение электроэрозионных явлений для разработки аддитивных технологических процессов изучено недостаточно. В [26] показана возможность получения заданной формы путем осаждения материала на электроде при электроэрозионной обработке в жидкой среде. В [57 – 59] изучены процессы переноса материала при реализации разряда в воздушной среде и разработаны технологии электроэрозионного нанесения толстослойных покрытий (ЭЭНП) для восстановления деталей машин [60]. Установлена возможность наращивания слоев толщиной до 2 мм на сторону на стальные изделия, получения буртиков высотой до 10 – 15 мм с использованием пластинчатых, стальных электродов и восстановления материала в труднодоступных местах (щели, пазы, уступы) с помощью электрода-щеткой [61]. На основе проведенных исследований разработаны и апробированы технологии восстановления шеек коленчатых валов, шкворней, посадочных шеек крыльчаток и других деталей. Данные позволяют судить о том, что рассматриваемый процесс ЭЭНП обладает значительными резервами развития и широким спектром технологических возможностей. В последние годы вопросам технологии электроэрозионного нанесения толстослойных покрытий уделяется все большее внимание [62]. Разработана технологическая модель процесса нанесения толстослойных покрытий, которая может служить основой для дальнейшего углубления знаний об этом многообещающем способе восстановления и ремонта деталей машин.

Размерная обработка электрической дугой

Несомненный интерес представляют работы, связанные с исследованием и внедрением такого вида ЭЭО, как размерная обработка электрической дугой (РОД) [34, 63 – 66]. Теоретическое описание РОД базируется на анализе тех же основных процессов в МЭП, которые отмечались выше для эрозионной обработки электрическими импульсами. Основным процессом, определяющим съем материала при РОД, остается тепловыделение на электродах. Физические и технологические особенности обработки электрической дугой рассмотрены в [63, 66].

Обработка осуществляется электрической дугой, которая горит в поперечном потоке рабочей жидкости при динамическом давлении потока не менее 1 – 2 МПа. Такой поток не только интенсифицирует эвакуацию продуктов эрозии из МЭП, но и оказывает влияние на энергетическое состояние горячей дуги. В результате гидродинамические параметры потока являются эффективными средствами управления съемом материала в рассматриваемом случае. Высокая производительность достигается за счет введения большей мощности в МЭП, непрерывности процесса, возможности интенсивной эвакуации продуктов эрозии и охлаждения электродов. Все эти факторы позволили в несколько раз увеличить силу рабочего тока и достигнуть объемной производительности до 25 см³/мин, точности формообразования 0,05–0,1 мм, шероховатости поверхности $R_a = 2,5 - 10$ мкм и величины дефектного слоя не выше 0,02 – 0,05 мм. Для реализации этого вида обработки разработана гамма электроэрозионных станков серии “Дуга” (модификации 8, 11, 13, 18, 36). Показана технико-экономическая эффективность применения РОД по отношению к традиционной ЭЭО при изготовлении фасонных полостей ковочных штампов (скорость подачи повышается примерно в 8 раз), прошивке разнообразных отверстий в диапазоне поперечных размеров 10 – 150 мм, обработке наружных поверхностей и выполнении других операций.

Технологические процессы обработки короткой дугой разработаны и внедрены в производстве двигателей для изготовления крупногабаритных дисков, секторов лопаток сопловых аппаратов и корпусных деталей [65].

Электроэрозионно-электрохимическая обработка

Возможность осуществления в токопроводящей, жидкой среде, как электрохимического, так и электроэрозионного механизма разрушения материала породила идею пространственно-временного совмещения этих процессов в рамках единого комбинированного метода обработки. В связи с этим

уместно отметить, что Б.Р. Лазаренко неоднократно высказывал мысль о существовании фундаментальной общей теории, описывающей явления электролиза и электрического разряда в электролитах с единых позиций, на основе обобщенных физико-химических представлений [2, 67]. Физическая картина прохождения электрического тока через растворы электролитов предполагает, что при достаточно интенсивном вводе энергии вблизи поверхности металлического электрода образуется многофазная система “металл–плазма–газ–электролит”, энергоносителями в которой являются не только ионы, но и электроны, а разрушение металлического электрода происходит в результате как анодного растворения, так и электрических разрядов и сопутствующих им явлений.

Систематические исследования комбинированного метода электроэрозионно-электрохимической обработки (ЭЭХО), проведенные как в нашей стране, так и за рубежом [68 – 72], позволили разработать основы теории и технологии нового метода обработки, выявить область его эффективно-промышленного использования, спроектировать и внедрить конкретные высокоэффективные технологические процессы.

Несмотря на достаточно развитый аппарат физического и математического описания процесса, позволяющий обоснованно прогнозировать явления, протекающие в межэлектродном промежутке при ЭЭХО, до настоящего времени остаются неясными некоторые вопросы, характеризующие механизм разрушения материала. Так, нет однозначного мнения о природе развития разряда в газоэлектродном промежутке после пробоя тонкого газопарового слоя. Мало исследован вопрос об особенностях выброса металла в капельно-жидкой и паровой фазе и формировании лунки. Не обобщены и малочисленны сведения о взаимном влиянии электрохимических и электроразрядных процессов в специфических условиях ЭЭХО, которые приводят к синергизму съема материала. В этой связи необходимо отметить, что электрохимические процессы могут влиять на условия протекания разряда и последующее разрушение материала следующим образом: электродное газовыделение, формируя газожидкостные слои, облегчает вскипание электролитных мостиков и образование паровой фазы; пропускание через МЭП тока электролиза приводит к появлению поверхностных и объемного источников тепла, инициирующих процессы пузырькового и пленочного кипения жидкой фазы; поверхностные новообразования вносят свой вклад в баланс напряжения на МЭП, затрудняя, как это показано при обработке титанового сплава, искровой разряд; практически не изучено возможное влияние электрохимических процессов, протекающих на границе раздела фаз “газопаровая полость – электролит”, на формирование канала разряда, неясен механизм переноса заряда через эту границу;

Влияние электрических разрядов на протекание электродных процессов и процессов переноса проявляется преимущественно в следующем: гидродинамический эффект, сопутствующий разряду в жидкостях, способствует депассивации анодной поверхности в случае диффузионного контроля скорости анодного растворения, облегчает отвод продуктов реакций в объем раствора и эвакуацию их из рабочей зоны; тепловой эффект разряда способствует депассивации в случае диффузионного контроля скорости растворения, вызывает повышение локальной электропроводности раствора, влияет на скорость гомогенных и гетерогенных химических реакций; сказанное выше может приводить не только к возрастанию тока электролиза, но и к перераспределению скоростей электродных реакций с соответствующим изменением выхода по току основной реакции и степени окисления ионов металла, переходящих в раствор.

К настоящему времени накоплен значительный опыт по созданию и эксплуатации средств технологического оснащения для ЭЭХО [71]. Так, на предприятиях авиадвигателестроения используются модернизированные электрохимические копировально-прошивочные станки моделей ЭКУ-150, ЭКУ-400, ЭГС-2. Специальные станки для ЭЭХО создавались для обработки элементов камеры сгорания, прошивки смазочных отверстий в кольцах подшипников, резки каркасов фильтроэлементов, перфорации тонкостенных обечаек и других деталей.

В качестве источников питания применялись серийные генераторы импульсов МГИ-3, ТГ-250-015, ШГИ-125-100. Нашли применение источники питания, содержащие низковольтный выпрямитель и генератор импульсов, подключенные параллельно к МЭП. Получили распространение специальные генераторы импульсов для ЭЭХО. В последнее время значительный интерес к разработке широкодиапазонных источников питания для ЭЭХО проявляется за рубежом. Так, в [73, 74] отмечается, что применение специального ИП позволяет повысить гибкость технологической системы, надежность ее функционирования, снизить затраты на оборудование, достигнуть более высокие технологические показатели обработки.

Наиболее эффективное промышленное применение метод ЭЭХО нашел в операциях прошивки отверстий диаметром 0,5 – 5 мм с отношением длины к диаметру менее 10. Установлено, что в этом случае удается в 5 – 10 раз повысить производительность обработки по отношению к ЭХО и

ЭЭО, достигнуть скорости подачи до 300 мм/мин, получить поверхности без дефектного слоя с шероховатостью $R_a = 0,63 - 1,25$ мкм. Кроме основной кинематической схемы с поступательным движением электрода-инструмента используются схемы, в которых он совершает дополнительные движения: вращается вокруг собственной оси или вибрирует в осевом направлении. При необходимости одновременной прошивки группы отверстий применяют многоэлектродную, многоконтурную обработку и их комбинации.

Отметим, что, несмотря на очевидную многофункциональность рабочих сред для ЭЭХО, теоретический подход к их синтезу или выбору к настоящему времени отсутствует. На практике используются, как правило, простейшие однокомпонентные водные растворы минеральных солей различной концентрации.

Обработка вращающимся инструментом успешно применяется для изготовления поверхностей вращения, элементов сложного профиля, плоскостей, прорезки пазов и разрезания. Три основные особенности отличают этот вид обработки от прошивки отверстий, рассмотренной выше. Во-первых, обработка может осуществляться с применением как импульсного генератора, так и источника постоянного напряжения из-за коммутационного эффекта, обусловленного вращением инструмента. Во-вторых, нет необходимости в использовании специальной системы прокачки рабочей жидкости: электролит подается поливом или обработка осуществляется под слоем электролита. В третьих, быстрое относительное перемещение электродов существенно влияет на поведение разрядного канала и, следовательно, на величину и характер эрозионного съема [75 – 77].

Значительный технологический интерес представляет вопрос о комбинированной обработке протяженных поверхностей. Это связано с тем, что, как и при ЭЭО, технологические показатели ЭЭХО должны существенно зависеть от площади обрабатываемой поверхности и геометрических параметров гидравлического тракта. Кроме того, конвективный фактор приводит к изменению как локальных условий электролиза, так и предпробойной ситуации в окрестностях различных точек обрабатываемой поверхности. Экспериментальные данные позволяют заключить следующее [78]: совмещенная обработка протяженных поверхностей в проточных каналах в общем случае приводит к выделению областей ЭХО и ЭЭХО с соответствующим механизмом съема материала в них; протяженность указанных областей сильно зависит от гидродинамических параметров режима обработки, формы и параметров импульса напряжения. При прочих равных условиях за счет гидродинамического параметра управления процессом можно обеспечить обработку практически всей поверхности в режиме ЭХО или ЭЭХО.

Установлено, что ЭЭХО может при определенных условиях успешно использоваться для обработки непроводящих материалов. Так, в [79] представлены данные по обработке различных видов керамики проволочным электродом-инструментом. Механизм разрушения непроводящих материалов при совместном протекании на их поверхности электрохимических и электроразрядных процессов к настоящему времени однозначно не определен. Однако можно предположить, что наблюдаемый эффект связан с разрушением поверхностных слоев материала из-за высоких градиентов температур и давлений в окрестностях разряда. Рост газовой и паровой фазы в порах керамики также создает высокие напряжения, способные, по-видимому, разрушать хрупкий материал.

Электроискровое легирование

Этот метод модификации свойств поверхностного слоя основан на искровом пробое газового промежутка между металлической поверхностью и электродом-инструментом, который сопровождается переносом материала электрода и включением его в качестве легирующего элемента или самостоятельной фазы в формируемый в условиях фазовых превращений в микрообъеме материала поверхностный слой детали [80]. Перенос материала происходит путем перемещения расплавленных микромасс через канал разряда. Очевидно, количество материала, переносимого за один разрядный импульс, очень мало. Так, для твердого сплава Т15К6 при энергии разряда 1 Дж прирост массы катода составляет $(2 - 3) \cdot 10^{-6}$ г. Поэтому для формирования слоя требуемой толщины на значительной площади поверхности детали необходимо пропускание большого количества разрядов, сканирование электрода-инструмента и осуществление операции ЭИЛ в несколько проходов. В результате теплового эффекта электрического разряда в поверхностном слое детали протекают структурно-фазовые превращения [81], образуются химические соединения, интерметаллиды, твердые растворы. В связи с тем, что кристаллизация расплава и массоперенос происходят в сильно неравновесных условиях, в поверхностном слое образуются мелкокристаллические структуры и пересыщенные твердые растворы, что приводит к формированию специфических эксплуатационных свойств модифицированных поверхностей.

Использование различных электродных материалов и широкий диапазон изменения параметров режима обработки (энергия, длительность и частота разрядов, форма импульса, кинематические параметры взаимного перемещения электродов, число проходов) обеспечивают возможность изменения свойств поверхности в широких пределах. В результате этим методом получают твердые, износостойкие, жаропрочные, коррозионностойкие, антифрикционные и декоративные покрытия.

К достоинствам метода относят простоту его реализации, низкую стоимость оборудования, прочную связь модифицированного слоя с подложкой, отсутствие необходимости в специальной подготовке поверхности перед обработкой. Наряду с достоинствами ЭИЛ имеет недостатки: относительно низкая производительность (до 20 см²/мин), высокая шероховатость поверхности ($R_z > 20$ мкм), формирование растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое.

Ряд исследований, выполненных в последние годы, позволяет судить о том, что метод ЭИЛ далеко не исчерпал свои технологические возможности. Так, в [82] рассмотрен перспективный путь интенсификации ЭИЛ за счет разработки и использования новых устройств для возбуждения искровых разрядов. В работах [83, 84] приведены расчетные зависимости, на основе которых предложена инженерная методика выбора параметров режима ЭИЛ по условию достижения покрытия заданной толщины. Установлено сильное влияние амплитудно-временных характеристик энерговыделения на протекание эрозионных процессов в условиях малого межэлектродного зазора [85], показано, что при ЭИЛ поверхности изоэнергетическими импульсами динамика переноса материала в значительной степени определяется формой импульса, отмечено отсутствие аддитивности съема в процессе эрозии анода [86].

Технологическое применение электроразрядных явлений в системе “металл-электролит”

При повышении напряжения в электрохимической ячейке, содержащей раствор сильного электролита, у анода возникает ряд эффектов*, которые удобно рассматривать, располагая их по шкале напряжений. На вольт-амперной характеристике ячейки (рис. 2) участок напряжений ОА соответствует классическому электрохимическому процессу. Заметим, что электролиз в этой области сопровождается некоторым нагревом анодной поверхности. Начиная с точки А вольт-амперная характеристика (ВАХ) становится нелинейной в тем большей степени, чем выше приложенное напряжение. Это обусловлено интенсивным электродным газовыделением, приводящим к формированию приэлектродного газожидкостного слоя, нелинейное сопротивление которого начинает определять характер нагрузки электрической цепи.

По мере повышения напряжения плотность упаковки газовых пузырьков в приэлектродном газожидкостном слое возрастает, и суммарная площадь поперечного сечения электролитных мостиков между ними уменьшается. В результате Джоулева тепловыделения температура электролита в этих мостиках достигает температуры кипения, образуется система “жидкость–газ–пар”. На ВАХ в точке В наблюдается максимум, которому соответствуют значения тока и напряжения, называемые обычно критическими – $I_{кр}$, $U_{кр}$. Дальнейшее повышение напряжения сопровождается уменьшением величины тока в цепи из-за формирования сплошного газопарового слоя. Очевидно, на участке ВС сплошность и устойчивость этого слоя возрастают, а его электропроводные свойства снижаются. При достижении напряжения U_C начинаются пульсации тока, причиной которых, по-видимому, является периодическое образование и разрушение сплошной газопаровой пленки. Действительно, при напряжении U_C напряженность электрического поля в такой пленке достигает критических значений и происходит ее пробой в результате искрового разряда. Последний реализуется в данном случае между металлическим и электролитным электродами и сопровождается характерным свечением [87]. Однако газопаровая оболочка быстро восстанавливается ($\approx 10^{-4}$ с) и запирает ток. Заметим, учитывая вероятностную природу разряда, что положение точки С на рассматриваемой кривой достаточно условно.

В точке D в связи с переходом от пузырькового режима кипения к пленочному образуется стационарная парогазовая оболочка, в которой реализуется тлеющий разряд. Температура поверхности электрода резко повышается до значений 400°С и выше и в дальнейшем растет с увеличением напряжения, достигая около 1000°С.

Дальнейшее увеличение напряжения на электродах приводит к установлению такого режима анодного процесса, при котором развиваются электрогидродинамические явления в электролите, а электрические разряды в газопаровой фазе носят иной характер. В этой области ВАХ наблюдается скачкообразное снижение температуры анода до значений 100 – 200°С. Начиная с точки F, электрическое сопротивление МЭП растет, а ток падает.

* Предполагается, что площадь поверхности анода значительно меньше площади катода.

Парогазовая оболочка, формирование которой завершается в точке D , имеет по сравнению с раствором электролита и металлическими электродами наибольшее сопротивление и является, поэтому основным источником тепла в системе. При этом температура анода T_a определяется величиной напряжения.

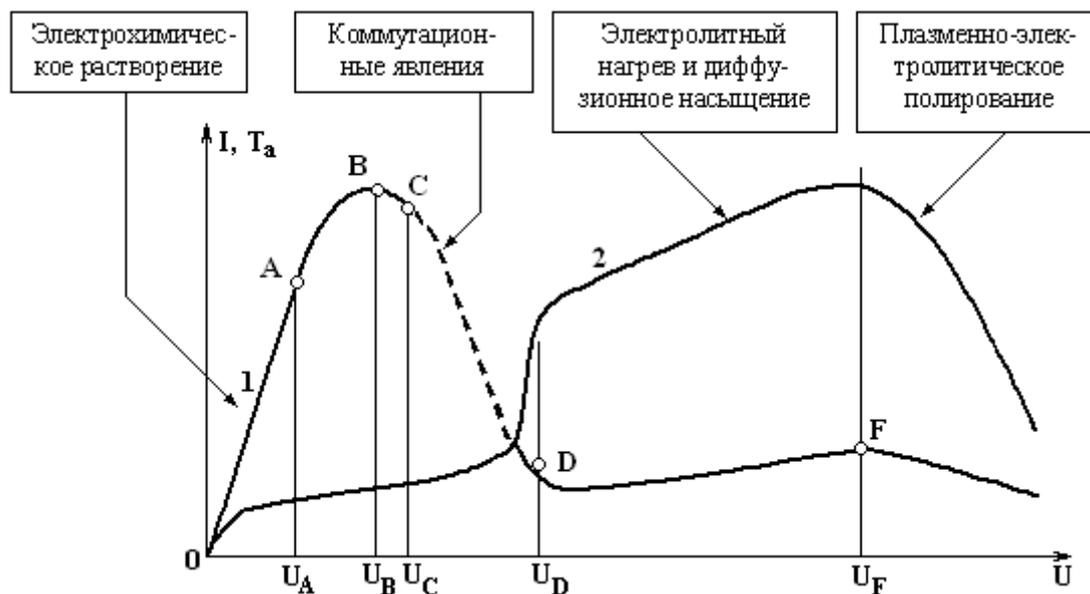


Рис. 2. Зависимости тока (1) и температуры анодной поверхности (2) от напряжения на электродах ячейки

Электролитный нагрев и химико-термическая обработка

Ввиду того, что основные источники тепла сосредоточены в парогазовой оболочке, она является «нагревательным элементом», окружающим деталь. Малая инерционность этого элемента, связанная с небольшой толщиной оболочки (10^{-5} м), обеспечивает скорости нагрева до 100 град/с и возможность оперативного изменения температуры за счет регулирования величины приложенного напряжения. Зависимость температуры детали от напряжения в практически важном диапазоне близка к линейной и определяется размерами детали, а также гидродинамикой и электропроводностью раствора. Таким образом, при нагреве детали-анода и последующем ее охлаждении после выключения тока можно осуществлять с учетом достигаемых при этом температур эффективную термическую обработку поверхностного слоя [88]. Более того, при соответствующем выборе ионного состава раствора удастся осуществлять диффузионное насыщение этого слоя теми либо иными элементами [89].

Сравнивая прогрессивные технологии диффузионного насыщения и термической обработки на основе лазерного, электроннолучевого, индукционного или плазменного нагрева, заметим, что наряду со значительными достижениями эти методы имеют определенные ограничения и недостатки. К ним относятся трудности обработки детали сложной формы, необходимость предварительной подготовки поверхности изделий, высокая стоимость технологического оборудования. Ускорение термического и химико-термического нагрева с возможностью локальной обработки деталей, в том числе и сложной формы, может быть достигнуто применением анодного нагрева в водных растворах электролитов. Известны разнообразные составы для насыщения сталей серой, азотом, углеродом, бором, кремнием, молибденом и другими элементами. В качестве рабочих сред в рассматриваемом процессе в основном применяются водные растворы солей и щелочей с концентрациями, обеспечивающими достаточную электропроводность. Например, установлено, что при химико-термической обработке сталей наибольшая микротвердость и износостойкость достигаются электролитным борированием при напряжении на электродах 225 В (при этом $T_a = 1250^\circ\text{C}$) и времени обработки 700 – 900 с. Обработка по такому режиму позволяет увеличить микротвердость поверхности и срок службы деталей в 2 – 5 раз по сравнению со стандартной термообработкой [31].

Интенсификация диффузионного насыщения при электролитном нагреве обусловлена как быстрым достижением стационарного состояния за счет высокой скорости разогрева, так и возникновением дислокаций, вакансий и других дефектов кристаллической решетки вследствие бомбардировки поверхности ионами.

Таким образом, видно, что целый комплекс физико-химических процессов, происходящих при анодном электролитном нагреве, влияет на формирование различных параметров качества поверхностного слоя, благодаря чему этот процесс при оптимальном выборе режима обработки и состава электролита может обеспечить следующие технологические результаты: эффективное упрочнение поверхностного слоя толщиной до 0,2 мм (микротвердость возрастает в 2 – 5 раз); повышение износостойкости в 2 – 4 раза; повышение антифрикционных свойств поверхности (коэффициент трения пары “сталь–сталь” снижается до 0,1 – 0,15); снижение шероховатости поверхности в 2 – 6 раз; нанесение защитно-декоративных оксидных покрытий толщиной 2 – 8 мкм.

Плазменно-электролитическое полирование

При определенных условиях в присутствии парогазовой пленки наблюдается эффект полирования поверхности металлического электрода-анода [92]. Процесс сглаживания микрорельефа обычно осуществляется в растворах минеральных солей при напряжении 250 – 350 В и средней плотности тока 0,2 – 0,5 А/см². Установлено, что данный процесс протекает в условиях тлеющего разряда между металлическим и электролитным электродами [93]. Особенностью режима ПЭП является то, что доля выделяющейся энергии, отводимой в виде тепла в металлический электрод, невелика, и электрод нагревается незначительно. Обычно процесс проводят при температуре электролита 60 – 90°С.

К настоящему времени нет единого мнения о механизме сглаживания микронеровностей при ПЭП. Есть основания считать, что эффект полирования вызывается суперпозицией нескольких различных процессов: наличие электролитных мостиков в парогазовой оболочке приводит к выравниванию микронеровностей по электрохимическому механизму. Образование и разрушение таких мостиков носит стохастический характер и приводит к некоторой усредненной компоненте полирования по рассматриваемому механизму. Анодное выделение кислорода инициирует образование на поверхности металла тонкой оксидной пленки, приводящей к неравномерному анодному растворению выступов и впадин микрорельефа. Однако выход по току в условиях ПЭП значительно ниже, чем в классических условиях электрохимического растворения, по-видимому, из-за того, что доля ионного тока составляет лишь часть полного тока через парогазовую оболочку. В [94] отмечается, что электрохимический механизм не является определяющим, а результат ПЭП не описывается законами Фарадея; образование химически активных частиц и протекание плазмохимических реакций также рассматриваются среди причин эффекта полирования. На основании имеющихся данных трудно однозначно судить о том, каким образом реакции данного типа приводят к выравниванию микрогеометрии поверхности. Можно предположить, что существенную роль играют процессы переноса активных частиц к поверхности металлического электрода, обуславливающие преимущественное разрушение микровыступов; нельзя исключать разрушение микровыступов по электроэрозионному механизму в результате прохождения маломощных искровых разрядов между металлическим и электролитным электродами.

Несмотря на недостаточную изученность, процессы ПЭП получили распространение благодаря своей простоте и использованию несложного технологического оборудования.

Заметим, что специфика процессов, описанных выше и протекающих вблизи активного электрода, обуславливает комплексное воздействие различных факторов на поверхность этого электрода, которое может быть использовано для очистки поверхности. При этом механизм удаления загрязнений связан с анодным газовыделением. Вскипание электролита у анода способствует “размягчению” загрязнений и ослаблению их сцепления с подложкой. Кавитационные и электроэрозионные явления вблизи обрабатываемой поверхности также ускоряют процесс очистки. Подобные процессы позволяют удалять не только различные загрязнения, но и некоторые покрытия [95].

Анодно-искровое нанесение покрытий

Данный метод обеспечивает возможность получения оксидных, алюмосиликатных и других неорганических, функциональных покрытий в результате совместного протекания процессов электрохимической формовки анодной пленки и модификации ее свойств электрическими разрядами [96]. Искровые электрические разряды реализуются в системе “металл–оксид, металла–электролит” при достаточно высоких напряжениях. Они оказывают сильное тепловое воздействие на материал оксида и термически интенсифицируют электрохимические процессы роста оксидной пленки в окрестностях разряда. При правильном выборе рабочей среды-электролита и электрических параметров режима на поверхности изделия формируются покрытия, обладающие ценными эксплуатационными свойствами, такими как жаропрочность, высокие диэлектрические свойства, износостойкость и коррозионная стойкость [97].

В заключение отметим некоторые тенденции в развитии комбинированных методов воздействия на поверхность изделия с использованием электроразрядных явлений, наметившиеся в последние годы.

Во-первых, интенсивно развиваются интегрированные технологии модификации свойств ПС за счет последовательного осуществления различных по своей физической сущности методов воздействия на поверхность изделия [98]. Так, например, исследованы интегрированные технологии следующих видов:

- электроискровое легирование – лазерная обработка,
- электроискровое легирование – поверхностно-пластическое деформирование,
- электроискровое легирование – алмазное шлифование – алмазное выглаживание,
- микродуговое оксидирование – лазерная обработка.

Во-вторых, значительный интерес проявляется к технологиям комбинированного воздействия на объект обработки, основанных на пространственно-временном совмещении электроразрядных и иных физико-химических процессов с целью достижения суперрадикального технологического эффекта [99].

В-третьих, получили развитие многофункциональные процессы, позволяющие в рамках одной операции заданным образом изменить два и более показателей качества поверхностного слоя изделий. Так, например, за счет изменения параметров режима удается в несколько переходов на одном оборудовании осуществлять электролитную очистку или обезжиривание поверхности, ее электролитный нагрев, полировку и снятие заусенцев [100]. Такого рода технологии позволяют существенно улучшить комплекс свойств, определяющих качество поверхностного слоя деталей машин.

Таким образом, технология машиностроения располагает большой постоянно расширяющейся группой методов, способов обработки и технологий на их основе, базирующихся на интенсивных физических и химических процессах в зоне электрического разряда и способных решать разнообразные задачи технологического обеспечения качества машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электрическая эрозия металлов. М.; Л., 1944.
2. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Прохождение электрического тока через электролиты // Электронная обработка материалов. 1978. № 1. С. 5 – 9.
3. Намитоков К.К. Электроэрозионные явления. М., 1978.
4. Гайсин Ф.М., Сон Э.Е. Электрофизические процессы в разрядах с твердыми и жидкими диэлектриками. Свердловск, 1989.
5. Дураджи В.Н., Парсадян А.С. Нагрев металлов в электролитной плазме. Кишинев, 1988.
6. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей / Под ред. Б.П. Саушкина. М., 2002.
7. Золотых Б.Н., Мальдер Р.Р. Физические основы ЭЭО. М., 1977.
8. Zolotykh B.N. Modern physical Theory of Metals Electric Erosion as the Basis for the Development of New Trends in EDM // Proc. Intern. Symp. Electromach. (ISEM-XI) Switzerland, Lausanne. 1995. P. 114 – 116.
9. Электроэрозионная и электрохимическая обработка. Расчет, проектирование, изготовление электродов-инструментов. Часть 1. Электроэрозионная обработка / Под ред. А.Л. Лившица и А. Роша. М., 1980.
10. Золотых Б.Н. Основные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде. Автореф. дис. докт. техн. наук. М., 1967.
11. Мицкевич М. К., Бушин А. И., Бакуто И. А. и др. Электроэрозионная обработка материалов / Под ред. И. Г. Некрашевича. Минск, 1988.
12. Артамонов Б.А., Волков Ю. С. Анализ моделей процессов электрохимической и электроэрозионной обработки. Ч. II. Модели процессов электроэрозионной обработки. Проволочная вырезка. М., 1991.
13. Золотых Б.Н. Методы расчета технологических параметров электроэрозионной обработки. М., 1999.
14. Баронец П.Н. Тепловая волна в искровом разряде // Электронная обработка материалов. 1994. № 3. С. 15 – 17.
15. Фотеев Н.К., Спришевская И.А. Расчет температурных полей в поверхностном слое детали, обрабатываемой электроэрозионным способом // Там же. 1991. № 2. С. 9–11.

16. *Фотеев Н.К.* Управление качеством технологической оснастки при электроэрозионной обработке // Там же. 1994. № 2. С. 3–7.
17. *Фотеев Н.К.* Особенности поверхностей, обработанных электроэрозионным способом // Там же. 1979. № 6. С. 5–8.
18. *Саушкин Б.П., Дорофеев И.А.* Обработка охлаждающих каналов в лопатках ГТД электроэрозионным методом // Перспективные технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов. Уфа, 2001. С. 160–162.
19. *Postanogov V.H., Komin V.F.* Electrochemical and Electrophysical Processing Technologies of Special Parts and their Conversion // Proc. Intern. Symp. Electromachining (ISEM-X). Germany, 1992. P. 486 – 492.
20. *Мицкевич М.К., Бушик А.И., Демидович А.А.* Модель процесса электроэрозионной обработки с орбитально-движущимся электродом // Электронная обработка материалов. 1994. № 2. С. 7 – 9.
21. *Золотых Б.Н.* 50 лет электроэрозионной обработке материалов: пройденный путь и перспективы дальнейшего прогресса // Там же. 1994. № 1. С. 4 – 7.
22. *Золотых Б.Н., Постаногов В.Х., Батьков А.А.* Электроэрозионная обработка – основа создания уникальных деталей летательных аппаратов // Там же. 2000. № 5. С. 4 – 15.
23. *Ставицкий Б.И.* Основные этапы, современное состояние и перспективы развития электроискровой обработки материалов // Там же. 1994. № 1. С. 7–11.
24. *Ставицкий Б.И.* Электроискровая обработка материалов – способ Лазаренко на рубеже столетий // Там же. 2000. № 5. С. 25–40.
25. *Золотых Б.Н.* Методы расчета технологических параметров электроэрозионной обработки. М., 1999.
26. *Kobayashi K.* The Present and Future Developments of EDM and ECM // Proc. Intern. Symp. Electromachining (ISEM-XI). Switzerland, 1995. P. 29–48.
27. *Золотых Б.Н., Любченко Б.М.* Инженерная методика расчета технологических параметров ЭЭО. М., 1981.
28. *Мицкевич М.К.* Применение принципа “технологической пары” при изготовлении сопрягаемых деталей разделительных штампов // Электронная обработка материалов. 1994. № 1. С. 26–29.
29. *Ставицкий Б.И.* Прецизионное электроискровое оборудование для изготовления деталей изделий электронной техники // Там же. 2001. № 2. С. 62–77.
30. *Коваленко В.С.* Нетрадиционные методы обработки материалов в Японии // Там же. 2000. № 3. С. 4 – 12.
31. *Коваленко В.С.* Машиностроение в новом тысячелетии // Там же. 2001. № 3. С. 60 – 68.
32. *Ставицкий Б.И.* Электроискровая прецизионная обработка материалов. Научные основы особо точных методов формообразования поверхностей // Там же. 2002. № 1. С. 5–32.
33. *Ставицкий Б.И.* Электроискровая прецизионная обработка материалов. Научные основы особо точных методов формообразования поверхностей // Там же. 2002. № 1. С. 5–32.
34. *Носуленко В.И., Боков В.М., Лебедев Ю.В.* Перспективы и области рационального применения размерной обработки материалов электрической дугой // Там же. 1993. № 6. С. 16 – 18.
35. *Zolotykh B.N., Postanogov V.K., Vatkov A.A.* Calculation of EDM technological parameters for materials of space engineering // Proc. Intern. Symp. Electrical Machining. Bilbao, Spain. 2001. P. 391 – 404.
36. *Любимов В.В., Сундуков В.К., Генералов А.В.* Изготовление микрообъектов методом электроэрозионного вырезания // Перспективные технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов. Уфа, УГАТУ. 2001. С. 177–182.
37. *Fujino M., Okamoto N., Masuzawa T.* Development of Multi-Purpose Microprocessing Machine // Proc. Intern. Symp. Electrical Machining. Lausanne, Switzerland. 1995. P. 613–620.
38. *Klocke F., Lung D., Nothe T.* Micro contouring by EDM with fine wires // Proc. Intern. Symp. Electrical machining. Bilbao, Spain, 2001.
39. *Masuzawa T.* Micro-EDM // Proc. Intern. Symp. Electrical Mach. Bilbao, Spain, 2001.
40. *Koch O., Ehrfeld W., Michel F.* Recent progress in micro-electro discharge machining. Part 1: Technology // Proc. Intern. Symp. Electrical machining. Bilbao, Spain, 2001. P. 117–127.
41. *Behrens A., Ginzl J.* An open numerical control architecture for EDM // Proc. Intern. Symp. Electrical Machining. Bilbao, Spain, 2001. P. 161–170.
42. *Kocher M., Guglielmetti P.* Modelling and simulation of an EDM die sinking machine // Proc. Intern. Symp. Electrical Mach. Lausanne, Switzerland, 1995. P. 105–113.
43. *Кохановская Т. С.* К вопросу о линейном сервоприводе // ИТО. 2000. № 3. С. 42 – 43.

44. *Obara H., Ohshumi T., Hatano M.* Development of twin-type resistorless power supply for electrical discharge machining // Proc. Intern. Symp. Electrical Machining. Bilbao, Spain, 2001. Н. 153–160.
45. High Performance EDM Fluids // Modern Mach. Shop, 2000. № 3. P. 238.
46. *Ставицкий Б.И.* Условия, обеспечивающие электроискровое прецизионное изготовление деталей в обычной воде // Электронная обработка материалов. 2002. № 2. С. 5 – 11.
47. *Апрощенко В.В., Ганцев Р.Х., Гильметдинов М.Х. и др.* Комплекс электрооборудования для интегрированных технологических процессов электрообработки // Перспективные технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов. Уфа, 2001. С. 150–156.
48. *Evetz S., Eisentraeger A., Dott W.* Environmental and industrial hygiene in connection with EDM at high discharge energies // Proc. Intern. Symp. Electrical Machining. Bilbao, Spain, 2001. P. 193 – 210.
49. *Петренко В.И., Молин А.Н., Дукусар А.И. и др.* Состав продуктов электроэрозионной резки полупроводниковых материалов // Электронная обработка материалов. 1993. № 1. С. 4 – 7.
50. *Петренко В.И., Молин А.Н., Салтановская Л.В. и др.* Очистка отработанной воды после электроэрозионной резки полупроводниковых материалов // Там же. 1993. № 2. С. 3–8.
51. *Cabanes I., Maidagan X., Sanchez J.A. and others.* Electro discharge machining of boron carbide industrial components // Proc. Intern. Symp. Electrical Machining. Bilbao, Spain, 2001.
52. *Tani T., Fukuzawa Y., Mohu N.* Machining phenomena in EDM of insulating ceramics using powder suspended working oil // Ibidem. P. 359 – 362.
53. *Елисеев Ю.С., Трошин А.Н.* Электроэрозионная обработка отверстий малого диаметра // Авиационная промышленность. 2001. № 1. С. 15 – 19.
54. *Алтынбаев А.К.* Электроэрозионная струйная обработка глубоких отверстий малого диаметра в деталях газотурбинных двигателей // Тез. докл ВНТК “Новые материалы и технологии”. М., 2001.
55. *Мицкевич М.К.* Использование электроэрозионной обработки в инструментальном производстве // Электронная обработка материалов. 1993. № 6. С. 8 – 12.
56. *Кравец А.Т.* Работы по созданию автоматизированного производства штампов и пресс-форм // Там же. 1994. № 1. С. 19 – 22.
57. *Юриков Ю.В., Саушкин Б.П.* Исследование электроэрозионного нанесения функциональных покрытий на детали машин / Справочник: Инженерный журнал. 2001. № 3. С. 28.
58. *Юриков Ю.В., Саушкин Б.П.* Моделирование процесса электроэрозионного нанесения толстослойных покрытий // Металлообработка. 2001. № 4. С. 21 – 25.
59. *Юриков Ю.В., Саушкин Б.П., Сычков Г.А., Быков Е.В.* Технологическая модель процесса электроэрозионного нанесения толстослойных покрытий // Перспективные технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов. Уфа, 2001. С. 169–176.
60. *Лобзин А.В., Гитлевич А.Е., Юриков Ю.В.* Опыт внедрения технологии электроэрозионного восстановления // Современная электротехнология в машиностроении: Сборник трудов Всерос. научн-техн. конф. Тула, 1997. С. 253–255.
61. *Юриков Ю.В.* Повышение эффективности электроэрозионного восстановления шеек валов. Автореф. дис. канд. техн. наук. Воронеж, 2000.
62. *Goto A., Moro T. Matsukawa K.* Development of ED coating method // Proc. Intern. Symp. Electrical Machining // Bilbao, Spain, 2001. P. 573–588.
63. *Носуленко В.И.* Размерная обработка металлов электрической дугой. Автореф. дисс. докт. техн. наук. Кировоград. 1998.
64. *Боков В.М.* Технологические особенности формообразования электрической дугой рабочих поверхностей пуансонов сложного профиля // Электронная обработка материалов. 1997. № 3 – 4. С. 14 – 17.
65. *Великий В.И., Рябов К.И.* Электроэрозионная обработка короткой дугой крупногабаритных деталей // Технология авиационного двигателестроения. Вып. 1. М., 1990. С. 5557.
66. *Боков В.М., Маркашова Л.И.* Физический механизм малоизносной размерной обработки дугой // Электронная обработка материалов. 2002. № 4. С. 3 – 14.
67. *Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И.* Процессы, возникающие на электродах при прохождении электрического тока через электролит // Там же. 1966. № 1. С. 5–9.
68. *Мороз И.И., Исакова Р.Б.* Технология и оборудование для электроэрозионно-химической обработки. М., 1985.

69. Журавский А.К. К вопросу определения области целесообразного применения комбинированного электроэрозионно-электрохимического метода обработки материалов // Материалы ВНТК. “Электрохимическая размерная обработка материалов”. Тула, 1986. С. 30–32.
70. Зайцев А.Н. Электроэрозионно-химическая прошивка отверстий малого диаметра в деталях из высокопрочных сталей и сплавов. М., 1991.
71. Такунцов К.В., Зайцев А.Н. Электроэрозионно-электрохимическая обработка: современное состояние, проблемы, перспективы // Перспективные технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов. Уфа, 2001. С. 9–13.
72. Crichton J.N., McGeough J.A. Studies of the Discharge Machining in Electrochemical arc Machining // J. Applied Electrochem. 1985. V.15. № 1. P. 113 – 119.
73. Wollenberg G., Schulze H., Timm M., Pape T. Simulation of EDM Installations // Proc. Intern. Symp. Electromachining (ISEM-XI), Lausanne, Switzerland, 1995. P. 153–162.
74. Wollenberg G., Schulze H., Lauter M. Process Energy Supply for Uncon-ventional Machining // Proc. Intern. Symp. Electromachining (ISEM-XIII). Spain, 2001. P. 220 – 232.
75. Такунцов К.В. Основные закономерности механизма комбинированного электроэрозионно-электрохимического процесса обработки в динамических условиях // Перспективные технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов. Уфа, 2001. С. 14–19.
76. Kozak J., Rajukar K.P. Investigation of Electrochemical Arc Machining with Rotating Electrode // Proc. Intern. Symp, Electrical Machining. Switzerland. 1995. P. 498 – 509.
77. Rajukar K.P., Kozak J. Hybrid Machining Process Evaluation and Development // Proc. 2-th Intern. Conf. Machining and Measurements of Sculptured Surfaces. Krakow. 2000. P. 501 – 536.
78. Саушкин Б.П., Мингазетдинов И.Х., Гушан В.А. Особенности процесса совмещенной электроэрозионно-электрохимической обработки длинномерных деталей машин // Электронная обработка материалов. 1982. № 3. С. 12 – 15.
79. Allesu K., Muju M., Ghosh A. Some Experimental Observations in the Electrochemical Discharge Machining of Non-Conducting Materials and other Manufacturing Processes // Proc. Intern. Sympos. Electromach. (ISEM-IX). Japan. 1989. P. 94 – 99.
80. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев, 1985.
81. Михайлов В.В., Игнатъков Д.А., Пасинковский Е.А. Структурно-фазовые превращения и остаточные напряжения после комбинированного упрочнения стальных деталей электроискровым легированием и электролитной химико-термической обработкой // Электронная обработка материалов. 1999. № 3. С. 4–9.
82. Рыбалко А.В., Хамурарь В.И., Гринчук Д.М. Перспективы повышения производительности электроискрового легирования // Там же. 1999. № 1. С. 10–13.
83. Мулин Ю.И., Климова Л.А., Ярков Д.В. Феноменологическое описание закономерностей формирования поверхностного слоя при электроискровом легировании // Физика и химия обработки материалов. 2000. № 3. С. 50–56.
84. Мулин Ю.И., Климова Л.А., Дмитриев Д.А. и др. Определение технологических параметров процесса электроискрового легирования для образования заданной толщины покрытия // Электронная обработка материалов. 2002. № 3. С. 19–23.
85. Рыбалко А.В., Симинел А.В., Сахин О. Электроискровое легирование импульсами малых энергий // Металлообработка. 2002. № 3. С. 14–19.
86. Рыбалко А.В., Симинел А.В., Сахин О. Электроискровое легирование изоэнергетическими импульсами тока различной формы // Там же. 2003. № 3. С. 17–22.
87. Агроскин Я.З., Жерновой А. И., Жуков В. В. К вопросу о свечении при прохождении электрического тока через электролиты // Электронная обработка материалов. 1979. № 5. С. 14 – 15.
88. Шадрин С.Ю., Белкин П.Н. Расчет температуры анодного нагрева // Там же. 2002. № 3. С. 24–29.
89. Дураджи В.Н., Парсаданян А.С. Нагрев металлов в электролитной плазме. Кишинев, 1988.
90. Кузенков С.Е. Разработка процесса многофункциональной анодной обработки стальных изделий при нагреве в электролите: Автореф. дис. канд. техн. наук. Воронеж, 1997.
91. Кузенков С.Е., Саушкин Б.П. Химико-термическая обработка стальных изделий в водных растворах электролитов // Сборник трудов ВНТК. “Современная электротехнология в машиностроении”. Тула, 1997. С. 327–331.

92. Кузенков С.Е., Саушкин Б.П. Электрохимические процессы при анодном электролитном нагреве // Сб. тр. РНТК “Теория и технология электрохимической обработки”. Уфа, С. 17.
93. Кузенков С.Е., Кирей Ю.В. Особенности тлеющего разряда в процессе электролитно-плазменной обработки // Металлообработка. 2002. № 3. С. 20 – 21.
94. Веселовский А.П., Кюбарсен С.В., Ушомирская Л.А. Особенности электролитно-плазменной обработки металлов в нетоксичных электролитах // Там же. 2001. № 4. С. 29–31.
95. Семенова И.П., Амирханова Н.А., Невьянцева Р.Р. и др. Влияние природы электролитов на фазовые составляющие сплава ЖСбУ при электролитно-плазменной обработке // Сб. статей ВН ПК “Перспективные технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов”. Уфа, С. 75–77.
96. Черненко В.И., Снежко Л.А., Папанова И.И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом. Л., 1991.
97. Снежко Л.А. Физико-химические превращения на металлических электродах под действием анодных искровых разрядов / Сб. тр. ВНТК “Современная электротехнология в машиностроении”. Тула, 1997. С. 12–21.
98. Никифоров А.В. Интенсификация чистовой и упрочняющей обработки титана при использовании электротехнологий // Электронная обработка материалов. 1993. № 4. С. 17 – 22.
99. Смоленцев В.П. Перспективы создания комбинированных методов обработки в стране и за рубежом // Межвуз. сб научн. трудов “Нетрадиционные технологии в машиностроении и приборостроении”. Воронеж, 1999. С. 4–8.
100. Саушкин Б.П., Кузенков С.Е., Масликов С.В. Физико-химические методы модификации свойств поверхностного слоя деталей машин. Липецк, 1998.

Поступила 04.04.03

Summary

Electrodischarge machining method, proposed by B. Lazarenko is considered as the first catalytic link of the whole generation of methods and technologies used in machine-building production. High standard of theoretical and practical knowledge in the field of EDM is fixed and perspective ways of its further development are considered. Whole group of methods based on the processes of electrical discharge in liquid and gas medium is discussed. Obtained results of their industrial application and the ways of the further improving are disputed.

ИЗНОСОСТОЙКИЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ СПЛАВОВ ЖЕЛЕЗА

*Институт прикладной физики Академии наук Республики Молдова
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Молдова*

Электролитическое железнение находит широкое применение для восстановления и упрочнения сельскохозяйственных машин и автомобилей [1, 2]. Расширение номенклатуры восстанавливаемых деталей, изготовленных из легированных сталей, чугуна, алюминия, способных подвергаться механическим и тепловым нагрузкам, воздействию агрессивных сред, требует применения покрытий с более высокими физико-механическими свойствами, чем чистое электролитическое железо.

Детали цилиндро-поршневой группы работают при повышенных температурах, давлениях, минимальном количестве смазки. Износостойкость деталей может быть повышена за счет повышения твердости рабочих поверхностей, сопротивления материала пластическим деформациям, микроконтактному схватыванию и механическому повреждению [3]. Такое сочетание свойств материалов может быть достигнуто в электролитических сплавах на основе железа и композиционных электролитических покрытиях (КЭП), имеющих значительно лучшие свойства по сравнению с электролитическим железом.

В работе исследовали свойства сплавов железа Fe-Ni, Fe-Co, Fe-Mn, работающих в экстремальных условиях (повышенные нагрузки, недостаток смазочного материала).

Методика эксперимента

Железные покрытия осаждали из хлористого электролита следующего состава, г/л: № 1 – FeCl_2 – 500, HCl – 0,5 – 1,0, pH – 0,8 – 1,0, t – 40 – 50°C, i_k – 20 А/дм².

Для получения износостойких и коррозионно-стойких железо-никелевых (Ni 8 – 10) покрытий был выбран сульфатно-хлоридный электролит состава, г/л: № 2 – $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ – 500, $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 8 – 100, $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6$ – 4 – 6, pH – 0,8, t – 40°C, i_k – 50 А/дм² [4]. Применяемые растворы дают возможность получать высококачественные покрытия, обладают выравнивающей способностью в широком диапазоне плотностей тока. Введение стабилизирующей добавки калия-натрия виннокислого обеспечивает поддержание постоянного соотношения количества Fe(II) и Fe(III) и тем самым ликвидирует основной недостаток процесса электроосаждения железа – накопление в растворе Fe(III). Железо-цинковые покрытия (Zn 20 – 25%) осаждали из электролитов следующего состава, г/л: № 3 – $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 150 – 200, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 55 – 40, NH_4Cl – 100, лимонная кислота – 3 – 5, pH – 1,9, t – 50°C, i_k – 20 А/дм², № 4 – $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ – 180, ZnCl_2 – 40, NH_4Cl – 100, лимонная кислота – 3, t – 50°C, pH – 1,9, i_k – 20 А/дм². Электролиты отличаются стабильностью в работе и позволяют получать покрытия хорошего качества. Железо-марганцевые (Mn 4,9%) покрытия получены из малоокисляющегося кремнефтористого электролита, моль/л: № 5 – $\text{FeSiF}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 0,5, $\text{MnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 0,5, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 1,0, pH – 1,8 – 2,2, t – 50°C, i_k – 20 А/дм². Железо-кобальтовые (Co – 20 – 22%) осаждали из электролита состава, г/л: № 6 – FeCl_2 – 400 – 500, CoSO_4 – 75 – 100, pH – 0,8 – 1,0, t – 50 °C, i_k – 20 – 30 А/дм². Осадки наносили на поверхности различных материалов: углеродистая сталь, азотированная сталь 38ХМЮА, сплавы алюминия.

Были выбраны оптимальные режимы предварительной анодной обработки, обеспечивающие хорошее сцепление сплавов железа с поверхностью указанных материалов.

Для сталей с суммарным содержанием углерода и хрома более 2,5 – 3% рекомендуется электролит, г/л: $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 350, H_3PO_4 – 150, $\text{H}_3\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 309, i_k – 90 – 100 А/дм², время – 85 – 95 с. Углеродистые и конструкционные стали с суммарным содержанием углерода и хрома менее 2,5% целесообразно обрабатывать в электролите, г/л: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ – 350, H_2SO_4 – 200, i_k – 65 – 75 А/дм², время – 85 – 95 с.

Возможность применения электролитических сплавов железа для восстановления деталей машин определяется износостойкостью, коэффициентом трения, антифрикционными свойствами. При увеличении удельной мощности и скорости современных двигателей повышается силовая и температурная напряженность, что увеличивает интенсивность изнашивания сопряжений цилиндро-поршневой группы деталей из-за попадания в режим заедания. Поэтому наряду с износостойкостью и антифрикционностью важнейшей эксплуатационной характеристикой покрытий является противозадирная стойкость. В работе измеряли микротвердость сплавов железа, противозадирные и антифрикционные свойства. Оценка противозадирных свойств железных покрытий производилась по двум показателям: $P_{кр}$ – критическое контактное давление, при котором появлялись признаки заедания, МПа, $T_{заед}$ – температура, при которой происходило заедание поверхностей трения, °С. Значение критического давления и температура заедания определялись по результатам трех опытов. Основными признаками заедания являлись резкое повышение температуры смазываемого контакта, интенсивное дымление моторного масла.

Испытания на износостойкость проводили на специальной машине трения возвратно-поступательного движения, позволяющего исследовать особенности процесса трения, износа и противозадирной стойкости материалов сопряжению возвратно-поступательного скольжения [5]. Износостойкость и антифрикционные свойства сплавов на основе железа исследовали также на машине трения СМД-2 по схеме ролик-колодка при скорости относительного скольжения 2,3 м/с. Колодки из стали 45 предварительно хромировали, покрытия наносили на ролики из стали 45 диаметром 40 см и шириной 12 мм. Толщина покрытия составляла 0,4 – 0,5 мм. Износ покрытий определяли весовым методом. Испытания проводили при нагрузке 2,5, 5,0, 10,0, 12,5 МПа. При исследовании прирабатываемости, антифрикционности покрытий в контакте с хромовым покрытием смазку осуществляли маслом МТ-16 ИКПЭ, которое подавали в зону трения в условиях ограниченной (2 кап/мин) и полной (4 – 10 кап/мин) подачи масла. Время подъема нагрузки до необходимого значения составляло 4 – 5 мин. Перед испытаниями каждая пара прирабатывалась на нагрузке 0,6 и 1,25 МПа в течение 24 – 28 часов до получения 100 % прилегания сопряженных пар. Испытания на износостойкость проводили сравнительно с чистым электролитическим железом, полученным из хлористого электролита. Микротвердость исследуемых покрытий измеряли на микротвердомере ПМТ-3. На каждый образец наносили 10 отпечатков при нагрузке на индентор 50 г.

Экспериментальные результаты

Получены зависимости состава сплавов железа, физико-механических свойств от состава электролитов, режимов электролиза. Микротвердость (ГПа) железа и сплавов железа (Fe-Ni 6,0 – 7,5, Fe-Co 6,0 – 8,0, Fe-Mn 4,0 – 7,0, Fe-Zn 4,0 – 6,0) зависит от условий электролиза и определяется изменением субмикроструктуры и структуры осадков, размерами кристаллитов, связанных с включением легирующих компонентов в решетку основного металла и соосаждением гидроокисных соединений.

Установлено, что микротвердость покрытий, полученных из хлористого электролита железнения № 1 с добавкой сульфата никеля и тартрата калия-натрия (рис. 1, кривые 2 – 4) выше микротвердости железа, полученного из электролита без добавок (кривая 1).

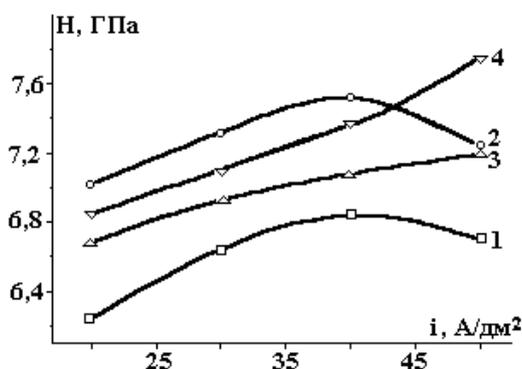


Рис.1. Зависимость микротвердости Fe (кривые 1, 2) и сплава Fe-Ni (кривые 3, 4) от плотности тока электролита, г/л: № 1 – без добавок; № 1 + $KNaC_4H_4O_6$; № 1 + $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ 40; № 1 + $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ 40 + $KNaC_4H_4O_6$ 5

Наибольшее влияние на повышение микротвердости осадков оказывает присутствие в растворе сегнетовой соли. С увеличением плотности тока микротвердость осадков железа, полученных из

хлористого электролита с добавкой 5 г/л калия натрия виннокислого, проходит через максимум (кривая 2). Добавление 40 г/л сульфата никеля к этим двум растворам приводит к тому, что микротвердость сплава Fe-Ni растет пропорционально повышению плотности тока.

Микротвердость покрытий сплавами Fe-Zn при увеличении плотности тока от 2 до 10 А/дм² носит экстремальный характер (рис. 2). Сначала она увеличивается, а затем падает. Увеличение микротвердости сплавов связано с двумя причинами: измельчением структуры осадка при возрастании плотности тока и с уменьшением количества цинка в покрытии. Падение микротвердости обусловлено ухудшением качества осадков после достижения предельно допустимой при этих условиях плотности тока. Введение в электролит железнения солей кобальта улучшает физико-механические свойства покрытий.

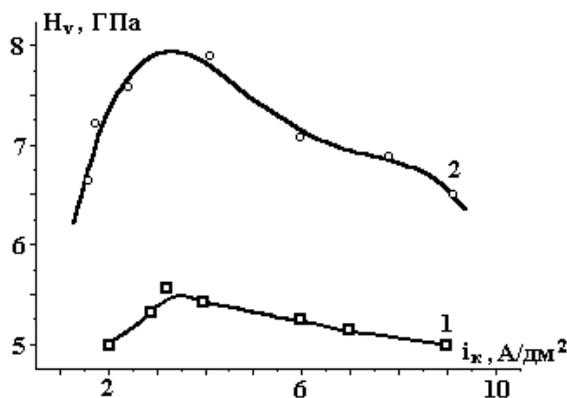


Рис.2. Зависимость микротвердости Fe-Zn сплавов от плотности тока.
Электролиты: 1 – № 3, 2 – № 4

Значения микротвердости сплава железо-кобальт, выхода по току, состава сплава в зависимости от условий электролиза приведены в табл. 1.

Таблица 1. Влияние условий электролиза на выход по току и микротвердость сплава железо-кобальт

CoSO ₄ , г/л	i_k , А/дм ²	t , °С	pH	Вт %, сплава	Вт %, Fe	Вт %, Co	H_v , ГПа
1	2	3	4	5	6	7	8
0	20	50	0,8	96,4	100	0	5,20
25	20	50	0,8	96,7	89,2	10,8	5,80
50	20	50	0,8	97,0	85,7	14,3	6,30
75	20	50	0,8	97,3	81,4	18,6	6,50
100	20	50	0,8	97,8	78,3	21,7	6,60
100	1	50	0,8	84,8	69,8	30,2	–
100	3	50	0,8	85,2	72,0	28	–
100	5	50	0,8	88,0	74,8	25,2	–
100	10	50	0,8	95,2	76,0	24,0	6,00
100	20	50	0,8	97,8	78,3	21,7	6,66
100	30	50	0,8	98,7	79,5	20,5	6,40
100	40	50	0,8	98,8	80,4	19,6	6,05
100	20	50	0,4	88,4	79,0	21,0	6,30
100	20	50	0,8	97,8	78,3	21,7	6,60
100	20	50	1,2	101,2	81,0	19,0	7,00
100	20	40	0,8	97,4	83,2	16,8	6,40
100	20	50	0,8	97,8	78,3	21,7	6,60
100	20	60	0,8	98,6	81,4	18,6	5,85

Микротвердость железо-кобальтового сплава при увеличении содержания сернокислого кобальта в электролите железнения растет, выход по току сплава незначительно повышается (96,4 – 97,8%), содержание железа в сплаве падает, содержание кобальта в сплаве растет от 10,8 до 21,7% (табл. 1, рис. 3). При увеличении плотности тока от 5 до 40 А/дм² микротвердость сплава желе-

зо-кобальт проходит через максимум, соответствующий плотности тока 20 А/дм^2 ($H_{\mu} = 6,6 \text{ ГПа}$) (рис. 4, кривая 1, табл. 1), что, вероятно, связано с появлением микротрещин на поверхности покрытия за счет больших внутренних напряжений, возникающих в покрытии [6]. Такая же зависимость микротвердости покрытий железо-кобальт наблюдалась с ростом температуры электролита (рис. 4, кривая 3). Выход по току сплава растет до плотности тока 20 А/дм^2 , при дальнейшем увеличении плотности тока выход по току сплава меняется незначительно. Рост pH раствора от 0,4 до 1,2 приводит к увеличению микротвердости Fe-Co (рис. 4, кривая 2), выхода по току сплава до 101,2% (табл. 1), что, вероятно, обусловлено включением гидроокисей железа и кобальта в покрытие.

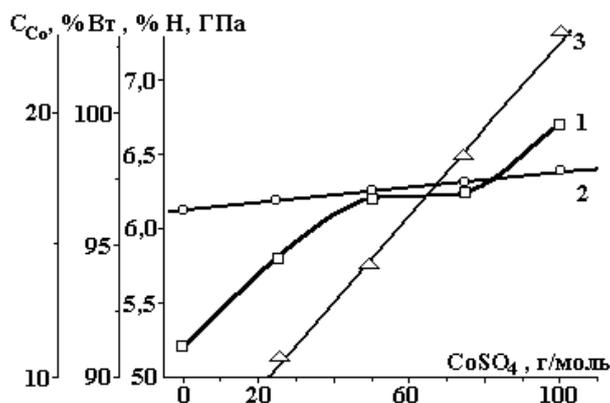


Рис.3. Зависимость микротвердости (кривая 1), выхода по току (кривая 2), содержания количества кобальта (кривая 3) в сплаве железо-кобальт в зависимости от концентрации сернокислого кобальта

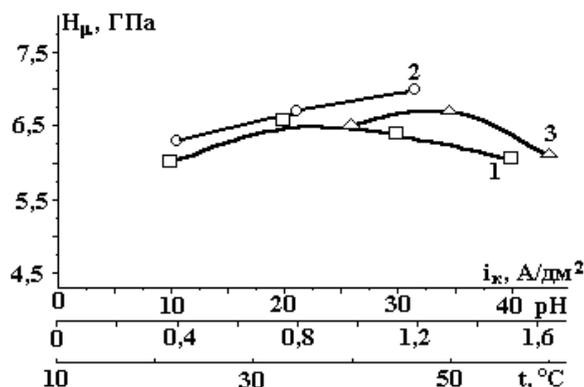


Рис.4. Зависимость микротвердости Fe-Co сплавов от плотности тока (кривая 1), pH (кривая 2), температуры (кривая 3). Электролит № 6

Микротвердость Fe-Mn сплава с увеличением плотности тока до 30 А/дм^2 и pH от 1,2 до 3,0 возрастает (рис. 5, кривые 1, 2). Повышение температуры электролита от 15 до $60 \text{ }^\circ\text{C}$ приводит к получению мягких Fe-Mn покрытий, микротвердость которых снижается от 6,8 до 4,4 ГПа (рис.5, кривая 3). Количество кобальта, никеля и цинка в сплавах железо-никель, железо-кобальт и железо-цинк уменьшается при условиях, способствующих защелачиванию прикатодного слоя (увеличение плотности тока, pH раствора, уменьшение температуры) (рис. 6, кривые 1, 2, табл. 1). Присутствие калия-натрия виннокислого в электролите для осаждения Fe-Ni приводит к уменьшению количества никеля в покрытии. С увеличением плотности тока и температуры содержание марганца в сплаве Fe-Mn увеличивается (рис. 6, кривая 4).

Характер износа электролитического железа и сплавов на его основе различен: с увеличением удельного давления до 10,0 – 12,5 МПа износ электролитического железа уменьшается, а затем начинает возрастать (рис. 7, кривая 2). Покрытия сплавом железо-никель при нагрузке 2,5 МПа имеют износ в 2,5 раза меньше, чем железо. При ступени нагружения (5,0 МПа) износ Fe-Ni покрытий возрастал (до 2,4 – 2,5 мг/ч) и сопровождался явлениями схватывания с хромированной поверхностью колески (табл. 2).

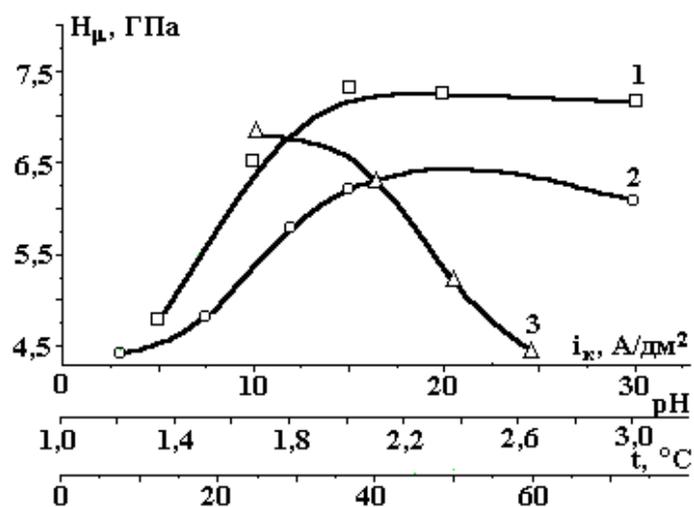


Рис.5. Зависимость микротвердости Fe-Mn сплавов от плотности тока (кривая 1), pH (кривая 2), температуры (кривая 3). Электролит № 5

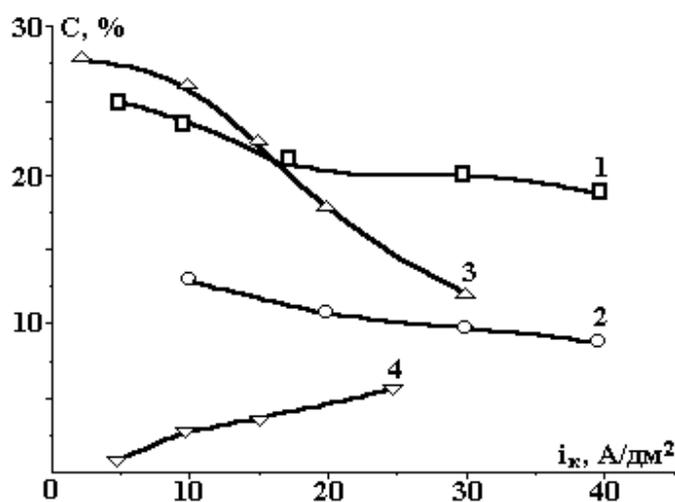


Рис. 6. Зависимость количества Co (кривая 1), Ni (кривая 2), Zn (кривая 3), Mn (кривая 4) в сплавах от плотности тока. Электролиты № 1 – 6

Таблица 2. Влияние удельной нагрузки на скорость изнашивания железных покрытий и сплавов железа

Нагрузка, МПа	Скорость изнашивания, мг/ч *			
	Fe	Fe-Mn	Fe-Co	Fe-Ni
2,5	0,62	0,05	0,01	0,24
5,0	0,45	0,36	0,43	2,45
7,5	0,87	0,50	0,82	–
10,0	1,06	0,68	0,89	–
12,5	2,02	0,77	0,98	–

*Средняя на 3 – 4 опытов.

Износ сплава железо-кобальт с ростом нагрузки свыше 7,5 МПа приближается к насыщению (рис. 7, кривая 3), а сплава железо-марганец изменяется пропорционально росту нагрузки (рис. 7, кривая 4).

В области нагрузок 2,5 – 12,5 МПа наилучшую износостойкость имели покрытия железо-марганец и железо-кобальт, а сплав железо-никель при нагрузках больше 2,5 МПа проявил склонность к схватыванию с электролитическим хромом и изнашивался быстрее, чем чистое электролитическое железо.

Лучшая износостойкость электролитических сплавов железо-марганец и железо-кобальт объясняется, вероятно, их большей антифрикционностью.

Испытания покрытий в условиях недостатка смазки (при подаче ее в сопряжение 2 кап/мин) показали, что наиболее высокий коэффициент трения имели покрытия железо-никель (рис. 8, кривая 2). При ступенчатом нагружении в первые 15 – 20 мин работы на повышенной нагрузке трение покрытий Fe-Ni с хромом отличалось неустойчивостью. Момент и температура трения резко возрастали, однако после подачи обильной смазки возвращались к нормальному значению. После 15 – 20 мин обильной подачи смазки Fe-Ni покрытия быстро прирабатывались и приобретали состояние, позволяющее им в дальнейшем длительно работать при ограниченной смазке, составляющей 2 кап/мин.

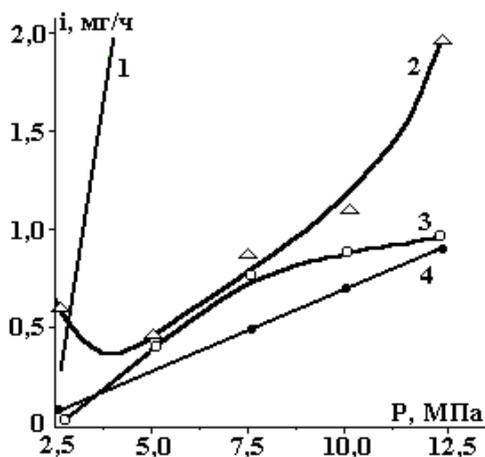


Рис. 7. Скорость изнашивания “чистых” электролитических покрытий (i , мг/ч) в зависимости от удельного давления (P , МПа). 1 – железо-никель; 2 – “чистое” электролитическое железо; 3 – железо-кобальт; 4 – железо-марганец

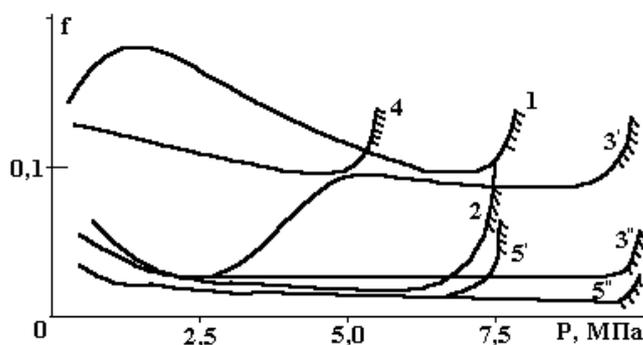


Рис. 8. Зависимость коэффициентов трения электролитических покрытий на основе железа от удельной нагрузки. 1 – железо-никель; 2 – “чистое” электролитическое железо; 3' и 3'' – изменение коэффициента трения электролитического сплава железо-кобальт; 4 – железо-марганец, 5' и 5'' – стали 38ХМЮА при ступенчатом и постепенном приложении нагрузки

Вероятно, вследствие плохой смачиваемости хрома маслом и ухудшения адгезии масла к железному покрытию при его легировании никелем, железо-никелевые покрытия при давлениях $p \geq 7,5$ МПа оказались неработоспособными в паре с хромом. Вместе с тем, при увеличении подачи масла вдвое (4 кап/мин) они выдерживали испытания до нагрузок 9,0 – 9,2 МПа.

Электролитические сплавы железо-марганец и железо-кобальт оказались более реакционно-способными и антифрикционными, чем сплав железо-никеля (рис.7). Лучшую антифрикционность, стойкость к задиру и способность нести повышенные нагрузки в условиях недостатка смазки показал при испытаниях в контакте с хромом сплав железо-кобальт (см. рис. 9, кривые 3' и 3''). Коэффициент трения сплава железо-марганец с ростом нагрузки уменьшался до 0,1, однако при удельных давлениях 5,0 МПа эти покрытия схватывались с электролитическим хромом после 5 – 15 мин работы. Температура в момент трения при этом повышалась (рис. 9).

При работе сплава железо-кобальт резкое изменение нагрузки приводило к росту тепловыделения, повышению момента трения в течение первых 15 – 20 мин работы сопряжения, затем, вслед-

ствии повышенного уровня деформирования, роста поверхности контакта, ускорения окислительных процессов наблюдалась ускоренная приработка поверхности ролика и колодки. Температура и момент трения пары уменьшались, и она продолжала работать в условиях недостатка смазки устойчиво и без задигов.

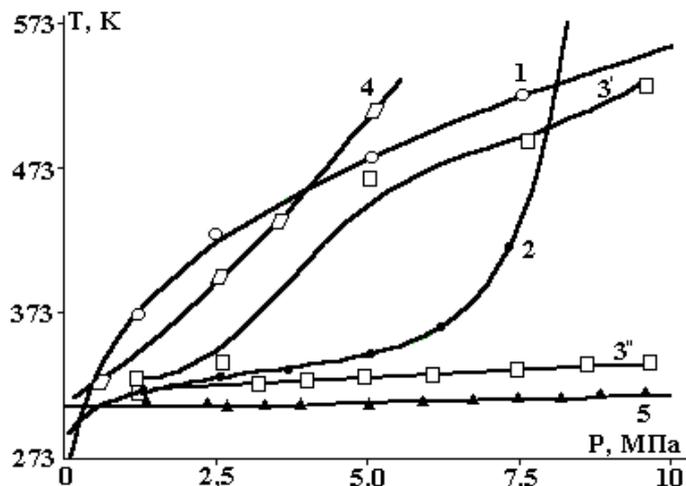


Рис. 9. Влияние удельного давления на температуру трения электролитических покрытий и закаленной стали в контакте с хромированной колодкой из стали 45.

1 – железо–никель; 2 – “чистое” электролитическое железо; 3' и 3'' – железо–кобальт при ступенчатом и постепенном приложении нагрузки; 4 – железо–марганец; 5 – закаленная сталь 38ХМЮА

Температура и коэффициент трения закаленной и азотированной стали оказались в условиях испытаний самыми низкими (рис. 8, кривая 5, рис. 9, кривая 5). При подаче смазки 2 кап/мин работоспособность стали сохранялась до нагрузок $5,0 \pm 7,5$ МПа, при нагрузках выше 7,5 МПа происходили повышение момента трения и повышенный разогрев пары, что приводило к быстрому росту уровня деформирования и разрушению поверхности колодки и ролика. Увеличение подачи масла до 4 кап/мин и постепенное повышение нагрузки позволило повысить несущую способность сопряжения до нагрузки 8,0 – 9,5 МПа.

Следует отметить, что покрытие железо-кобальт при смазке (2 кап/мин) как в режиме ступенчатого, так и постепенного повышения нагрузки показали антифрикционные свойства не хуже стали 38ХМЮА (рис.7). Температура сопряжений при этом была на 10 – 13 К выше, чем закаленной стали. Предельная несущая способность сопряжения Fe-Co оказалась такой же, как и у пары сталь-хром.

Изучение поверхности роликов и колодок после испытаний показало, что наилучшая локализация разрушений и очагов схватывания наблюдается для пары железо-кобальт-хром. Разрушения электролитического хрома происходили в контакте со сплавом железо–никель.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелков М. П. Твердое осталивание автотракторных деталей. М., 1971.
2. Кудрявцев Н.Т., Мельникова М.М., Яковлева И.Д. Восстановление изношенных деталей методом железнения. М., 1958.
3. Ваграмян А.Т., Петрова Ю.С. Физико-механические свойства электролитических осадков. М., 1960.
4. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М., 1975.
5. Гологан В.Ф., Ейра Т.С., Дутта К.К. Особенности влияния гальванических покрытий железа и сплава железо-никель на прочность стали при статическом и циклическом нагружениях // Электронная обработка материалов. 1981. № 3. С. 33 – 38.
6. Игнатков Д.А. Остаточные напряжения в неоднородных деталях. Кишинев, 1992.

Поступила 18.07.03

Summary

The results of investigation of the process of electric precipitation of iron alloys from electrolytes of different composition, as well as physics, mechanical properties (microhardness, wear resistance, antifrictional properties) of obtained sediments and possibilities of their application for restoration and strengthening of machine elements.

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Институт импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины,
просп. Октябрьский, 43-а, г. Николаев, 54018, Украина*

Известно, что электрогидроимпульсная обработка (ЭГИО) является универсальным и эффективным методом повышения служебных характеристик металлоконструкций с технологическими напряжениями [1], сущность, которой заключается в обработке напряженных участков конструкций многократными импульсами давления, генерируемыми высоковольтными электрическими разрядами в воде. При этом снижение напряжений I и II родов и стабилизация дислокационной структуры происходят одновременно вследствие активации дислокационно-сдвиговых релаксационных процессов в результате многократного прохождения через обрабатываемый металл упругих волн напряжений.

Вопрос об эффективности преобразования энергии при подводном искровом разряде возникает в связи с необходимостью выбора такого оптимального режима разряда в LC -цепи, при котором обеспечивается максимум механического действия [2]. Мерой такого воздействия при всем многообразии электровзрывных технологических процессов могут служить параметры ударной волны. Большинство исследований [3 – 5] показывают, что высокая эффективность разряда наблюдается тогда, когда он протекает в режиме, близком к критическому. Для критического разряда вся энергия, запасенная в конденсаторной батарее, выделяется в течение одной положительной полуволны тока разряда; сопротивление канала в течение всего периода разряда оказывается выше активного сопротивления элементов разрядного контура, а потерями энергии в них можно пренебречь.

Согласно [2] наиболее быстрая передача энергии накопителя в канал разряда и наибольший электроакустический КПД для разряда, близкого к критическому, обеспечивается при условии энергетической оптимальности, определяющейся связью между параметрами разрядного контура и рабочего промежутка при использовании воды-конденсата, удельная электропроводность которой $\lambda \sim 5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Однако применительно к ЭГИО сварных металлоконструкций в производственных условиях не всегда возможно соблюдение условий энергетической оптимальности разряда. Обусловлено это прежде всего применением в промышленных условиях рабочих жидкостей, обладающих электропроводностью λ в диапазоне $(2 - 10) \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, как, например, техническая вода. С повышением удельной электропроводности эффективность электрического разряда в воде снижается в результате предпробивных потерь энергии [6]. Предельное значение электропроводности, при котором снижением напряжения заряда U_0 конденсаторной батареи за счет предпробивных потерь можно пренебречь, равно $\lambda = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Для электропроводностей выше предельного значения потерь энергии будут увеличиваться: чем выше электропроводность, тем больше потери энергии.

Нестабильность стадии формирования разряда существенно снижает возможность управления технологическим процессом ЭГИО, поскольку реальное напряжение в момент пробоя оказывается ниже зарядного, а это значительно влияет на режим разряда. При этом КПД преобразования энергии уменьшается, что приводит к снижению эффективности электрогидроимпульсной обработки сварных соединений. Поэтому возникает необходимость учета отклонений КПД преобразования энергии единичных разрядов с целью последующей корректировки режима ЭГИО.

Поскольку КПД преобразования энергии является функцией многих независимых переменных (электропроводности воды, разрядного промежутка, емкости и индуктивности) экспериментальные исследования по определению зависимости КПД от вышеперечисленных факторов проводились с применением математического планирования.

Для нахождения зависимости $\eta = f(C, \lambda, L, l_{\text{пр}})$ предполагали априори, что она имеет вид полинома первой степени.

Пределы, в которых изменялись независимые переменные, установлены с учетом опыта промышленного применения ЭГИО:

- электропроводность воды от 10^{-3} до 10^{-1} Ом $^{-1}$ ·м $^{-1}$;
- индуктивность разрядного контура от 7 до 30 мкГн;
- длина разрядного промежутка от 30 до 100 мм;
- емкость батареи конденсаторов от 3 до 9 мкФ.

В этих пределах выбирали для каждого фактора основной уровень и интервал варьирования (см. табл.1). В связи с тем, что факторы различны по физической природе и изменяются в разных динамических диапазонах, для формализации процесса анализа и независимости полученных результатов от изменения масштаба входных величин независимые переменные предварительно кодировались. Связь между кодированным и натуральным значениями определялась из соотношения [7]

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{J_i}, \quad (1)$$

где X_i – натуральное значение i -го фактора; X_{i0} – натуральное значение i -го фактора на нулевом уровне; J_i – интервал варьирования.

Пределы изменения независимых переменных, их кодовые значения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Независимые переменные, их кодовые значения и интервал варьирования

Интервал варьирования и уровень факторов	Емкость батареи конденсаторов, $C, 10^{-6}, \Phi$	Индуктивность разрядного контура, $L, 10^{-6}, \text{Гн}$	Длина разрядного промежутка, $l_p, 10^{-3}, \text{м}$	Удельная электропроводность, $\lambda, \text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$
Нулевой уровень $x_i = 0$	6	21,3	65	$4,1 \cdot 10^{-2}$
Интервал варьирования J_i	3	7	35	$4,0 \cdot 10^{-2}$
Нижний уровень $x_i = -1$	3	14,3	30	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Верхний уровень $x_i = +1$	9	28,3	100	$8,0 \cdot 10^{-2}$
Кодовое значение	x_1	x_2	x_3	x_4

Условия проведения экспериментов записывались в виде матрицы планирования, приведенной в табл. 2. Основным преимуществом такого ортогонального плана первого порядка является раздельная (независимая) оценка коэффициентов регрессии.

Таблица 2. Расширенная матрица планирования экспериментов

n_i	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	\bar{y}_i	$S^2_{\{y_i\}}$	η_i
1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	0,41	0,02	0,42
2	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	0,34	0,02	0,37
3	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	0,37	0,08	0,39
4	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	0,31	0,08	0,33
5	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	0,82	0,18	0,79
6	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	0,76	0,05	0,76
7	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	0,78	0,18	0,71
8	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	0,68	0,18	0,69
9	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	0,37	0,18	0,38
10	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	0,33	0,18	0,35
11	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	0,31	0,02	0,30
12	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	0,29	0,18	0,32
13	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	0,67	0,18	0,69
14	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	0,49	0,32	0,53
15	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	0,60	0,08	0,58
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0,45	0,02	0,43
B_i	0,55	-0,02	-0,03	0,175	-0,06	0,001	-0,007	0,034	-0,01	0,003	-0,045		

Моделирование электрического разряда в жидкости производилось на экспериментальной установке. Разряд осуществлялся в специальной разрядной камере объемом $0,12 \text{ м}^3$, заполненной водопроводной или дистиллированной водой. При исследовании электрических характеристик разряда использовалась система электродов острие – плоскость, диаметр острия составлял 8 мм. Для увеличения ин-

дуктивности разрядного контура использовалась катушка. Методика исследований предусматривала одновременное осциллографирование разрядного тока и напряжения с помощью двухлучевого осциллографа С8-17 по схеме, приведенной на рис. Для измерения разрядного тока $I(t)$ применялся магнитный потенциалметр (катушка Роговского), позволяющий получать точность измерения порядка 5%; для регистрации напряжения $U(t)$ использовался емкостной делитель напряжения, присоединенный к выходу исследуемого разрядного промежутка [8]. Компенсация индуктивной составляющей падения напряжения на электродной системе производилась последовательным включением в цепь делителя напряжения тороидального воздушного трансформатора равной взаимоиндукции [9]. По осциллограммам разрядного тока и напряжения рассчитывались мощность разряда, энергия, выделившаяся в канале разряда за первый полупериод, и КПД преобразования энергии [2]. Точность электрических измерений и вычислений контролировалась по балансу энергии. Как правило, разбаланс не превышал 10%, что и принималось за верхнюю границу точности электрических измерений. Вышеуказанные характеристики находились методом графического или численного расчетов.

Результаты экспериментов обрабатывали с использованием методов математической статистики [10]. Для каждой точки факторного пространства вычисляли среднее значение выходной величины \bar{y}_i и ее построчную дисперсию $S^2\{y_j\}$ (см. табл. 2). Воспроизводимость эксперимента проверялась по критерию Кохрена [7].

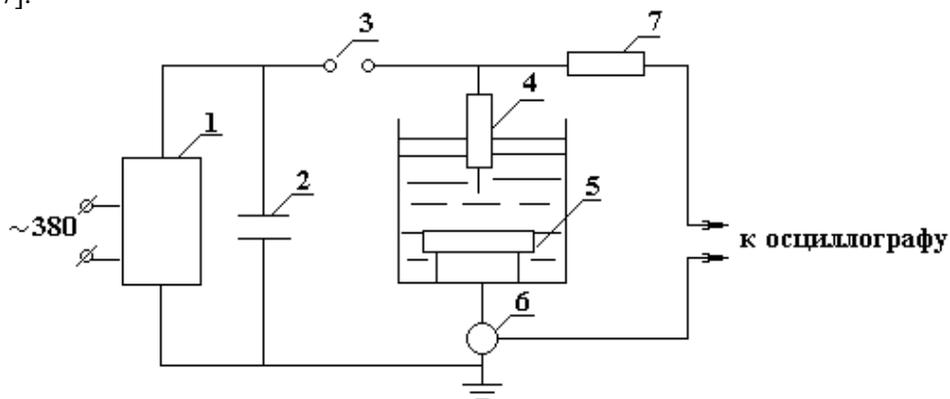


Рис. Схема измерения импульсных токов и напряжений:
1 – ВТМ-15/50; 2 – батарея конденсаторов; 3 – разрядник; 4 – электрод;
5 – образец; 6 – катушка Роговского; 7 – делитель напряжения

После обработки экспериментальных данных методом регрессионного анализа с последовательным исключением незначимых коэффициентов получено уравнение регрессии в виде полинома первой степени, которое в кодированной системе имеет вид

$$\begin{aligned}
 Y &= B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + B_3x_3 + B_4x_4 + B_{12}x_1x_2 + B_{13}x_1x_3 + B_{14}x_1x_4 + B_{23}x_2x_3 + B_{24}x_2x_4 + B_{34}x_3x_4 = \\
 &= 0,551 - 0,02x_1 - 0,03x_2 + 0,175x_3 - 0,06x_4 + 0,001x_1x_2 + 0,007x_1x_3 + 0,034x_1x_4 - \\
 &- 0,01x_2x_3 + 0,03x_2x_4 - 0,045x_3x_4.
 \end{aligned} \tag{2}$$

После перевода в естественную систему координат окончательно получаем уравнение регрессии

$$\begin{aligned}
 \eta &= 0,337 - 1,28 \cdot 10^4 C - 1,96 \cdot 10^3 L + 5,59 l_p - 0,54\lambda + 4,76 \cdot 10^7 C \cdot L + 6,67 \cdot 10^4 C \cdot l_p + \\
 &+ 1,73 \cdot 10^5 C \cdot \lambda - 4,08 \cdot 10^4 L \cdot l_p + 4,28 \cdot 10^3 L \cdot \lambda - 12,86 l_p \cdot \lambda.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Полученное уравнение регрессии проверяли на адекватность экспериментальным данным по критерию Фишера [11]. Такая проверка необходима, поскольку вид зависимости заранее был неизвестен и выбирался по возможности простым. Проверка показала, что полученное в результате экспериментов аналитическое выражение $\eta = f(\lambda, L, C, l_p)$ с достоверностью 95% адекватно экспериментальным данным. Следовательно, полученное уравнение регрессии можно использовать в качестве интерполяционной модели.

Анализ регрессионной зависимости показал, что все независимые переменные оказывают влияние на величину η , но степень их влияния различна.

Например, при изменении индуктивности разрядного контура в диапазоне от 10 до 30 мГн, то есть в три раза, величина η при всех прочих равных условиях изменяется на 10%. Наиболее существенное влияние на режим разряда и КПД преобразования энергии оказывает длина разрядного промежутка, при увеличении последней величина η монотонно возрастает. Поэтому для ЭГИО в промышленных условиях длина разрядного промежутка выбирается в диапазоне (80 – 100) мм.

Полученная зависимость позволяет также оценить снижение КПД в результате потерь энергии в проводящей воде, при этом для электропроводностей выше $5 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ потери энергии значительны, что необходимо учитывать при выборе режимов ЭГИО.

Поэтому для обеспечения эффективной ЭГИО в проводящей воде потери энергии должны быть компенсированы соответствующим увеличением запасаемой энергии единичных разрядов, что реализуется введением поправочного коэффициента κ_η , который определяется из соотношения

$$\kappa_\eta = \frac{\eta_3}{\eta_p}, \quad (4)$$

где η_3 – величина КПД преобразования энергии при условиях, близких к оптимальным ($\eta_3 = 0,75$); η_p – величина КПД преобразования энергии, определенная по регрессионной зависимости для производственных условий.

Тогда рабочее значение энергии единичного разряда для промышленных условий определяется соотношением

$$W_p^H = \kappa_\eta \cdot W_p, \quad (5)$$

где W_p – рабочее значение энергии единичного разряда при оптимальных условиях, кДж,

$$W_p = \frac{C \cdot U_0^2}{2}. \quad (6)$$

Таким образом, на основе результатов экспериментальных исследований изменения КПД преобразования энергии в зависимости от условий формирования электрических разрядов получено уравнение регрессии $\eta = f(\lambda, C, L, l_p)$, которое можно использовать в качестве интерполяционной модели для определения величины η при изменении каждого из независимых параметров.

Для обеспечения высокой эффективности ЭГИО сварных конструкций в проводящей воде предложена корректировка расчетов режимов обработки введением поправочного коэффициента κ_η .

ЛИТЕРАТУРА

1. *Опара В.С., Резникова Л.Я., Онацкая Н.А., Демиденко Л.Ю.* Электрогидроимпульсная обработка – универсальный и эффективный метод повышения служебных характеристик металлоконструкций с технологическими напряжениями // Тяжелое машиностроение. 1998. № 10. С. 7 – 9.
2. *Кривицкий Е.В.* Динамика электровзрыва в жидкости. Киев, 1986.
3. *Наугольных К.А., Рой Н.А.* Электрические разряды в воде. М., 1971.
4. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта / Под ред. Г.А. Гулого. М., 1977.
5. *Окунь И.З.* Исследование электрических характеристик импульсного разряда в жидкости // Журн. техн. физики. 1971. Т. 39. Вып. 5. С. 292 – 301.
6. *Кривицкий Е.В., Шамко В.В.* Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев, 1979.
7. *Володарский Е.Т., Малиновский Б.Н., Туз Ю.М.* Планирование и организация измерительного эксперимента. Киев, 1987.
8. *Шваб А.* Измерения на высоком напряжении (Измерительные приборы и способы измерения) / Пер. с нем. М., 1973.
9. *Остроумов Г.А., Штейнберг А.А.* Способ измерения импульсных напряжений // Приборы и техника эксперимента. 1963. № 3. С. 85 – 89.
10. *Зажигаев Л.С., Кишьян А.А., Романиков Ю.И.* Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. М., 1978.
11. *Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М., 1976.

Поступила 15.05.03

Summary

The methods of experimental planning and regression analysis are used to obtain the dependence of relative efficiency as the function of discharging circuit, discharge gap's length and water electronic conductivity parameters. It is shown that the regression equation may be used as interpolation model to compute the relative efficiency with changing of each of independent variables. To increase energy-conversion efficiency of electrohydraulic pulse treatment for welded constructions in conducting water the corrected from of calculation including correction coefficient is proposed.

А.Н. Жаров, А.И. Григорьев

О НЕЛИНЕЙНОМ ИЗМЕНЕНИИ ЧАСТОТЫ КАПИЛЛЯРНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЗАРЯЖЕННОЙ КАПЛИ

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

При решении задачи о нелинейных осесимметричных капиллярных колебаниях заряженной капли в третьем порядке малости при произвольной одномодовой начальной деформации ее равновесной формы найдена поправка к частоте осцилляций изначально возбужденной моды, имеющая второй порядок малости, увеличивающаяся с ростом номера моды и величины собственного заряда капли.

Задача об исследовании нелинейных осцилляций заряженной капли представляет значительный интерес в связи с многочисленными академическими, техническими и технологическими приложениями. В связи с этим она неоднократно решалась в постановках различной сложности и строгости (см., например, [1 – 7] и указанную там литературу). Тем не менее, ни в одном из проведенных исследований не были получены корректные нелинейные поправки к частоте осцилляций. Следует отметить, что в [1, 2] такие поправки для трех первых мод капиллярных осцилляций капли рассчитывались, но приведенные в этих статьях выражения для поправок ошибочны. В работе [2] была предпринята попытка устранить ошибку [1], но аналитические выражения [2] для поправок содержат описки, сводящие на нет эффективность исправлений.

Пусть несущая заряд Q капля радиуса R идеальной несжимаемой жидкости с плотностью ρ и коэффициентом поверхностного натяжения σ совершает осесимметричные осцилляции в окрестности равновесной сферической формы. Начальную деформацию равновесной сферической формы зададим в виде виртуального возбуждения m -й моды линейных капиллярных осцилляций: $\varepsilon \cdot P_m(\cos \vartheta)$, осуществляющихся с частотой ω_m , где $P_m(\cos \vartheta)$ есть полином Лежандра порядка m . Будем искать выражение для образующей формы колеблющейся капли в любой момент времени, имея целью получить поправки к форме третьего порядка малости по ε и нелинейные поправки к частоте осцилляций. Решение проведем в сферической системе координат, связанной с центром масс капли.

Математическая формулировка обсуждаемой задачи и ее решение методом многих масштабов полностью эквивалентны использовавшимся ранее [3 – 7], и здесь не станем их обсуждать в виду ограниченности объема статьи. Приведем сразу конечный результат: образующую нелинейно-осциллирующей капли, выписанную с точностью до третьего порядка малости по ε -амплитуде начальной деформации:

$$r(\vartheta, t) = 1 + \varepsilon \cdot \cos[(\omega_n + \varepsilon^2 \cdot b_m)t] \cdot P_m(\cos \vartheta) + \varepsilon^2 \sum_{n=0}^{\infty} M_n^{(2)}(t) P_n(\cos \vartheta) + \varepsilon^3 \sum_{n=0}^{\infty} M_n^{(3)}(t) P_n(\cos \vartheta). \quad (1)$$

$$\omega_m^2 = \frac{\sigma}{\rho \cdot R^3} (n-1)n[(n+2) - W]; \quad W = \frac{Q^2}{4\pi\sigma R^3}. \quad (2)$$

b_m и $M_n^{(j)}$ – весьма громоздкие коэффициенты, которые не будем приводить в виду ограниченности места, отметим лишь, что их можно найти в [8]. В настоящем же изложении ограничимся анализом

последствий для устойчивости капли, связанных с появлением нелинейной поправки к частоте капиллярных осцилляций, и графическим анализом зависимостей b_m от величины собственного заряда капли (от величины параметра W).

Из (1) видно, что частота колебаний поверхности капли изменяется на величину второго порядка малости $\varepsilon^2 \cdot b_m$ по сравнению с частотой линейных капиллярных колебаний ω_m . В используемом третьем приближении по ε поправки к частотам $\varepsilon^2 \cdot b_m$ появляются лишь в слагаемых первого порядка малости.

Добавка к частоте ω_m , характеризуемая коэффициентом b_m , отрицательна и увеличивается по абсолютной величине с ростом номера m изначально возбужденной моды и собственного электрического заряда капли Q , характеризуемого параметром W (см. рис. 1). Разрыв на кривых для четвертой и девятой мод (см. рис.1, б) связан с внутренними нелинейными резонансами, реализующимися уже во втором порядке малости [9].

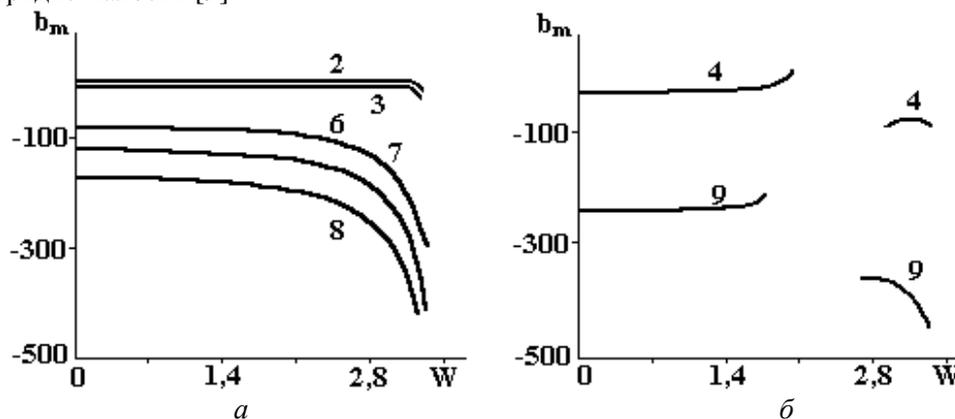


Рис.1. Зависимость коэффициента b_m , обезразмеренного на $\sqrt{\sigma/\rho R^3}$, от параметра W , характеризующего заряд капли. Номера у кривых совпадают с номерами возбужденных мод

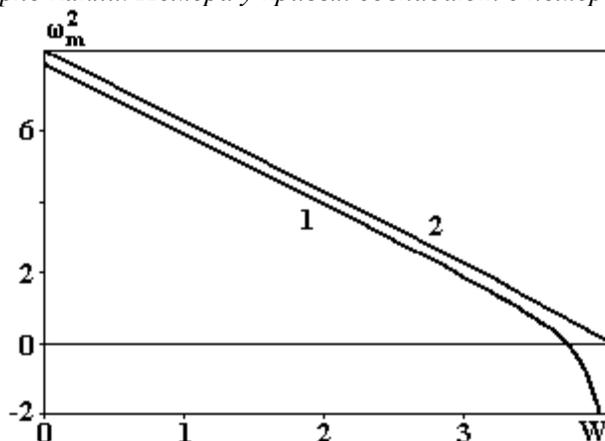


Рис.2. Зависимости от параметра W квадрата частоты основной моды, обезразмеренной на $\sigma/\rho R^3$ – с учетом нелинейной поправки (1); без учета нелинейной поправки (2)

Нелинейное взаимодействие мод в задаче третьего порядка малости приводит к существенному расширению спектра мод, вовлеченных в формирование рельефа поверхности капли. Так, при начальном возбуждении m -й моды в первом порядке малости возбуждается только m -я мода, во втором все четные с номерами от 0-й до моды с номером $2m$ включительно. В третьем же порядке малости, если m – четно, то возбуждаются четные моды от 0-й до моды с номером $3m$ включительно, если же m – нечетно, то в третьем порядке малости возбуждаются все нечетные от 1-й до моды с номером $3m$ включительно.

Наличие поправок к частотам приводит к изменению критических условий реализации неустойчивости m -й моды по отношению к собственному заряду капли, в линейном приближении полученных Рэлеем [10]. По мере увеличения заряда капли (параметра W) квадрат частоты m -й моды снижается согласно (2) и при некотором значении обращается в нуль. Дальнейшее увеличение заряда приводит к тому, что квадрат частоты становится отрицательным, а сама частота мнимой. При этом амплитуда m -й моды начинает экспоненциально нарастать со временем, то есть мода становится не-

устойчивой. Критическое условие реализации неустойчивости m -й моды с учетом нелинейной поправки можно записать в виде

$$(\omega_m + \varepsilon^2 \cdot b_m)^2 \cong \omega_m^2 + 2\varepsilon^2 \cdot \omega_m \cdot b_m + O(\varepsilon^4) = 0.$$

Устойчивость капли как целого определится критическими условиями реализации неустойчивости наиболее легко возбуждаемой основной моды: $m = 2$. На рис. 2 приведены зависимости от параметра W квадрата частоты основной моды капли с учетом нелинейной поправки (кривая 1) и без ее учета (кривая 2). Легко видеть, что учет нелинейной поправки к частоте приводит к снижению критического для реализации неустойчивости значения параметра W . При амплитуде начального возмущения основной моды $\varepsilon = 0,1 \cdot R$ критическое значение параметра Рэлея равно $W_{cr} = 3,85$ (напомним, что линейная теория дает для критического значения параметра Рэлея W величину $W_{cr} = 4$ [10]). Остается отметить, что проведенная оценка снижения критического значения параметра W за счет нелинейного взаимодействия скорее качественная, чем количественная, поскольку при $\varepsilon^2 \cdot b_m \approx \omega_m$ нарушается равномерность разложения (1).

Заключение. Учет поправок третьего порядка малости по амплитуде начального возмущения к амплитудам мод нелинейно-осциллирующей капли идеальной жидкости существенно расширяет спектр нелинейно возбуждающихся мод. Поправки к частотам осцилляций мод, рассчитанные в используемом третьем порядке малости, отрицательны, пропорциональны квадрату амплитуды начального возмущения и растут с увеличением номера моды и собственного заряда капли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tsamopoulos J.A., Brown R.A. Nonlinear oscillation of inviscid drops and bubbles // J. Fluid Mech. 1983. V. 127. P. 519 – 537.
2. Tsamopoulos J.A., Brown R.A. Resonant oscillations of inviscid charged drop // J. Fluid Mech. 1984. V. 147. P. 373 – 395.
3. Белоножко Д.Ф., Григорьев А.И. Нелинейные капиллярные колебания заряженной капли // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып.8. С. 45 – 52.
4. Ширяева С.О. Асимметрия нелинейного резонансного взаимодействия мод капиллярных осцилляций заряженной капли // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 22. С. 76 – 83.
5. Ширяева С.О. Нелинейные капиллярные колебания и устойчивость сильно заряженной капли при одномодовой начальной деформации большой амплитуды // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 2. С. 27 – 35.
6. Ширяева С.О. Нелинейные осцилляции заряженной капли при многомодовой начальной деформации равновесной формы // Изв. РАН. МЖГ. 2001. № 3. С. 163 – 174.
7. Ширяева С.О. Нелинейные осцилляции заряженной капли при начальном возбуждении соседних мод // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып.4. С. 15 – 22.
8. Жаров А.Н., Григорьев А.И., Ширяева С.О. О внутреннем нелинейном четырехмодовом взаимодействии капиллярных осцилляций заряженной капли // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 9. С. 75 – 82.
9. Ширяева С.О. О внутреннем резонансе мод нелинейно-осциллирующей объемно заряженной диэлектрической капли // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 2. С. 19 – 30.
10. Rayleigh Lord. On the equilibrium of liquid conducting masses charged with electricity // Phil. Mag. 1982. V. 14. P. 184 – 186.

Поступила 11.04.03

Summary

At the solution of the problem of a nonlinear axial – symmetric at arbitrary single-mode initial deformation of its equilibrium shape a correction to frequency of oscillation of initially excited mode, which has the second order of smallness and grows with the increase of mode number and value of the charge of drop was found. The presence of non-linear correction leads to the decrease of critical conditions of charged drop instability.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА КАПИЛЛЯРНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ

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

Капиллярные явления охватывают различные случаи равновесия и движения поверхности жидкости под действием сил межмолекулярного взаимодействия и внешних сил. Наиболее простое и распространенное капиллярное явление – впитывание жидкостей в капилляры, обусловленное смачиванием жидкостью внутренней поверхности канала. Молекулярные силы притяжения, действующие между молекулами твердого тела и жидкости, заставляют ее подниматься по стенке капилляра, что приводит к искривлению поверхности. Если на поверхность жидкости начинают действовать внешние силовые поля, в частности электрические поля (ЭП), то установившееся под влиянием действующего на жидкость поля тяжести и сил поверхностного натяжения равновесие нарушается и возникают различные виды объемных и поверхностных движений жидкости, в том числе и капиллярные волны, стремящиеся снова установить в системе новое состояние равновесия.

При равновесии трех соприкасающихся фаз в отсутствие ЭП поверхности их раздела устанавливаются таким образом, чтобы была равна нулю равнодействующая сил поверхностного натяжения, действующих на общую линию соприкосновения трех сред. Это условие приводит к тому, что поверхности раздела должны пересекаться друг с другом под углами (краевые углы) определяющимися значениями поверхностного натяжения.

Если поверхность раздела двух из трех способных к движению сред искривлена, то вблизи ее давления в обоих средах (жидкость – атмосферный воздух) различны. Эта разность давлений, часто называемая поверхностным давлением, при отсутствии внешних сил, в том числе и силы тяжести, определяется известной формулой Лапласа

$$p_1 - p_2 = \Delta p = \frac{2\sigma_{12}}{R}, \quad (1)$$

где p_1 и p_2 – давления в жидкости и паровоздушной среде, σ_{12} – поверхностное натяжение жидкости на границе с влажным воздухом, R – радиус средней кривизны поверхности мениска $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$, где R_1 и R_2 – радиусы кривизны мениска в двух взаимно перпендикулярных плоскостях сечения. Поверхностное давление Δp приводит в движение жидкость, а следовательно, и парогазовую смесь над ней. В результате в капилляре осуществляется перемещение двух фаз, то есть происходит массоперенос.

В общем случае величина σ_{12} может оказаться непостоянной вдоль поверхности (например, в результате непостоянства температуры или напряженности ЭП, концентрации адсорбированного вещества, неравномерного насыщения ионами и других причин). Тогда наряду с нормальной силой (исчезающей в случае плоской поверхности) появляется некоторая дополнительная сила, направленная тангенциально к поверхности [1].

$$f_t = \nabla \sigma_{12}. \quad (2)$$

В (2) градиент взят со знаком плюс, а не минус, как в случае объемной силы $-\nabla p$, в связи с тем, что силы поверхностного натяжения стремятся уменьшить площадь поверхности, между тем как силы внутреннего давления стремятся увеличить объем тела.

Таким образом, при неравномерном распределении по мениску поверхностного натяжения возникает движение в поверхностном слое жидкости, которое вследствие существования вязкости передается вглубь жидкости, приводя ее в объемное движение. Кроме того, деформации поверхности мениска под влиянием различных внешних воздействий, в том числе и ЭП, в особенности разрядных полей, выводят поверхность жидкости из равновесного состояния. При этом вступают в действие восстанавливающие равновесные силы: поверхностного натяжения и гравитационные. В результате

возникают волны на поверхности жидкости, которые могут быть как бегущими (свободная бесконечная поверхность), так и стоячими (ограниченная стенками капилляра поверхность). Если доминируют силы поверхностного натяжения, то возникают капиллярные волны, в противоположном случае – гравитационные волны. При совместном действии этих сил реализуются гравитационно-капиллярные волны. Волны той или иной природы вследствие действия сил вязкости проникают на определенную глубину в жидкость, вызывая ее колебательное движение. В общем случае, при любых нарушениях под влиянием внешних воздействий кривизны мениска происходит изменение капиллярного давления (1). При этом столбик жидкости выходит из равновесного положения (нарушается состояние гетерогенной системы) и возникающие релаксационные процессы вызывают колебательные движения столбика с различными амплитудами и частотами.

При вертикальном положении капилляра в гравитационном поле и отсутствии внешних воздействий равновесие столбика высотой h чистой жидкости наступит в случае равенства гидростатического и лапласовского давлений. При этом

$$-\Delta p = (\rho_1 - \rho_2)gh = -2\sigma_{12}/R, \quad (3)$$

где ρ_1 и ρ_2 – плотности жидкости 1 и газа 2, g – ускорение свободного падения. При этом, если считать поверхность мениска сферической, то $R = -r/\cos\theta$, где r – радиус капилляра, θ – краевой угол, образуемый поверхностью жидкости со стенками капилляра. Из уравнения (3) можно получить так называемую капиллярную постоянную a , величину, характеризующую размеры системы $L < a$, при которых становятся существенными капиллярные явления:

$$a = \sqrt{\frac{2\sigma_{12} \cos \theta}{(\rho_1 - \rho_2)g}}. \quad (4)$$

Для воды при температуре 293 К $a = 3,8$ мм. Следовательно, если радиус капилляра $r = L$ будет больше 3,8 мм, то искривленные возле противоположных стенок участки поверхности воды уже не перекрываются и поднятие жидкости прекращается. Таким образом, форма поверхности жидкости определяется только этой величиной. Если капиллярная постоянная велика (по сравнению с радиусом капилляра), то при определении формы поверхности жидкости можно пренебречь полем тяжести [1]. Капиллярная постоянная a входит во многие расчетные формулы. Например, посредством ее определяют форму поверхности жидкости, находящейся в поле тяжести и соприкасающейся с вертикальной стенкой, а также форму поверхности жидкости, поднявшейся между двумя вертикальными параллельными пластинками. Используя ее значение, классифицируют поверхностные волны на гравитационные, капиллярные и капиллярно-гравитационные, определяют их длину и скорость распространения. Капиллярная постоянная выступает в качестве критерия при определении величины радиуса малой капли, когда можно пренебречь влиянием на ее форму гравитационных сил [2].

Следуя [1], рассмотрим теперь общие условия равновесия на поверхности жидкости, находящейся в поле тяжести. Давление атмосферы на протяжении длины столбика жидкости в капилляре можно считать постоянным. При этом жидкость представляется несжимаемой. Следовательно, имеем $p_2 = \text{const}$, а давление $p_1 = \text{const} - \rho_1 gz$ (координата z отсчитывается вертикально вверх). Тогда условие равновесия приобретает вид

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{g\rho_1}{\sigma_{12}} z = \text{const}. \quad (5)$$

Для определения равновесной формы поверхности жидкости в конкретных случаях обычно бывает удобным пользоваться условием равновесия не в виде (5), а непосредственно решая вариационную задачу о минимуме полной свободной энергии. Свободная внутренняя энергия жидкости зависит только от объема, но не от формы поверхности. От формы зависит, во-первых, поверхностная свободная энергия $\int \sigma_{12} ds$ и, во-вторых, энергия во внешнем поле (поле тяжести), равная $g\rho_1 \int z dV$. Тогда условие равновесия можно написать в виде

$$\sigma_{12} \int ds + g\rho_1 \int z dV = \min. \quad (6)$$

Определение минимума должно производиться при дополнительном условии, $\int dV = \text{const}$, выражающем неизменность полного объема жидкости.

Как видно, величины σ_{12} , ρ и g входят в условия равновесия (5) и (6) только в виде отноше-

ния $\sigma_{12}/g\rho_1$, если не учитывать плотность пара ρ_2 (в обычных условиях $\rho_2 \ll \rho_1$). Комбинация величин

$$\frac{2\sigma_{12} \cos \theta}{g(\rho_1 - \rho_2)} = a^2, \quad (7)$$

называется капиллярной постоянной Лапласа [2]. Капиллярные явления впервые были открыты и исследованы Леонардо да Винчи в опытах с капиллярными трубками. Это отношение имеет размерность квадрата длины. Согласно [3], $a^2 = rh$, где h – высота поднятия жидкости в капилляре. При 293 К для воды на границе с собственным паром или с влажным воздухом постоянная Лапласа равна $1,49 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$. Эта постоянная является физико-химической константой данной жидкости или, точнее, данной поверхности раздела жидкость – пар и не зависит от формы прибора, размера трубки и материала ее стенок. В [4] показано, что внешние НЭП существенно влияют на высоту поднятия воды h_e в широких цилиндрических макрокапиллярах или в так называемых капиллярных трубках. Под ними будем понимать макрокапилляры с такими внутренними радиусами, когда гидростатическое давление столбика жидкости сравнимо или больше лапласовского давления. При этом необходимо учитывать влияние силы тяжести с ускорением g , то есть условие $2\sigma_{12}\cos\theta/r \leq \rho_1gh$.

В связи с изменением высоты поднятия жидкости в капиллярной трубке под действием НЭП изменится и величина a^2 . Это указывает на изменение свойств воды в капилляре и самого явления капиллярности, возникших в результате действия поля. Наложение ЭП оказывает влияние на электрические свойства влажного диэлектрика вследствие перераспределения в капиллярах и порах как формы, так и положения газовых или жидкостных включений. Согласно [5], при воздействии ЭП помимо обычных капиллярных сил появляются дополнительные силы электрического происхождения. Вызываемые этими силами явления носят общее название электрокапиллярных. К ним можно отнести эффекты Эвершеда и Фарадея – Сумото. Последний касается диэлектрических жидкостей. Изменение высоты столбика жидкости может быть очень значительным, кроме того, при высоких напряжениях явление осложняется фонтанированием и бурным кипением жидкости.

В связи с важностью описания капиллярных явлений, происходящих в условиях действия внешних неоднородных ЭП, целью данной работы явилось изучение поведения величины a в зависимости от напряженности E неоднородного ЭП в капиллярной трубке.

В состоянии равновесия высота столбика жидкости в вертикальном капилляре, находящемся в неоднородном постоянном ЭП, будет определяться из условия [4]

$$h_e = \frac{2\sigma_{12e} \cos \theta_e}{r((\rho_1 - \rho_2)g - (0,5\varepsilon_0(\varepsilon - 1)\nabla E^2 + \rho_c E))}. \quad (8)$$

Эксперименты по определению величин h_e при различных E и ∇E^2 проведены на отдельных кварцевых капиллярах с радиусами 0,1 – 5 мм.

Калибровка и условия подготовки капилляров к опытам не отличаются от описанных в [1, 6 – 8]. Для исследования пропитки установленных вертикально капилляров под воздействием постоянного неоднородного ЭП использовалась установка, схема которой приведена в [6]. Неоднородное ЭП создавалось совокупностью электродов игла – плоскость. Отличие состояло лишь в том, что нижний электрод в виде вольфрамовой фольги опускался в широкий фторопластовый сосуд с водой, а конец заостренного верхнего игольчатого электрода из вольфрамовой проволоки, толщина которой составляла 0,2 от внутреннего диаметра капилляра, располагался в устье капилляра. Для опытов использовался бидистиллят воды с первоначальной удельной электропроводностью в равновесии с воздухом $\sigma = 5,9 \cdot 10^{-4} \text{ См/м}$. После опускания в воду металлического электрода осуществлялся процесс его растворения и, естественно, вода превращалась в электролит. Он имел ту или иную концентрацию ионов вольфрама, а также ионов, привнесенных с воздуха, которые избирательно адсорбируются на поверхности мениска и поверхности, прилегающей к нему пленки воды. Диссоциация ОН-групп обуславливает заряд поверхности кварца [9]. Поверхностное и объемное насыщение воды ионами происходит и при существовании в капилляре коронного разряда (КР) или искрового разряда (ИР), а также при электролизе воды и набухании поверхностного слоя кварца в случае длительного контакта с водой. После окончания опытов электропроводность воды была на уровне водопроводной и составила $5,2 \cdot 10^{-2} \text{ См/м}$.

Впитывание воды в капилляр осуществлялось в термостатируемой камере, где колебания температуры не превышали 0,5 К. Наблюдение за положением мениска жидкости в капилляре велось с помощью микрокатетометра КМ-8 через переднюю прозрачную стенку камеры при боковом освещении.

щении капилляра. Координата мениска определялась с точностью ± 3 мкм.

При наличии ЭП за счет увеличения E и ∇E^2 , а также плотности свободных зарядов ρ_c , высота h_e подъема воды в капилляре растет. Изменение уровня жидкости под воздействием неоднородного ЭП успешно используется в электрогидродинамических устройствах автоматики [10].

Эти выводы касаются доразрядных ЭП, а следовательно, обратимых равновесных процессов, когда с выключением ЭП, уровень жидкости быстро релаксирует к жюреновскому:

$$h = \frac{2\sigma_{12} \cos \theta}{r(\rho_1 - \rho_2)g}. \quad (9)$$

Формула (8) применима лишь к грубым макрокапиллярам, когда пондеромоторные силы сравнимы с капиллярными и зависимостью величин σ_{21} и $\cos \theta$ от параметров ЭП можно пренебречь.

Ситуация кардинальным образом меняется с переходом в область разрядных ЭП. С появлением коронного разряда поверхности объемной и пленочной жидкости, примыкающие к мениску, а также стенки капилляра насыщаются ионами, имеющими знак потенциала коронирующего электрода. На них действуют противоборствующие силы электростатического давления $0,5\varepsilon_0\varepsilon E^2$, поверхностного натяжения и коронного ветра (КВ). С увеличением E сложным образом изменяются все межфазные поверхностные натяжения [5 – 8]. За счет неоднородных по длине капилляра концентраций поляризационных и свободных зарядов возникает дополнительное к внешнему неоднородное ЭП с градиентом, направленным к устью капилляра. Это приводит к вытягиванию в том же направлении макроскопической толщины смачивающей пленки. Этому способствуют и случайные во времени продавливания КВ мениска [11]. Поэтому с ростом E разрядного поля свободное сечение капилляра уменьшается, что приводит к дополнительному подъему жидкости. Эти конкурирующие процессы приводят к сложным колебаниям жидкости относительно исходного уровня.

С последующим увеличением E , а следовательно, и ∇E^2 , а также плотности тока возрастает давление КР и возникают новые эффекты, в частности электромеханические (диспергирование смачивающей пленки), звуковые и тепловые. Звуковые могут содействовать подъему жидкости по механизму [12], а тепловые высушивают смачивающую пленку и уменьшают величину σ_{21} . С переходом КР в интенсивный разряд, когда возле острия электрода начинают зарождаться стримеры и достигают мениска, в столбике воды появляются парогазовые пузырьки. Это приводит к довольно резкому уменьшению ρ_1 и увеличению ρ_2 , что уменьшает разность этих величин в знаменателе (8), а, следовательно, ведет к такому же резкому увеличению h_e .

Дальнейшее повышение напряжения вызывает ИР. Пробой разрядного промежутка осуществляется между металлическим электродом и точкой на поверхности деформированного мениска, соответствующей максимальной напряженности ЭП. При этом происходят не только кавитационные и электроэрозионные явления на поверхности твердой фазы [13], но появляются и существенные электрохимические изменения свойств жидкой фазы [14]. Действительно, при насыщении дистиллированной воды продуктами газового разряда, а также эрозии нижнего электрода и стенок капилляра, она превращается в концентрированный электролит. В его объеме под влиянием электрического тока протекают сложные физико-химические процессы, в результате которых происходят такие превращения, как коагуляция и флокуляция частиц, изменение валентности ионов при окислительно-восстановительных реакциях с участием примесей воды, формирование твердой и газовой фаз, деструкция соединений и так далее. Физико-химическое состояние электролита определяют также продукты электродных реакций. При миграции продуктов вглубь раствора происходит их химическое взаимодействие с примесями или водой. Это изменяет окислительно-восстановительные и протолитические реакции, приводящие к изменению pH и Eh раствора. При электролизе образуются растворимые продукты, а также газовая и твердая фазы. Начальная паровоздушная фаза также насыщается разнообразными продуктами газового разряда, включая и значительную концентрацию озона. Эти продукты реакционноактивны и поэтому определенное время в газовой фазе и на поверхностях остальных двух фаз могут осуществляться химические реакции.

Таким образом, после прекращения действия разрядного ЭП все три фазы капиллярной системы по своим свойствам далеко уходят от первоначально равновесного состояния. Неравновесность нового состояния вызывает интенсивные релаксационные процессы, стремящиеся вернуть систему в целом и столбик жидкости в частности в исходное положение. Поэтому не только за счет быстроменяющегося пространственного положения уровня жидкости при воздействии разряда, но и наличия после отключения поля быстротекущих релаксационных процессов фиксация положения

мениска начиналась спустя 5 минут. За это время быстротекущие колебательные процессы практически прекращались, и положение мениска стабилизировалось.

В работе [4] представлены некоторые из полученных зависимостей $h_e/h(E)$ для воды в капиллярных трубках разных радиусов от 0,1 до 5 мм. Умножая числитель и знаменатель на одно и то же значение радиуса выбранного капилляра, получим отношение

$$\frac{a_e^2}{a^2} = \frac{(\sigma_{12e} \cos \theta_e)(\rho_1 - \rho_2)g}{((\rho_1 - \rho_2)g - (0,5\varepsilon_0(\varepsilon - 1)\nabla E^2 + \rho_c E))(\sigma_{12} \cos \theta)}, \quad (10)$$

которое носит качественный характер, поскольку ряд параметров зависят от E ЭП. Это прежде всего относится к величинам, отмеченным нижним индексом e , а также к ρ_1 и ρ_2 , которые существенно и сложным образом изменяются в разрядных полях в силу описанных выше процессов. В настоящее время вид этих зависимостей неизвестен. Поэтому воспользуемся экспериментальными зависимостями $h_e/h(E)$ и представим уравнение (10) в виде

$$\frac{a_e^2}{a^2} = \frac{h_e r}{hr}, \quad (11)$$

откуда

$$a_e^2 = \frac{h_e}{h} a^2. \quad (12)$$

Но поскольку отношение h_e/h , как показано в [4], существенно зависит от r , то, естественно, и величина a_e^2 будет функцией r капилляра.

На рис. 1 представлены графические зависимости $a_e^2(E)$ для воды в капиллярах разных радиусов, откуда видно, что для одних и тех же радиусов кривые $a_e^2(E)$ и $h_e/h(E)$, представленные на рис. 1 в работе [4], симбатны. Следовательно, между глубиной изменения физико-химических свойств воды под воздействием ЭП и высотой ее подъема при фиксированном радиусе капилляра после прекращения действия поля существует прямая корреляция. Поскольку для кварца краевой угол весьма мал, к тому же кварц термо- и химически стойкий, механически прочен, то, видимо, он мало подвержен эрозии под воздействием слаботочных разрядных ЭП. Таковыми можно считать поля до максимумов зависимостей $h_e/h(E)$ и $a_e^2(E)$. Это означает, что дополнительный подъем воды в ЭП и длительное сохранение уровня воды в капилляре после выключения поля обусловлено прежде всего существенными изменениями физико-химических свойств воды под влиянием слаботочных разрядных полей. Время релаксации τ_p , то есть промежуток времени, в течение которого высота столбика уменьшается в 2,71 раза, прямо пропорционально отношению $E/E_{кр}$ и составляет примерно 20 суток при E , которые соответствуют максимумам указанным кривым. Как видно из рис. 1, только начиная с напряженностей $3,5 \cdot 10^6$ В/м, заметно возрастает a_e^2 . Для несколько меньших значений E поле лишь на 3 – 5% повышает значение капиллярной постоянной Лапласа. При этом зависимости $a_e^2(E)$ близки к линейным. Это свидетельствует о практической обратимости процессов, а также свойств воды в области доразрядных ЭП. Чем выше напряженность ЭП, тем круче идут зависимости $a_e^2(E)$, приближаясь к характерному для каждого радиуса максимуму. Эти зависимости характерны для необратимых высокоинтенсивных процессов, далеко уводящих систему от первоначального состояния равновесия, а следовательно, и свойств воды. Заметное расхождение кривых происходит при достижении напряжений $E_{кр}$. Для широких капилляров $E_{кр}$ определяется формулой Пика, для более узких, начиная с $r < 0,5$ мм, наблюдаются увеличения $E_{кр}$ по сравнению с определяемыми по формуле Пика. Это связано с ограниченностью пространства, необходимого для развития внешней зоны КР.

Для одинаковых значений E влияние поля проявляется сильнее при впитывании в капилляры с большими радиусами вплоть до $r = 3,8$ мм. Дальнейшее увеличение r ведет к уменьшению влияния поля. Это, по-видимому, можно объяснить падением капиллярного давления с увеличением r и ростом относительной роли ЭП, поскольку величина объемных электрических сил не зависит от r для широких капилляров. При $r > 3,8$ мм капиллярное всасывание вырождается и взаимодействие трех соприкасающихся фаз, а также влияние ЭП на это взаимодействие не может уже столь существенно изменить уровень и физико-химические свойства большой массы воды в очень широкой капилляр-

ной трубке. Для $r_0 \rightarrow \infty$ уравнение (8) не теряет физического смысла. Действительно, при относительной влажности воздуха, близкой к единице, по стенкам широкого сосуда вода все же подымается, поскольку под влиянием неоднородного ЭП изменяется величина движущей силы $\Delta\sigma$ [15]:

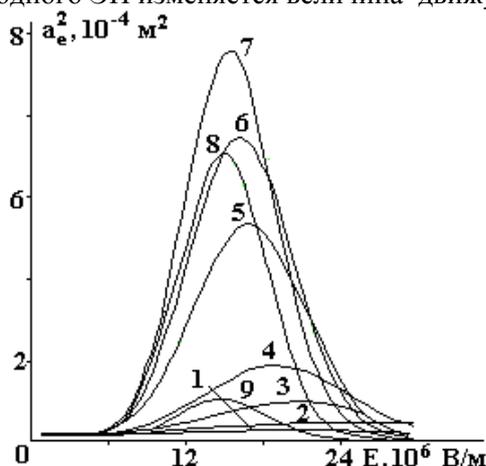


Рис. 1. Зависимость величины капиллярной постоянной Лапласа для воды в кварцевых макрокапиллярах разных радиусов r , мм: 1 – 0,1; 2 – 0,5; 3 – 1; 4 – 1,5; 5 – 2,5; 6 – 3; 7 – 3,8; 8 – 4,5; 9 – 4,95 от напряженности ЭП

$$\Delta\sigma = K(\sigma_{32} - \sigma_{31}) - \sigma_{12}. \quad (13)$$

Здесь K – коэффициент шероховатости, определяемый уравнением Дерягина – Венцеля

$$K = \cos\theta_{\text{ш}} / \cos\theta, \quad (14)$$

$\theta_{\text{ш}}$ – равновесный краевой угол на шероховатой поверхности. Так как всегда $K > 1$, то $|\cos\theta_{\text{ш}}| > |\cos\theta|$. При смачивании $\cos\theta > 0$, поэтому шероховатость, увеличивая $\cos\theta$, уменьшает угол смачивания, то есть улучшает смачивание, а следовательно, способствует повышению уровня жидкости.

Поверхностные явления удобно классифицировать в соответствии с объединенным уравнением первого и второго начал термодинамики. Для рассматриваемой гетерогенной системы оно может быть записано в следующей форме:

$$dG = -SdT + Vdp + \sigma ds + \sum \mu_i dn_i + \varphi dq. \quad (15)$$

Уравнение (15) выражает приращение энергии Гиббса dG при бесконечно малом переходе системы в новое положение равновесия. Из него следует, что поверхностная энергия ($G^s = \sigma s$) и в частности σ (при $s = \text{const}$) может изменяться за счет привнесения в систему различных видов энергии: тепловой, механической, химической и электрической. Превращения различных видов энергии сопровождаются такими явлениями, как изменение адгезии и смачивания, капиллярности, адсорбции, электрического состояния и реакционной способности с изменением дисперсности составных частей гетерогенной системы. Уравнение (15) также показывает, что изменение состояния равновесия системы в ЭП возможно при изменении величины ее электрического заряда dq . Последнее можно осуществить либо за счет возникновения связанных зарядов (при поляризации фаз), либо при внесении в них свободных зарядов (при растворении, диссоциации, насыщении ионами при воздействии разрядных полей). Изменения при этом межфазных натяжений и свойств самих фаз приведут к изменениям положения уровня и состава воды в капиллярах. В [16] на основе метода Онзагера показано, что наличие внешнего ЭП может приводить к увеличению или уменьшению концентрации носителей тока (ионов в случае электролитов, электронов и дырок в полупроводниках) у границ сред, что приводит к уменьшению или увеличению коэффициента поверхностного натяжения растворов электролитов и твердых тел (полупроводников и даже металлов). При изменении величины и направления поля возможны изменения не только величины, но и знака $\Delta\sigma$. При этом могут возникать колебания жидкости или кристаллических пластинок, связанные с зависимостью коэффициента поверхностного натяжения от внешних полей. В [17] термодинамические уравнения для неоднородной системы с плоским поверхностным слоем обобщены для случая произвольно направленного внешнего неоднородного ЭП. В результате получены зависимости поверхностного натяжения жидкостей, в том числе и воды, на границе с насыщающим паром как от величины, так и от направления поля. Там же указано на изменение двухфазного равновесия в этом случае.

Приведенные соображения, базирующиеся на положениях классической термодинамики, показывают, что возможны изменения высоты подъема воды за счет изменения ее свойств в макрокапиллярах при воздействии внешних ЭП.

Существование максимумов на кривых зависимостей $a_e^2(E)$, в особенности четко выраженных для капилляров с большими радиусами, свидетельствует о смене механизмов влияния при значительном увеличении E внешнего ЭП на свойства взаимодействующих фаз. Значения E_m , отвечающие максимумам указанных кривых, соответствуют переходу слаботочного КР в сильноточный ИР. Постепенное превращение КР в ИР влечет за собой уменьшение насыщения ионами поверхностей твердой и жидкой фаз. Это равносильно уменьшению центров дальнедействующих пондеромоторных сил, удерживающих макроскопические пленки воды на внутренней поверхности капилляра и дополняющих лапласовы силы на поверхности мениска, ответственные за подъем жидкости в капилляре. Это обуславливает постепенное снижение уровня жидкости h_e в капилляре, а следовательно, a_e^2 , после прекращения действия поля, хотя напряженность его была гораздо выше значения E_m . Вместе с тем развитие интенсивного ИР при дальнейшем увеличении E ($E > E_m$) приводит к значительной электроэрозии внутренней поверхности капилляра, внедрению в нее “отравляющих” продуктов в виде разнообразных химических соединений, образующихся в воздухе и воде под действием ИР. Разогрев поверхности канала капилляра ведет к удалению таких мощных адсорбционных центров, как групп ОН, взаимодействующих с молекулами воды по механизму водородных связей. Согласно [18], разупрочняющее влияние плазмы газового разряда увеличивается по мере роста напряжения разряда и обусловлено разогревом поверхности стекла, десорбцией воды из поверхностного слоя стекла, а также химическим взаимодействием частиц плазмы с компонентами стекла. Все это стимулирует развитие гидрофобизации поверхности твердой фазы, а следовательно, и водоудерживающей способности стенок капилляра. Толщина смачивающих пленок воды резко уменьшается, а с ней увеличивается просветность жидкостного канала, что ведет к снижению высоты столбика воды в капилляре после снятия действия поля. Вторая часть кривой $a_e^2(E)$ уже не может в полной мере быть совокупностью физико-химических констант данной жидкости при разных E поля или, точнее, данной поверхности раздела жидкость – пар и не зависит от формы прибора, размера трубки и материала ее стенок. Теперь она также характеризует изменение значения краевого угла θ_e смачивания за счет изменения всех трех величин поверхностных натяжений в законе Юнга под влиянием мощного ЭП ИР

$$\cos \theta_e = \frac{\sigma_{32e} - \sigma_{31e}}{\sigma_{12e}}, \quad (16)$$

где σ_{32e} – поверхностное натяжение твердой фазы на границе с влажным воздухом в ЭП; σ_{31e} – поверхностное натяжение твердого тела, контактирующего с водой в ЭП.

Поскольку величина θ характеризует молекулярное взаимодействие трех фаз при равновесии между ними, то величина изменения θ_e в ЭП определяет новое положение жидкости в капилляре. Падение значений a_e^2 обусловлено коренным изменением свойств приповерхностного слоя твердой фазы, а с ними и адгезионной способности по отношению к воде, что приводит к уменьшению $\cos \theta_e$ [18, 19]. Следовательно, воздействие ИР приводит к гидрофобизации поверхности плавленого кварца.

В [20] отмечается, что вода является ассоциированной жидкостью. Вследствие сильного взаимодействия через водородные связи молекулы воды образуют «мерцающие группы», имеющие некоторую упорядоченную структуру. Между этими группами находится менее структурированная жидкость. Упорядочению структуры препятствует тепловое движение молекул, а также различные примеси в воде (газы, ионы, коллоидные частицы и так далее), образующиеся под воздействием ИР. С увеличением примесей упорядоченность структуры воды уменьшается, так как увеличивается влияние ЭП ионов, молекул растворенного вещества и коллоидных частиц на сетку водородных межмолекулярных связей. С изменением количества или дисперсности примесей в воде изменяется ее структура и соответственно некоторые ее физико-химические свойства. В свою очередь изменение структуры воды оказывает влияние на интенсивность физико-химических и биологических процессов в подвижных водных средах.

Под влиянием ЭП происходит агрегирование находящихся в растворе или суспензии частиц и пузырьков газа. Скоагулированные частицы осаждаются, а микропузырьки газа коалесцируют и выносятся из объема жидкости, что также приводит к изменению структуры воды. Причиной коагуляции и коалесценции является снижение ионно-электростатического барьера отталкивания. На движущуюся в ламинарном потоке частицу, имеющую двойной электрический слой ионов, действует

внешнее ЭП, что обуславливает локальный сдвиг противоионов из диффузного в слой Штерна. Часть из них адсорбируется на поверхности частицы или границе газовой пузырьки – жидкость. Это приводит к снижению штерновского потенциала и соответственно ионно-электростатического барьера отталкивания, что способствует агрегированию частиц и микропузырьков газа. Адсорбированные ионы со временем переходят в раствор и гидратируются. Время восстановления первоначального распределения ионов в двойном электрическом слое определяет “время памяти” водной системы после электрической обработки.

Падение адсорбционной способности стенок капиллярной трубки по отношению к молекулам воды, как видно из рис. 1, при $E \gg E_m$ приводит к такой потере смачивающих свойств, что $\cos\theta_e$ приобретает все меньшие значения и величина $a_e^2(E)$ опускается ниже исходного значения, то есть становится меньше величины a^2 без поля. Для широких капилляров a_e^2 сравнительно быстро стремится к нулю. Чем уже капилляр, тем при более высоких $E \gg E_m$ наблюдается это явление. С уменьшением радиуса капилляра происходит размывание максимумов, а само значение E_m стремительно смещается в область более высоких напряженностей. Это связано с тем, что с уменьшением диаметра капилляра для возникновения и развития КР и ИР нужно резко увеличивать напряженность ЭП, поскольку объем зоны ионизации сокращается обратно пропорционально кубу радиуса. Поэтому возникновение и переход КР в ИР в узких капиллярах происходит при гораздо больших напряженностях, чем в капиллярах с большими диаметрами. При дальнейшем сужении канала капилляра КР может вообще не возникнуть. В таких капиллярах существенно затрудняется и возникновение ИР, поскольку образованию проводящего канала между электродами предшествует развитие электронной лавины. Когда диаметр капилляра становится меньше головки лавины, стенки его препятствуют процессу развития разряда. Поэтому требуются дополнительные затраты энергии, выражающиеся в увеличении пробивной напряженности $E_{пр}$ [21, 22].

Из уравнения (4) и (7) видно, что поскольку капиллярная постоянная $a = \sqrt{a^2}$, то и $a_e = \sqrt{a_e^2}$. В этом случае a_e уже будет определять характерный размер капиллярной системы $L_e \leq a_e$, при котором становятся существенными капиллярные явления в ЭП. Напомним, что для воды при $E = 0$ и температуре 293 К $a = 3,8$ мм. Следовательно, если $a_e > a$, то и критический радиус капилляра $r = L_e$ уже будет больше 3,8 мм. Поскольку, как видно с рис. 1, величина a_e^2 зависит от r , то, естественно, и величина a_e будет функцией r капилляра, хотя согласно выражениям (10), (12), величина a_e^2 явным образом не должна зависеть от r . Видимо, величины, входящие в эти выражения и не зависящие от r при отсутствии поля или при малых напряженностях его, становятся существенно зависимыми от r в области разрядных ЭП. В этом случае процессы и параметры, их описывающие, становятся сильно неравновесными, и после выключения поля для проведения измерений они имеют иные значения, соответствующие совершенно другому состоянию рассматриваемой гетерогенной системы. Но явный вид этих зависимостей в настоящее время неизвестен. Возможно с целью избавления от зависимости a_e от r , сильно усложняющей расчеты капиллярных явлений в ЭП, необходимо усреднить данные рис. 2 и отнести их к некоторому эффективному радиусу $r_{эф}$.

Тем не менее, физический смысл кривых, представленных на рис. 2, состоит в том, что искривленные возле противоположных стенок капиллярной трубки с $r > 3,8$ мм участки поверхности воды, находящейся в ЭП, будут перекрываться и поднятие жидкости становится неизбежным. Как видно из рис.2, при значении $r = 4,95$ мм и наличии ЭП действительно $a_e > a$ и наблюдается заметный подъем жидкости [4]. В наших опытах слабое капиллярное всасывание в ЭП наблюдалось при диаметре капилляра равном 20 мм и более. Следовательно, и в таких широких капиллярах после выключения внешнего поля продолжает существовать очень сильное внутреннее поле, обусловленное значительной поверхностной концентрацией зарядов. В [19] указывается, что по сравнению с металлами и полупроводниками исследование изоляторов, к которым принадлежит и аморфный кварц, сопровождается дополнительными экспериментальными трудностями, связанными с существованием электростатического заряда, образующегося на поверхности диэлектрика в процессе имплантации ионов и электронов при электронно-ионной бомбардировке этой поверхности. При этом образуются различные дефекты, как точечные, так и протяженные. Внутреннее ЭП, напряженность которого может значительно превышать E внешнего поля после его выключения [10], удерживает на противоположных стенках макроскопические пленки воды такой толщины, что они обеспечивают радиус жидкостного канала несколько меньший величины характеристической капиллярной постоянной без по-

ля. Отметим, что в в работе [23] для передпробивной стадии электрического разряда под действием ЭП под металлическим электродом с полированной полусферической поверхностью диаметром 2,7 мм наблюдался подъем водного электролита в сосуде с $r_0 \rightarrow \infty$. При этом поверхность электролита принимала конусообразную форму, и электрический пробой разрядного промежутка осуществляется между электролитным “острием” и металлическим электродом.

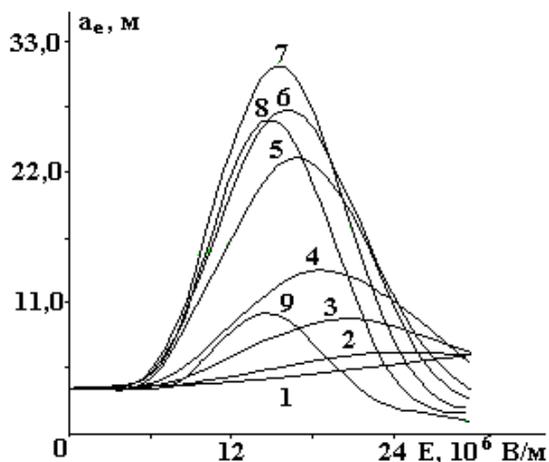


Рис. 2. Зависимость величины капиллярной постоянной для кварцевых макрокапилляров разных радиусов r , мм: 1 – 0,1; 2 – 0,5; 3 – 1; 4 – 1,5; 5 – 2,5; 6 – 3; 7 – 3,8; 8 – 4,5; 9 – 4,95 от напряженности

Таким образом, неоднородные ЭП, в особенности слаботочные разрядные поля, способны существенным образом влиять на подъем воды, а следовательно, и на величину капиллярной постоянной a в широких капиллярах. Благодаря взаимодействию в данном капиллярном явлении трех фаз и воздействию на них внешнего неоднородного ЭП, особенно разрядного, уводящего оводненную гетерогенную систему далеко от первоначального равновесного состояния за счет значительного изменения поверхностных и объемных свойств ее фаз, и в первую очередь жидкой фазы, происходит значительный подъем воды в широких макрокапиллярах. Это обуславливает увеличение капиллярной постоянной a . Естественно, что величина a_e , так же как a_e^2 , в области высоких напряженностей ЭП ($E > 5 \cdot 10^6$ В/м) существенно зависит от радиуса капиллярной трубки в силу вышеуказанных причин. Резкое падение величины a_e при ($E > E_{кр}$) указывает на интенсивную гидрофобизацию внутренней поверхности канала капилляра в присутствии ИР. Это снижает поверхностные натяжения жидкой и твердой фаз, а также косинус краевого угла за счет рассмотренных ранее факторов, изменяет форму поверхности мениска, а также приводит к разогреву фаз данной гетерогенной системы и, следовательно, теплообмену между ними. Эти процессы и обуславливают значительное смещение состояния равновесия в рассматриваемой капиллярной системе.

В [24] отмечается, что несмотря на исключительное разнообразие существующих процессов переноса, для них характерно одно фундаментальное свойство: эти процессы направлены на нейтрализацию внешних воздействий, выводящих ту или иную систему из состояния равновесия (принцип Ле Шателье – Брауна). Любая физическая система обладает некоторой инерцией, связанной со специфическими для данной системы внутренними процессами, разыгрывающимися при нарушении равновесия и характеризующимися своими параметрами. Стремление системы к равновесию, следствием которого являются наблюдаемые процессы переноса, в результате которых происходит изменение положения жидкой фазы в капилляре, можно рассматривать как совокупность процессов релаксации внутренних параметров гетерогенной системы. Видимо, в качестве таких параметров при впитывании воды в капиллярные трубки, которые находятся во внешнем НЭП, можно использовать так называемые капиллярные постоянные. В сильных ЭП они значительно изменяют свою величину, ибо в них входит комплекс основных параметров, описывающих капиллярные явления. Для устранения значительных погрешностей при сложных изменениях капиллярных постоянных в разрядных полях необходимо учитывать их в расчетах капиллярных явлений.

Понятно, что высказанные здесь соображения потребуют дальнейшей проверки и уточнения. Но вся совокупность данных укладывается в некоторую взаимосвязанную физическую картину капиллярных явлений в сильных ЭП. Автор надеется на привлечение интереса специалистов в данной конкретной области поверхностных явлений к использованию полученных результатов при объяснении происходящих процессов в заполненных водой широких макрокапиллярах как в присутствии полей, так и после прекращения их действия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М., 1986.
2. Байбаков В.С., Рязанцев П.П., Сафронов В.П., Щербаков Л.М. Определение величины равновесного краевого угла по параметрам малой капли, сидящей на нити // Исследования в области поверхностных сил // Сборник докладов III конференции по поверхностным силам. М., 1967.
3. Физический энциклопедический словарь. М., 1962. Т.2. С. 278 – 279.
4. Полищук Н.В., Панченко И.М., Панченко М.С., Карпович И.М. Эффекты воздействия и последствия электрических полей на поднятие воды в макрокапиллярах // Электронная обработка материалов. 2002. № 4. С. 54 – 67.
5. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов. М., 1982.
6. Карпович И.Н., Панченко М.С., Панасюк А.Л., Чураев Н.В. Влияние неоднородных электрических и магнитных полей на впитывание жидкости капиллярно – пористыми телами // Электронная обработка материалов. 1982. № 4. С. 62 – 66.
7. Карпович И.Н., Чураев Н.В., Панченко М.С., Панасюк А.Л. Ускорение капиллярной пропитки внешним неоднородным электрическим полем // Коллоидный журнал. 1982. Т. XLIV. № 6. С. 1044 – 1050.
8. Карпович И.Н., Чураев Н.В., Панченко М.С. Влияние поля коронного разряда на испарение жидкостей из капилляров // Инженерно–физический журнал. 1981. Т. XLI. № 6. С. 1049 – 1056.
9. Ершов А.П., Зорин З.М., Соболев В.Д., Чураев Н.В. Кинетика движения пузырька газа в капилляре // Коллоидный журнал. 2001. Т. 63. № 2. С. 200 – 207.
10. Денисов А.А., Нагорный В.С. Электрогидро- и электрогазодинамические устройства автоматики. Л., 1979.
11. Бабеня Л.А., Головейко А.Г., Новикова В.И. и др. Интенсификация испарения жидкостей под действием слаботоочного высоковольтного разряда // Инженерно–физический журнал. 1986. Т. L. № 6. С. 951 – 959.
12. Кардашев Г.А., Соболев В.Д., Чураев Н.В., Шаталов А.Л. Влияние колебаний на уровень жидкости в капилляре // Коллоидный журнал. 1976. Т. XXXVIII. № 3. С. 461 – 466.
13. Намитоков К.К. Электроэрозионные явления. М., 1978.
14. Рогов В.М., Филиппук В.Л. Электрохимическая технология изменения свойств воды. Л., 1989.
15. Биховський А.І. Деякі випадки застосування електрокапілярності // Український хімічний журнал. 1974. Т. 40. № 5. С. 478 – 482.
16. Иоффе И.Ф. О влиянии внешних полей на термодинамические свойства растворов и поверхностное натяжение // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1969. Т. 57. Вып. 2(8). С. 529 – 533.
17. Бродская Е.Н., Русанов А.И. О влиянии произвольно направленного электрического поля на поверхностное натяжение жидкостей // Коллоидный журнал. 1983. Т. XLV. № 4. С. 636 – 643.
18. Пух В.П., Байкова Л.Г., Иванов–Омский В.И., Звонарева Т.К. Влияние ионной бомбардировки на прочность стекол // Физика и химия стекла. 1998. Т. 24. № 5. С. 648 – 651.
19. Богомолова Л.Д., Жачкин В.А. Парамагнитные центры в ион–имплантированных неорганических стеклах // Там же. № 1. С. 3 – 30.
20. Гамаюнов Н.И. Воздействие постоянных электрических и магнитных полей на заряженные частицы в потоке // Инженерно-физический журнал. 1985. Т. 48. № 6. С. 1009 – 1011.
21. Бернацкий А.Ф., Целебровский Ю.В., Чунчин В.А. Электрические свойства бетона. М., 1980.
22. Ретер Г. Электронные лавины и пробой в газах. М., 1968.
23. Дураджи В.Н. Об электрическом импульсном разряде между металлическим и электролитным электродами // Электронная обработка материалов. 2001. № 3. С. 22 – 26.
24. Бувевич Ю.А., Ясников Г.П. Релаксационные методы в исследованиях процессов переноса // Инженерно–физический журнал. Т. 44. № 3. С. 489 – 504.

Поступила 27.02.03

Summary

Discharging fields can influence on the capilar constants in broad quartz macrocapilars owing to interaction of three phases and influence of external non uniform electric fields on them. Influence and after-influence effects on this phenomenon are caused by a considerable changing of surface properties of moisture and solid phases.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА РАСТВОРИМОСТЬ

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

В работе [1] приведены результаты исследования влияния электростатического поля на процесс растворения дистиллированной воды в подсолнечном масле, суть которого ясна из рис. 1. Показателями наличия диффузии (растворения) молекул H_2O из нижнего слоя 1 в верхний 2 являлись средние по объему масла значения удельного сопротивления и концентрации воды в масле в зависимости от времени t при наличии и в отсутствии поля. Установлено, что со временем удельное сопротивление падает, а концентрация возрастает как в поле, так и без него, однако при наличии поля скорость этих изменений заметно больше.

Так же была дана физическая интерпретация наблюдаемых эффектов [1], которая сводится к тому, что поле благоприятствует массопереносу воды в масло посредством непосредственного действия как на диполи полярных молекул H_2O , так и непосредственно на ионы гидроксила OH^- и гидроксония H_3O^+ , концентрация которых в воде достаточно велика и определяет ее pH – показатель [2]. Кроме того, показано [1], что граница раздела 1 – 1' электрически заряжена поверхностной плотностью зарядов

$$\delta = j(\tau_2 - \tau_1), \quad (1)$$

где j – плотность тока через границу раздела, $\tau \equiv \epsilon_0 \epsilon / \sigma$ – время электрической релаксации среды, ϵ_0 – универсальная электрическая постоянная, ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость, σ – удельная электропроводность. Индексы „1” и „2” относятся к 2-м средам соответственно (рис. 1).

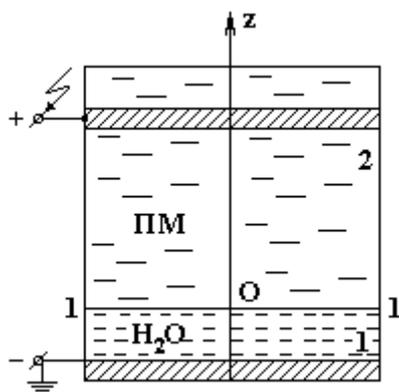


Рис. 1. Схема экспериментальной ячейки

Как следует из формулы (1) избыток ионов на границе 1 – 1' может состоять либо из ионов OH^- , как в случае полярности напряжения на рис.1, так и ионов гидроксония H_3O^+ при противоположной полярности. В обоих случаях массоперенос осуществляется за счет нейтральных молекул благодаря диффузии и ионов как за счет диффузии, так и действия кулоновских сил на ионы.

Ниже рассматриваются эти процессы в установившемся режиме с энергетических позиций, сводящихся, в конечном итоге, к распределению Больцмана.

Будем исходить из выражения для плотности потока массы диффундирующего вещества [1, 3]:

$$\vec{i} = -\gamma D \nabla c + \gamma c b \vec{F}, \quad (2)$$

где γ – суммарная плотность среды ($\gamma' \equiv \gamma \cdot c$ – плотность H_2O в масле); c – концентрация, как функция времени и координат; D, b – коэффициенты диффузии и подвижности соответственно; \vec{F} – сила, действующая на одиночную частицу.

Из (2) можно получить уравнение диффузии, как уравнение неразрывности плотности потока (2), то есть

$$\gamma \frac{\partial c}{\partial t} = -\nabla \vec{i}, \quad (3)$$

или

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \nabla^2 c - b \vec{F} \nabla c - bc \nabla \vec{F}. \quad (4)$$

В одномерном случае $\vec{F} = (0; 0; F_z)$, $c = c(t, z)$ уравнение (4) совпадает при $D = \text{const}$ с уравнением Эйнштейна–Колмогорова для вероятности попадания частицы из точки $M_0(\vec{r}_0, t_0)$ в точку $M(\vec{r}, t)$ [4] при ее броуновском движении, что подчеркивает вероятностный характер процесса диффузии. При отсутствии внешнего поля, то есть $\vec{F} = 0$, уравнение (4) переходит в уравнение чистой диффузии, совпадающее с уравнением теплопроводности. При отыскании решений нестационарного уравнения (4) целесообразно иметь в виду, что эти решения при $t \rightarrow \infty$ должны переходить в установившееся (стационарное) решение, которое, однако, имеет и непосредственное практическое значение.

В этой связи в данной работе ограничимся рассмотрением стационарного случая, положив $\frac{\partial c}{\partial t} = 0$, то есть $c = c(\vec{r})$. В состоянии термодинамического равновесия плотность потока массы обращается в нуль, то есть из (2) получим

$$\nabla \ln c = \frac{b}{D} \vec{F}. \quad (5)$$

Очевидно, при выполнении этого равенства уравнение (4), как следствие (2) и (3), тождественно должно выполняться.

Из (5) вытекает важное следствие о том, что гетерогенная система частиц во внешнем силовом поле может находиться в равновесии лишь при условии, что это поле потенциально, то есть $\text{rot} \vec{F} = 0$. Это позволяет с самого начала положить $\vec{F} = -\nabla W$, где W ни что иное как потенциальная энергия частицы в рассматриваемом поле. Учитывая это из (5) следует

$$c = c^0 e^{-\frac{bW}{D}}, \quad (6)$$

где $c^0 = c|_{W=0}$ – концентрация в местах, где потенциальная энергия принята за начало отсчета.

Если принять во внимание соотношение Эйнштейна между коэффициентами диффузии D и подвижности b [3]

$$D = kTb, \quad (7)$$

где k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура среды, то (6) переходит в распределение Больцмана

$$c = c^0 \cdot e^{-\frac{W}{kT}} \quad (8)$$

Таким образом, не вступая в противоречия с нестационарными уравнениями переноса, в стационарном случае распределение концентрации можно искать, исходя из общего классического распределения Больцмана (8).

Рассмотрим частные случаи

а) Электрическое поле отсутствует ($E = 0$)

В этом случае

$$c_0 = c_0^0 \cdot e^{-\frac{m_0gz}{kT}} \quad (9)$$

где $m_0 = M/N_A$ – масса молекулы, M – ее молярная масса, N_A – число Авогадро; $c_0^0 = c_0|_{z=0}$ – концентрация молекул (воды) на границе $z = 0$. Переходя в (9) к другим константам получим

$$c_0 = c_0^0 \cdot e^{-\frac{Mgz}{RT}}, \quad (10)$$

где $R = k \cdot N_A$ – универсальная газовая постоянная.

Положив $M = 18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $T = 3 \cdot 10^2$ К с учетом $R = 8,31$ Дж/моль·К из (10) найдем

$$c_0 \cong c_0^0 \cdot e^{-0,7 \cdot 10^{-4} z} \quad (11)$$

Эта формула показывает, что лишь при $z \geq 10^4$ м распределение молекул может ощутимо отклониться от постоянного. Следовательно, в отсутствие поля ($E = 0$) при достаточно больших t (практически, как показывает опыт, $t \geq 12$ ч) влажность масла должна быть постоянной по высоте. Это, однако, не означает, что c_0^0 должна равняться концентрации молекул в слое воды. Величина c_0^0 определяет значение концентрации воды при насыщении масла (раствор). Согласно экспериментальным данным [1] $c_0^0 \cong (6 - 8) \cdot 10^{-2} \%$.

б) Нейтральные молекулы при наличии поля ($E \neq 0$)

Потенциальная энергия поляризованной молекулы в электрическом поле дается формулой [5]

$$W_p = -\vec{P}\vec{E} = -PE \cos \theta, \quad (12)$$

где \vec{P} – дипольный момент молекулы, θ – угол между векторами \vec{P} и \vec{E} . Ввиду теплового движения молекул формулу (12) при подстановке в (8) следовало бы усреднить по углам θ (см., например, [6]), однако пока рассматриваем полукачественную картину растворения в (12) можно опустить $\cos \theta$, подразумевая под дипольным моментом P его среднее значение.

С учетом (12) получим

$$c_p = c_p^0 \cdot e^{-\frac{m_0gz - \vec{P}\vec{E}}{kT}}, \quad (13)$$

здесь $c_p^0 = c_p|_{W=0}$ – концентрация, где полная энергия равна нулю.

Так как (рис. 1) $\vec{P} \cdot \vec{E} \approx \text{const}$, то из (13) следует, что вклад поляризованных молекул в общую концентрацию постоянен по высоте. Оценим его, сравнивая слагаемые дроби в (13). При $z = 10^1$ м; $m_0 = 3 \cdot 10^{-26}$ кг; $p \sim e \cdot d \sim 10^{-29}$ Клм (d – диаметр молекулы); $E \cong 10^5$ В/м получим $\vec{P}\vec{E} / m_0gz \sim 30$, то есть потенциальная дипольная энергия более чем на порядок превышает потенциальную гравитационную, которая пренебрежимо мала. Из (13) следует

$$c_p = c_p^0 \cdot e^{-\frac{\vec{P}\vec{E}}{kT}} \quad (14)$$

Оценим экспоненциальный множитель в (14)

$$e^{-\frac{10^{-29} \cdot 10^5}{1,4 \cdot 10^{-23} \cdot 3 \cdot 10^2}} \sim e^{10^{-3}} = 1,001,$$

то есть во столько раз увеличится концентрация молекул воды за счет поляризационных сил, и с помощью чувствительных методов эффект может быть уловлен.

в) *Заряженные частицы.* В принципе в любой системе заряженных частиц можно выделить электронейтральную часть, которой по определению можно приписать дипольный момент, и заряженную часть, обладающую избыточным зарядом. Поэтому применительно к ионам можно написать

$$W_q = -\vec{P}\vec{E} + q\varphi, \quad (15)$$

где q – заряд иона, φ – потенциал внешнего поля в точке, где находится ион. Таким образом, пренебрегая гравитационной энергией, для ионов (OH^-) можно написать

$$c_- = c_-^0 \cdot e^{\frac{q\varphi - \vec{P}\vec{E}}{kT}}, \quad (16)$$

здесь $c_-^0 = c_- \Big|_{W_q=0}$ – концентрация в местах, где полная энергия равна нулю.

Дадим оценку c_- при следующих условиях $\varphi \sim 10^3$ В, $q = e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, предварительно оценив $q\varphi / \vec{P}\vec{E} \sim (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^3) / (10^{-29} \cdot 10^5) \sim 10^5$, то есть как и следовало ожидать, для ионов кулоновские силы неизмеримо больше дипольных, поэтому для ионов непосредственно можно считать

$$c_- = c_-^0 \cdot e^{\frac{q\varphi}{kT}} \quad (17)$$

При тех же числовых данных будем иметь

$$q\varphi/kT \sim (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^3) / (1,4 \cdot 10^{-23} \cdot 3 \cdot 10^2) \sim 4 \cdot 10^4.$$

Следовательно,

$$\frac{c_-}{c_-^0} = e^{\frac{q\varphi}{kT}} \sim e^{10^4} \gg 1,$$

то есть даже при очень малых концентрациях $c_-^0 = c_- \Big|_{z=0}$ на границе раздела $z = 0$ электрическое поле может привести к существенному увеличению концентрации ионов в слое масла. С другой стороны, концентрация ионов OH^- или H^+ характеризует pH – показатель среды. Следовательно, по pH – показателю среды можно экспериментально судить о степени влияния поля на растворимость воды в масле. Аналогично можно поступать и в случае других веществ.

Таким образом, установлено, что ответственным за эффект влияния электрического поля на интенсивность растворения воды в масле является чисто кулоновский механизм переноса зарядов через границу раздела.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А., Поликарпов А.А., Кожевников И.В. Влияние электростатического поля на растворимость диэлектрических жидкостей и газов // Электронная обработка материалов. 2003. № 5. С. 53 – 57.
2. Герасимов Я.И. и др. Курс физической химии. Т. 2. М., 1973.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Т. VI. М., 1986.
4. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М., 1972.
5. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики М., 1989.

Поступила 04.07.03

Summary

The processes of admixture concentration distribution in weakly conducting liquid in an external electric field are considered. The obtained distribution is in accordance with Boltzman distribution.

ЭЛЕКТРОВЗРЫВНАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ, ОБЪЕМНАЯ КАВИТАЦИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕАКТОРАХ.

Часть 1. (ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЕ ГЕНЕРИРОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ – ЗАРОДЫШЕЙ КАВИТАЦИИ)

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

Большая группа разрядно-импульсных технологий (РИТ) основывается главным образом на возможности генерирования подводными электрическими разрядами в реакторах мощной нелинейной объемной кавитации. В первую очередь к ним относятся РИТ обработки малоразмерных объектов, таких, как волоконные или мелкодисперсные структуры неорганического или органического происхождения.

Нами экспериментально подтверждена качественная физическая модель электроразрядной нелинейной объемной кавитации (ЭРНОК). Она базируется на представлении о возникновении газовой фазы в предпробойной стадии подводного электрического разряда, из которой формируется масса зародышей кавитации, превращающихся в обширную кавитационную область на послеразрядной стадии в поле волн разряжения, которое генерирует коллапсирующая послеразрядная полость. Впервые экспериментально зарегистрирован полный цикл зарождения, развития, угасания и исчезновения электроразрядной кавитационной области в реакторе, время жизни которой многократно превышает время активной стадии подводного электрического разряда (может достигать 500 мс и больше).

В наших ранних работах [1] отмечалось влияние электроразрядной кавитации на процессы тонкого измельчения минеральных сред, но механизм возбуждения такой кавитации не рассматривался из-за отсутствия прямых экспериментальных данных о ее генезисе. Первые результаты были установлены и опубликованы [2], но прямой однозначной связи предпробивных процессов с послеразрядной кавитацией еще не удалось установить, хотя при анализе экспериментальных данных такие гипотетические мысли были высказаны.

Однако в работе [2] была наработана масса экспериментальных фактов в пользу полного осмысления генезиса электроразрядной кавитации и роли предпробойной стадии разряда в ее генерировании, но цель работы была иной и эта сторона явления тогда не анализировалась.

Значительно позже в работе [3], посвященной практическому применению предпробивных явлений в воде, высказано предположение о существенной их роли в генерировании ультразвука импульсным электрическим полем непосредственно в объеме жидкости. При этом авторы [3] называли совершенно фантастические частоты ультразвука – до 10^{10} Гц и выше, что экспериментально не подтверждалось и, конечно, является ошибочным предположением. Однако высказанная здесь же мысль о возможности управляемой перестройки основной частоты ультразвука за счет изменения параметров электрического поля (то есть через изменения механизма предпробивных явлений) была правильной и в нужном направлении – изучение генезиса электроразрядной кавитации.

Основные методические положения

Нами были проведены исследования процессов газовой выделенности при формировании электрического пробоя воды в основном по методике, изложенной в [2]. Образцы воды имели различное исходное удельное сопротивление, которое выбиралось таким образом, что обеспечивался пробой и по электротепловому механизму, и по электрическому в соответствии с [4]. По первому обеспечивалось предпробойное газовыделение в разрядном промежутке, по второму – гарантировался его минимум. При этом обеспечивалась и соответствующая напряженность электрического поля в разрядном промежутке. Использовалось также внешнее магнитное поле, в значительной степени подавляющее предпробойное газовыделение [2] в большей части диапазона варьирования удельным сопротивлением воды.

Использовалось предположение, что процесс возбуждения электроразрядной кавитации значительно усиливается использованием предпробойных явлений, которые служат источниками газовых микропузырьков–зародышей кавитации. При исследовании предпробойных явлений как процессов генерирования зародышей кавитации, использовалась плоская разрядная камера объемом 0,6 дм³, снабженная вольфрамовыми электродами диаметром 2 мм с заточкой острия на угол при вершине от 20 до 30°, обращенный в разрядный промежуток и радиусами закруглений, которые обеспечивали заданную напряженность электрического поля в интервале $1 \cdot 10^7 - 2 \cdot 10^8$ В·м⁻¹. Величина разрядного промежутка варьировалась от 0,002 до 0,020 м. Использовалась батарея из четырех конденсаторов ИМН100-0,1, которые включались в различных сочетаниях параллельно, последовательно или смешанно так, что емкость накопителя установки могла изменяться от 0,05 до 0,4 мкФ. Устанавливалось рабочее напряжение от 3 до 10 кВ и от 15 до 25 кВ.

Разрядная камера была снабжена вакуумным вводом дополнительной оптической системы на основе световода передачи изображения для наблюдения пространственно-временной картины происходящих процессов в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В таком варианте использовались две установки ВФУ-1. Основной коэффициент увеличения $K_{\phi} = 15$. Применялся мощный импульсный осветитель, который обеспечивал равномерную достаточную освещенность кадрового окна как по площади, так и по времени. Неравномерность освещенности в поле кадра не превышала 5%. Для выравнивания освещенности применялось стандартное выходное, матовое стекло. Импульс света имел плоскую вершину длительностью 400 мкс, передним фронтом длительностью 80 мкс и срезом 300 мкс. Тело свечения образовывалось импульсными лампами ИФК-50. Имелась схема задержки синхроимпульса для управляемого запуска ВФУ. Скорость съемки была принята от 125000 до 400000 кадров/с.

Электрический взрыв в воде в целом длится сотни миллисекунд и проходит по стадиям: формирования пробоя, или предпробойная; собственно пробоя и активного преобразования энергии в канале электрического разряда (КЭР); послеразрядная.

При осуществлении средних по мощности разрядов стадия формирования пробоя длится от нескольких сотни микросекунд, стадия активного преобразования энергии в КЭР – от нескольких десятков до нескольких сотен микросекунд, а послеразрядная стадия, как считалось до последнего времени, от нескольких сотен микросекунд до нескольких миллисекунд.

Пока что не существует такой кинорегистрирующей моноблочной аппаратуры, которая позволила бы в деталях рассмотреть такой процесс, быстропротекающие стадии которого, представляющие самостоятельное физическое явление (в целом непрерывном процессе), длятся от $1 \cdot 10^{-6}$ до хотя бы $2 \cdot 10^{-3}$ с. В то же время, из косвенных наблюдений за последовательностями разрядов с частотой посылок импульсов свыше 1,5 Гц, ясно, что длительность третьей стадии может простираться, по крайней мере, вплоть до $1 \cdot 10^{-1}$ с. Попытки рассмотреть и зарегистрировать для одного единичного разряда все стадии с помощью нескольких сблокированных кинорегистраторов были неудачными, поскольку в этом случае резко осложняются проблемы расположения всей оптической аппаратуры относительно объекта наблюдения, обеспечения разных требований к системам подсветки процессов, наладки систем синхронизации пусков и остановок съемки процессов и т.п.

Путем анализа результатов наших предшествующих исследований установлено, что предпосылки последующих кавитационных процессов нужно пытаться обнаружить при изучении предпробойной стадии ЭВ в водных электролитах с удельным сопротивлением от 6 до 8000 Ом·м. При этом следует захватить кинорегистратором уже только первые от 10 до 20 мкс после возникновения пробоя. Соответственно этому скоростной кинорегистратор запускался заведомо задолго до наступления электрического пробоя так, чтобы гарантированно зафиксировать в кадре вспышку разряда и принять ее за момент окончания предпробойной стадии разряда.

Экспериментальные исследования

По определению кавитация заключается в образовании разрывов сплошности тех участков жидкости, в которых в результате перераспределения давления, вызванного движением жидкости, происходят значительные местные понижения давления. Но сами кавитационные разрывы жидкости могут возникнуть только на зародышах кавитации после возбуждения в жидкости отрицательного (растягивающего) давления. Минимальная величина такого давления называется кавитационной прочностью жидкости.

Теоретически кавитационная прочность чистой воды составляет несколько десятков мегапаскалей, однако наличие в реальной воде различных нерастворимых примесей и газов сильно понижают ее прочность. При этом из всех разнообразных примесей, содержащихся в жидкости, на ее электрическую прочность существенное влияние могут оказывать только газовые или паровые пузырьки.

В обычной отстоявшейся воде таких пузырьков-зародышей сравнительно немного, и чтобы вызвать мощную кавитацию необходимо каким-то образом генерировать их до возбуждения в жидкости растягивающих напряжений. Естественными генераторами зародышей кавитации в электро-разрядных реакторах могут стать явления, происходящие на предпробойной стадии.

Известно [5], что явление кавитации сильно зависит от количества газовой фазы в кавитирующей жидкости. Величина давления p_m , соответствующая порогу возникновения кавитации в воде зависит от величины радиуса R_0 , зародыша кавитации. В интервале изменения R_0 от $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ см порог возникновения кавитации составляет $p_m \approx 0,1$ МПа. Увеличение R_0 до $1 \cdot 10^{-2}$ см снижает p_m до $0,03$ МПа.

Уменьшение R_0 быстро повышает порог возникновения кавитации. Так, для $R_0 = 1 \cdot 10^{-5}$ см – $p_m \approx 1$ МПа, для $R_0 = 1 \cdot 10^{-6}$ см – возрастает до 10 МПа, для $R_0 = 1 \cdot 10^{-7}$ см – $p_m \approx 50$ МПа.

В отстоявшейся воде отсутствуют пузырьки с $R_0 > 10^{-3}$ см, свежая водопроводная вода имеет существенно более низкую кавитационную прочность, поскольку в ней присутствует значительное количество зародышей кавитации с радиусом $R_0 > 10^{-3}$ см.

Необходимо оценить возможность генерирования газовой фазы самим электрическим разрядом, естественно, в его предпробойной стадии. Такая диспергированная газовая фаза и должна служить источником зародышеобразования ЭРНОК.

Существуют различные физические представления о предпробойной стадии электрического разряда. По одному из них электрический разряд в жидкости является разрядом в газовых полостях, которые либо присутствуют в жидкости и на электродах, либо образуются при воздействии напряжения (электролиз, вскипание, разложение под действием электронной бомбардировки) [4]. Образование газа может происходить за счет локального (вблизи геометрических неоднородностей на катоде) разогрева жидкости. Условием пробоя является нарушение равенства энергии, необходимой для вскипания некоторой массы жидкости m и энергии W , выделяемой в жидкости.

Ранее и нами показано [2], что в предпробойной стадии практически всегда выделяется газовая фаза, но для отличающихся режимов пробоя и свойств среды в разрядном промежутке ее выделяется различное количество. На рис. 1, по данным нашей работы, приводится зависимость газовыделения от удельного сопротивления рабочей жидкости в обычных условиях, при пониженном давлении и в магнитном поле. Все разряды осуществлялись в режиме самопробоя. Предпробойные процессы во всех этих растворах при выбранных давлениях сопровождаются более или менее интенсивным газовыделением. Но ясно, что в магнитном поле газовыделение всегда меньше, за исключением двух аномалий – в растворах с $\rho = 12$ Ом·м в магнитном поле, где газовыделение больше, чем при нормальном внешнем давлении в два раза, и даже больше, чем при пониженном давлении – в 1,8 раза. В то же время при изменении ρ от 60 до 800 Ом·м в магнитном поле газовыделение практически полностью отсутствует.

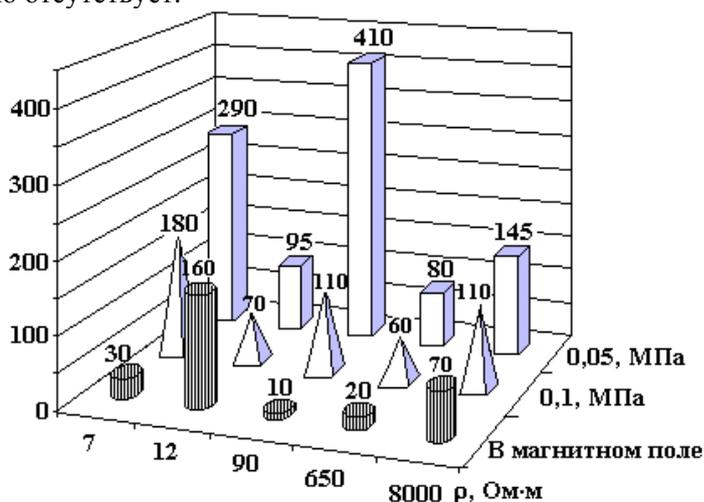


Рис. 1. Зависимость относительного газосодержания V от удельного сопротивления жидкости ρ в разрядной камере гипотезой с уменьшением предпробойного газовыделения

кавитация на послеразрядной стадии должна заметно ослабляться.

Это указывает на необходимость проведения исследования кавитации на послеразрядной стадии для разрядов с высоким газовыделением в предпробойной стадии и разрядов с заведомо малым или нулевым газовыделением в предпробойной стадии. Для больших ρ и малых t образование парогазовой фазы в предпробивной период маловероятно [4]. При высоких значениях напряженности электрического поля в разрядных промежутках и коротких временах экспозиции характер пробоя все ближе к чисто электрическому, при котором газовыделение ничтожно. При этом в соответствии с выдвинутой нами

кавитация на послеразрядной стадии

Нами выбраны электрические разряды в чистой (бидистиллят и деионизация) воде и растворах водных электролитов. При этом ρ фиксировалось в диапазонах: 6 – 7; 10 – 15; 50 – 100; 500 – 800; 1000 – 8000 Ом·м. Разряды воспроизводились при пониженном и нормальном давлении с установлением режимов как пробойных, так и беспробойных, а также при осуществлении разрядов в магнитном поле.

На рис. 2 приведены отдельные кадры кинограмм процессов в водных электролитах при пониженном до $p_b = 0,089$ МПа давлении в режиме беспробойных разрядов и длительности воздействия напряжения от 10 до 60 мкс. Хорошо виден процесс образования парогазовой фазы на аноде и катоде. Пузырьки и предкавитационные структуры образуются практически одновременно, хотя затем развиваются несинхронно. На кинограмме зафиксировано (см. рис. 2, а), как на аноде образуется предкавитационная, туманообразная, радиально-факельная структура. Она быстро радиально расширяется и одновременно движется в аксиальном направлении к катоду. При этом радиальная скорость больше аксиальной. Далее радиально-факельная структура продолжая разлет достигает плоскости, проходящей через острие катода, и разлетается за пределы зоны наблюдения. К этому моменту на аноде образуется новая (узкая) факельная структура, прорастает на треть в разрядный промежуток и через примерно 20 мкс исчезает, оставив в разрядном промежутке только тень. Пробой не возникает, емкость накопителя недостаточна.

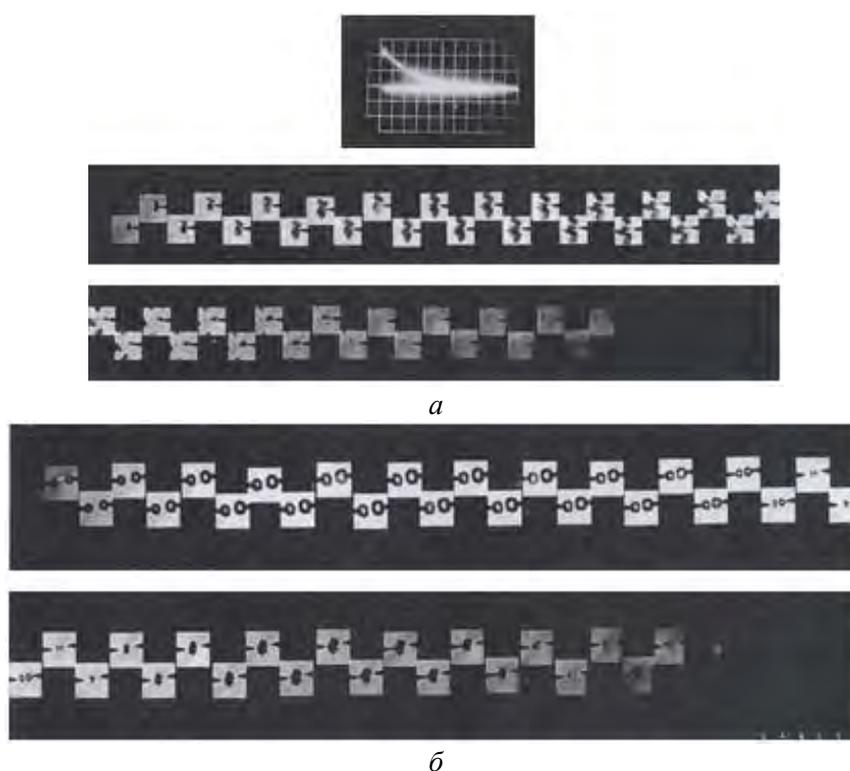


Рис. 2. Образование пузырьковых и предкавитационных структур в разрядном промежутке при беспробойном разряде

Существуют режимы беспробойных разрядов в растворах водных электролитов с удельным сопротивлением в диапазоне 12 – 13 Ом·м, при которых на аноде возникает, растет и развивается сложная пузырьковая структура, состоящая из основного крупного пузырька (диаметром в максимуме 1,2 мм), на поверхности передней (обращенной к катоду) полусфере которого высаживаются изнутри и тянутся к катоду несколько мелких (диаметром от ~ 0,05 до 0,1 мм) пузырьков. К тридцатой микросекунде такая пузырьковая структура достигает максимальных размеров и тут же начинается ее спад до полного исчезновения к 60 мкс без каких-либо последствий, поскольку пробой не наступил.

На рис. 2, б представлен беспробойный разряд в водном электролите с удельным сопротивлением 8,17 Ом·м. Здесь характерным является возникновение (практически одновременное) пузырьков на аноде и катоде. Затем пузырьки увеличиваются в размерах, их передние полусферы вдвигаются в разрядный промежуток навстречу друг другу. К 45 мкс пузырьки уже сокращаются (каждый в отдельности) в размерах и захлопываются так же раздельно в середине разрядного промежутка, и на их месте образуется слабое кавитационное облачко, достигающее через 15 мкс максимальных размеров

3 мм по собственной оси, расположенной перпендикулярно оси разрядного промежутка. Кавитационное облачко “садится” на острие катода, прогрессивно сокращается в размерах, внезапно отрывается и, переместившись за время от 3 до 5 мкс в середину разрядного промежутка, исчезает примерно к сотой микросекунде. В данном режиме разряд тоже беспробойный и пузырьки не превращаются в кавитационные структуры.

Таким образом, мы смогли получить только одно из обязательных условий возбуждения послеразрядной объемной нелинейной кавитации – газовыделение на предпробойной стадии, но не диспергирование газовых пузырьков на зародыши кавитации (нет ударной волны пробойного разряда), то есть значительная послеразрядная кавитация не может возникнуть. Следовательно, получено условие обязательное, но недостаточное.

Возникновение на электродах пузырьковых структур во время действия импульсов напряжения может рассматриваться как тепловой взрыв, обусловленный перегревом жидкости токами проводимости. Как показано в работе [4], необходимы достаточно большие размеры пузыря, чтобы скомпенсировать энергетически невыгодный эффект образования поверхности раздела между жидкостью и паром. И таким образом всегда можно установить нужный режим разряда, когда образуется достаточное количество газа, которое сможет диспергировать образующийся после пробоя канал электрического разряда, подготавливая массу кавитационных зародышей.

Для рассмотренных беспробойных разрядов характерным свойством является относительно слабая зависимость завершенности пробоя разрядного промежутка от начальной напряженности электрического поля. Так, пробой l_p не наступает даже при напряженности $E = 1,4 \cdot 10^6$ В/см при нормальном и пониженном до 0,05 МПа внешнем давлении, если емкости относительно невелики (0,05 – 0,2 мкФ). Но с увеличением емкости (до 0,4 мкФ) пробой наступает стабильно и при высоких и средних значениях начальной напряженности. Длительность беспробойных разрядов слабо зависит от начальной напряженности электрического поля и внешнего давления и составляет 50 – 150 мкс.

На рис. 3 приведены кадры заключительных перед пробоем процессов в водном электролите $\rho = 6,9$ Ом·м при нормальном внешнем давлении 0,1 МПа и $E = 1,8 \cdot 10^6$ В/см (при этом емкость накопителя – 0,4 мкФ). Подобные кинограммы получены для такого же электролита и внешнего давления, но при $E = 0,6 \cdot 10^6$ В/см; при понижении p_v до 0,05 МПа в режиме пробойного разряда и $E = 0,6 \cdot 10^6$ В/см; при том же пониженном внешнем давлении, но $E = 1,2 \cdot 10^6$ в/см.

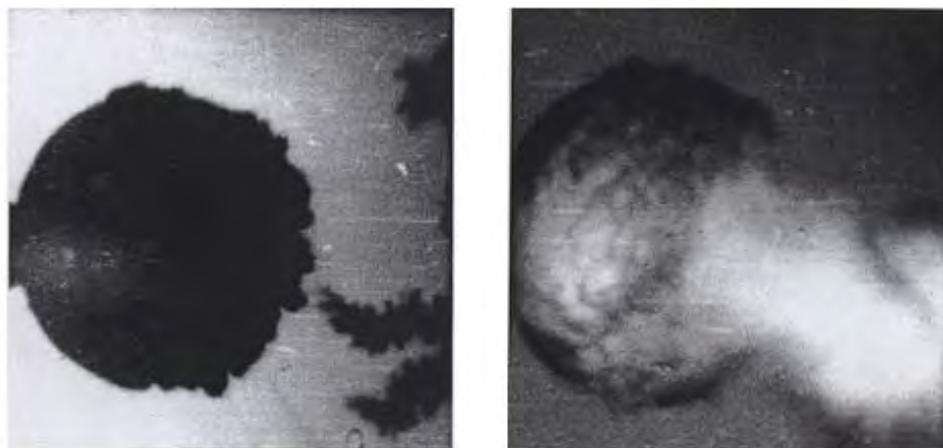


Рис. 3. Финальные кадры кинограммы формирования газосодержащих структур в предпробойной стадии электрического разряда в водном электролите с $\rho = 6,9$ Ом·м

При всех режимах характер предпробойного газовыделения практически одинаков: на катоде возникновение и рост пузырька, а на аноде – возникновение и сравнительно быстрое продвижение в разрядный промежуток группы лидеров, движущихся в парогазовых рубашках, как кустообразный ансамбль. В интервале от 50 до 60 мкс один из лидеров достигает поверхности катодного пузырька, и происходит инициирование пробоя.

КЭР очень быстро развивается, и волна давления разрывает и диспергирует обе парогазовые структуры. Тут же, с приходом отраженной от свободной поверхности волны разряда вокруг еще расширяющегося КЭР, возбуждается кавитация, и кадр становится светонепроницаемым. Но это кавитация, относящаяся только к активной стадии электрического взрыва (ЭВ).

На рис. 4 приведены заключительные перед пробоем кадры кинограммы предпробойных процессов в водном электролите $\rho = 12$ Ом·м, аналогичные для пробоя при пониженном до $p_v = 0,070$ и

0,089 МПа давлении. При этом устанавливалась начальная напряженность $E = 0,2 \cdot 10^6$ В/см, а $C = 0,4$ мкФ.

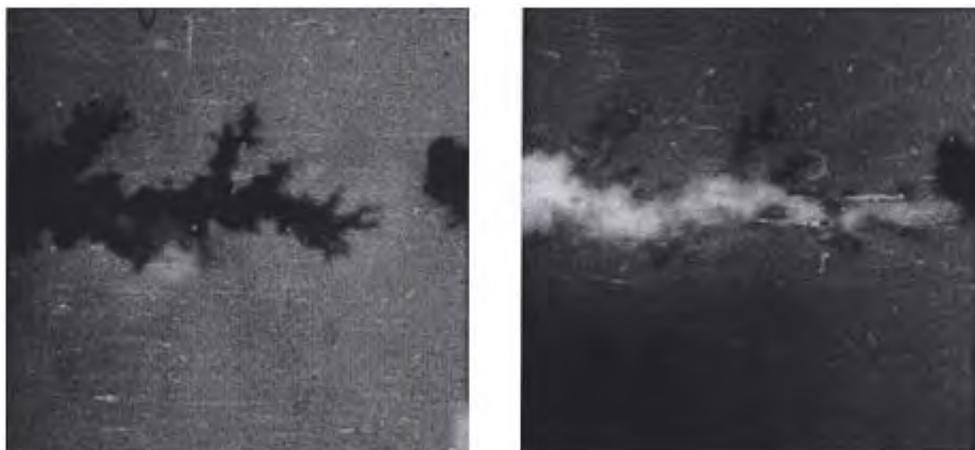


Рис. 4. Финальные кадры кинограммы формирования газосодержащих структур в предпробойной стадии электрического разряда в водном электролите с $\rho = 12$ Ом·м

Для этого режима разряда предпробойная стадия в макрокартине процесса существенно отличается от описанной выше. Она не содержит крупнопузырьковых структур на катодах, От анодов распространяются древовидные лидерные структуры в парогазовых оболочках. Движение их относительно медленное, противозлектрод достигается ими за ~ 100 мкс. Вся древовидная структура, "веточки" которой не что иное, как газонаполненные каналчики, разрушается этим электрическим взрывом и превращается в массу кавитационных зародышей. Через 20 мкс вся периферия кадра так же, как и в рассмотренном выше случае, становится светонепроницаемой, что позволяет пока предположить о возникновении первой волны ЭРНОК.

Подобным образом, но в отсутствие пузырьковых структур на катоде, развивается газовыделение в водных электролитах с удельным сопротивлением $\rho = 59$ Ом·м, когда напряженность $E = 1,2 \cdot 10^6$ В/см при $C = 0,05$ мкФ и $p_v = 0,070$ МПа.

Для предпробойного газовыделения в воде с высоким удельным сопротивлением (деионизованная вода), когда процесс пробоя очень затруднен, также имеется характерная особенность. Сразу после приложения импульса напряжения к разрядному промежутку на катоде образуется микропузырек, который сравнительно медленно растет, порождая иногда вторичные пузырьки, и занимает все межэлектродное пространство. Когда происходит практически касание стенки пузырька с анодом, происходит пробой по внутренним стенкам пузырька. Естественно такой пузырек взрывается изнутри, демпфируя первичные ударные волны ЭВ, но все же диспергируясь и давая начальные зародыши последующей послеразрядной кавитации.

Таким образом, для электрических разрядов в водных электролитах с удельным сопротивлением ρ от 6,9 до 50 Ом·м характерным для практического использования в реальных разрядно-импульсных технологиях и в воде с ρ от 50 до 8000 Ом·м, не характерном для реальных разрядно-импульсных технологий, всегда можно установить режим пробойного разряда, когда в предпробойной стадии наблюдается значительное газовыделение в структуры, сходные с пузырьковыми или многоканальными, кистеобразными. При наступлении пробоя эти газосодержащие структуры диспергируются, мельчайшие пузырьки остаются в жидкости и могут служить зародышами кавитации на всех последующих стадиях электрических взрывов в воде. В тех же случаях, когда электрический пробой не наступает, после разрядки конденсаторов пузырьковые структуры спадают, смыкаются и исчезают, не вызывая кавитационных последствий.

Интересно, на наш взгляд, рассмотреть возможность осуществления пробойных разрядов с минимальным газовыделением в разрядном промежутке. К ним можно отнести разряды, осуществляемые в магнитном поле и по механизму ударной ионизации в объеме жидкости. Однако следует помнить [4], что носителями положительных зарядов являются ионы основной жидкости и примесей, а также ионы и протоны, образующиеся при разложении жидкости в сильном электрическом поле.

На рис. 5 представлены заключительные перед пробоем кадры кинограммы в постоянном магнитном поле $B = 0,02$ Т, направленном под углом 45° к продольной оси разрядного промежут-

ка. Этот разряд осуществлялся при нормальном внешнем давлении $p_v = 0,1$ МПа в воде с удельным сопротивлением $\rho = 4555$ Ом-м, при $E = 5,0 \cdot 10^5$ В/см.

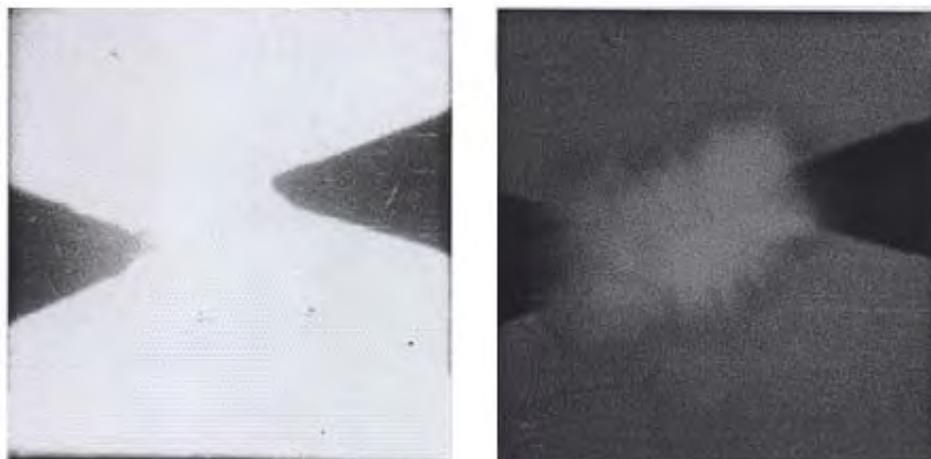


Рис. 5. Финальные кадры кинограммы формирования минимальных газосодержащих структур в предпробойной стадии электрического разряда в водном электролите с $\rho = 60,37$ Ом-м в постоянном магнитном поле

При этих условиях предпробивные процессы очень короткие – электрический пробой наступает к моменту 6,7 мкс, предпробивное газовыделение очень незначительное, что не позволяет надеяться на мощную послеразрядную кавитацию.

Об этом же свидетельствует хорошо видимое (см. рис. 6, пробой по чисто электрическому механизму) с 26 мкс волновое поле, не вызвавшее заметную общую послеразрядную кавитацию. Это поле образовано, очевидно, взаимодействующими прямыми и отраженными ударными волнами. Если бы в разрядном промежутке было достаточно зародышей кавитации, возникающих при диспергировании предпробойных газовых образований, то зоны разрежений волнового поля заполнились бы кавитирующими пузырьками.

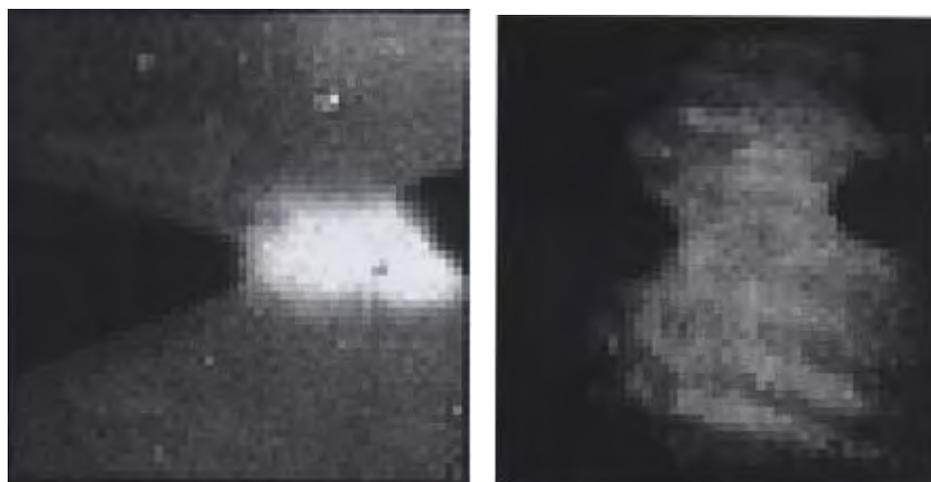


Рис. 6. Финальные кадры кинограммы предпробойной стадии электрического разряда (по чисто электрическому механизму пробоя) в водном электролите с $\rho = 4555$ Ом-м в постоянном магнитном поле

Итак, характерные кинограммы процессов формирования разряда показали, что практически во всем диапазоне изменения ρ , через несколько микросекунд после подачи импульса напряжения на межэлектродный промежуток, на электродах и в приэлектродной зоне развиваются пузырьковые структуры, в которых проявляются и развиваются следы лидеров. При высоком начальном удельном сопротивлении жидкости пузырьковые структуры обволакивают перемещающийся в разрядном промежутке след лидера. При этом чем больше развита пузырьковая структура, тем труднее формируется КЭР. Внешне это выглядит так, что для завершения пробоя необходим прорыв лидеров сквозь границу раздела фаз, и этот процесс требует значительных затрат энергии.

Более энергетически выгоден режим формирования электрического пробоя при появлении газовой фазы сразу в форме кавитационной области, распространяющейся в разрядный промежуток, но наименьшими энергозатратами в наших экспериментах характеризуются процессы с факелообразным распространением газовой фазы.

К сожалению, не выявлено пропорциональной связи между величиной предпробивных потерь энергии и объемом образующейся газовой фазы в зависимости от изменения удельного сопротивления жидкости.

Приведенные результаты экспериментальных исследований позволяют сделать важные выводы.

Существуют такие режимы электрического пробоя водных электролитов и воды, которые обеспечивают активное газообразование, что позволяет ожидать возникновения послеразрядных кавитационных процессов на дальнем временном отрезке. Это режимы так называемых “медленных разрядов”. При относительно длительном импульсе напряжения и низком значении удельного сопротивления жидкости в разрядной камере облегчается газообразование вследствие вскипания и электролиза и уменьшается $E_{пр}$. Рабочая среда электроразрядных реакторов, например, для обработки волоконных материалов или глинистых дисперсий имеет низкое удельное сопротивление, что способствует возбуждению послеразрядной кавитации.

Образовавшаяся в той или иной форме газовая фаза разрушается ударной волной разряда и на ее месте образуется хорошо заметное облако микроскопических зародышей, которое, вероятно, под действием одновременно возникающих микротечений, может изменять свою форму.

Импульсные и постоянные магнитные поля способствуют переводу “медленных разрядов” в режим пробоя, соответствующий “быстрым разрядам”. Последние, полученные любым способом, не приводят к появлению в предпробойной стадии достаточных объемов газовой фазы, обеспечивающих эффективные кавитационные процессы на дальней послеразрядной стадии. Что касается вопроса подавления газовыделения, то это может происходить за счет уменьшения интенсивности теплообмена в магнитном поле. Область максимального уменьшения теплообмена связана со сдвигом критического значения числа Рейнольдса в магнитном поле [6]. Однако, по существу наших исследований, это имеет второстепенное значение, поскольку практически электрический взрыв в разрядно-импульсных технологиях применяется без использования внешних магнитных полей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Малюшевский П.П.* О механизме тонкого измельчения материалов при электрическом взрыве в ограниченном объеме // *Электронная обработка материалов.* 1982. № 3. С. 58 – 63.
2. *Малюшевский П.П., Горovenko Г.Г., Левда В.И. и др.* Исследование влияния внешнего давления и магнитных полей на электрический разряд в жидкости // *Электронная обработка материалов.* 1987. № 4. С. 33 – 39.
3. *Лекомцев В.А., Сыромятников А.Г.* О возможности практического применения предпробивных явлений в воде // *Физика импульсных воздействий на конденсированные среды // Тез. докл. VI науч. школы, сентябрь 1993. Николаев, 1993. С.*
4. *Ушаков В.Я.* Импульсный электрический пробой жидкостей. Томск, 1975.
5. *Розенберг Л.Д.* Мощные ультразвуковые поля. М., 1968.
6. *Солоухин Р.И.* Ударные волны, образующиеся при электрическом разряде в воде // *Физическая газодинамика.* М., 1959. С. 143 – 145.

Поступила 07.07.2003

Summary

The phenomenon of originating and formation of a non-linear, volumetric cavitation in water electrolytes filling the reactor, under the influence of electrical explosions is studied. It is noted, that a role of outgassing, as source of blastemals of a cavitation in premonitory stage of underwater electric discharge is great. The ranges of variation by resistivity of solutions, in which one outgassing sufficient for generation of effective cavitation area are established.

ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ИНИЦИИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА НА ВЕРОЯТНОСТЬ ПРОБОЯ ЖИДКИХ ПРОВОДЯЩИХ СРЕД

*НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете,
пр. Ленина, 2А, г. Томск, 634050, Россия*

Одной из проблем использования электроразрядных технологий является способность формирования канала разряда в проводящих средах, у которых удельное сопротивление составляет от $\rho = 4 \cdot 10^2$ до $3 \cdot 10^3$ Ом·см. Такие удельные сопротивления характерны для технической воды, цементных и глинистых буровых растворов, а также для сырья, из которых в процессе воздействия электрических разрядов выходят в жидкость проводящие растворимые компоненты.

Повышение проводимости обрабатываемых жидких сред приводит к резкому увеличению предпробивных потерь, вплоть до величин, соизмеримых с энергией импульса, что, как правило, значительно ухудшает или полностью останавливает технологический процесс. Для уменьшения потерь энергии в предпробивной стадии и формировании локального канала разряда используют различные методы инициирования разряда; большинство из них связаны с увеличением, а в некоторых случаях с ликвидацией затрат энергии на создание перегретой неустойчивости на потенциальном электроде. Например, подвод пузырька воздуха к потенциальному электроду, а не образование его за счет ионных токов; создание повышенной напряженности поля на потенциальном электроде за счет параллельной работы генераторов тока и напряжения (ГИТ – ГИН) и других методов, которые, как правило, усложняют электрическую или технологическую схемы установок. Кроме того, эти методы не всегда можно организовать в некоторых условиях, например, в буровых скважинах или в вязких растворах. Кардинальным решением этой проблемы является использование взрывающихся проводников, однако при многоимпульсной обработке возникают проблемы с подачей проволок в рабочий промежуток, что существенно ограничивает область применения этой методики.

В данной работе рассматриваются два метода инициирования разряда в проводящих жидкостях, которые достаточно просто реализовать в электроразрядных технологиях. Первый метод связан с использованием диэлектрической вставки в потенциальный электрод, а второй – с использованием протекающего зарядного тока конденсаторной батареи генератора импульсов через рабочий промежуток. Эти методы должны влиять на условия возникновения перегретой неустойчивости у потенциального электрода.

В качестве источника импульсов использовался генератор импульсных токов (ГИТ) с параметрами: $U_0 = 30 - 70$ кВ, $L = 5$ мкГ, $W_0 = 0,180 - 4,5$ кДж и частотой ~ 1 Гц. Рабочая камера представляла собой металлический стакан с внутренним диаметром 280 мм, потенциальный электрод с металлическим стержнем диаметром 19 мм, который через проходной изолятор и изоляционную крышку вводился в рабочую камеру. Длина изолятора позволяла варьировать длину оголенной части потенциального электрода (оголенная часть ~ 10 мм). Длина рабочего промежутка между электродами варьировалась от 10 до 100 мм. В сериях опытов число импульсов составляло от 20 до 30 импульсов. Вероятность пробоя промежутка оценивалась по форме импульсов напряжения с использованием запоминающего осциллографа С8-17. Эксперименты проводились при положительной полярности импульсов, подаваемых на потенциальный электрод. В качестве жидких сред в работе применялась техническая вода с удельным сопротивлением и цементный раствор с водоцементным соотношением 0,5 и удельным сопротивлением $\rho \approx 1 \cdot 10^3$ Ом·см.

Рассмотрим метод инициирования разряда при использовании диэлектрической вставки в потенциальный электрод. На рис.1 представлена конструкция потенциального электрода с диэлектрической вставкой.

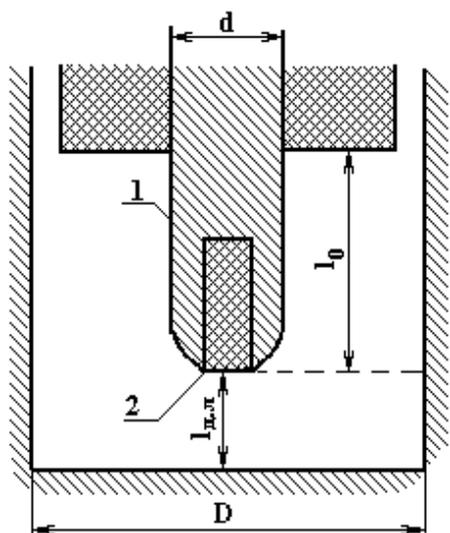


Рис.1. Конструкция электродной системы.

1 – потенциальный электрод; 2 – диэлектрическая вставка.
 D – внутренний диаметр рабочей камеры, d – диаметр потенциального электрода, $l_{р.п.}$ – длина рабочего промежутка, l_0 – длина оголенной части потенциального электрода

Использование изоляционной вставки как инициирующего элемента основывается на следующих предпосылках. Известно [1], что наиболее слабым звеном электродной системы является так называемая «тройная точка», которая находится на границе изоляции потенциального электрода ($\epsilon_{и} \approx 2 - 3$), металла электрода ($\epsilon_{м} \approx \infty$) и обрабатываемой среды ($\epsilon_{с} \approx 80$). Развитие разряда зачастую начинается с этой точки, хотя она находится на большем расстоянии от заземленного электрода, чем составляет длина рабочего промежутка. Это, как правило, приводит к выходу из строя изоляции потенциального электрода (пробую и разрушению).

Существует мнение, что этот процесс связан с концентрацией и искажением поля вблизи потенциального электрода, тем более, что использование изоляционной вставки в газовых разрядниках для стабилизации времени срабатывания достаточно известно [2]. Полагаем, что вынос тройной точки непосредственно в рабочий промежуток может значительно улучшить условия создания перегретой неустойчивости вблизи потенциального электрода за счет увеличения локальной напряженности поля и соответственно уменьшения времени до момента развития разряда [3].

Нами проведена серия опытов по пробую технической воды при энергии импульса $W_0 = 0,54$ кДж и напряжении $U_0 = 30$ кВ со вставкой из различных диэлектрических материалов. Длина рабочего промежутка изменялась от 10 до 60 мм. Оценивалась вероятность пробоя промежутков. Результаты представлены в табл. 1, для сравнения в ней даны вероятности пробоя рабочих промежутков.

Как видно, различные изоляционные вставки, расположенные в торце потенциального электрода, увеличивают вероятность пробоя промежутка по сравнению с пробоем этих же промежутков без вставки $\sim (15 - 22\%)$, что указывает на ее влияние при образовании перегретой неустойчивости вблизи потенциального электрода. Кроме того, различные материалы изоляционной вставки по-разному влияют на вероятность пробоя. Лучшие показатели оказались у полиэтилена низкого давления, а резина и текстолит практически не влияют на вероятность пробоя. Учитывая то, что диэлектрическая проницаемость у всех материалов достаточно близка, утверждение об искажении поля вблизи потенциального электрода и его влияние на предпробивные процессы проблематичны.

В исследованиях также отмечено, что через 10 – 30 импульсов, поданных на электрод, влияние изоляционной вставки на вероятность пробоя промежутка прекращается. Этот экспериментально подтвержденный факт не может быть объяснен концентрацией поля у потенциального электрода. Интересно, что замена изоляционной вставки на новую из того же материала, снова увеличивает вероятность пробоя промежутка и через определенное количество импульсов процесс повторяется. Влияние вставки на искажение поля в рабочем промежутке нами проверено при установке ее в заземленный электрод (где конфигурация поля близка к равномерному), причем высота вставки достигала 80% от длины рабочего промежутка. В этом положении вставки зафиксировано отсутствие эффекта.

Таблица 1

Материал вставки	Вероятность пробоя, %					
	Рабочий промежуток, мм					
	10	20	30	40	50	60
Полиэтилен низкого давления	81	77	69	60	44	28
Полиэтилен высокого давления	78	74	65	58	37	26
Поливинилхлорид	75	71	64	54	38	21
Силикон	73	67	60	52	35	19
Резина	46	34	18	7	2	0
Текстолит	45	32	16	6	1	0
Электрод без вставки	40	26	9	1	0	0

На наш взгляд, качественно объяснить влияние изоляционной вставки на электрический пробой можно следующим образом: при подаче первых импульсов в изоляционной вставке образуется объемный положительный заряд, который создает на поверхности металл–изоляция разность потенциалов, достаточную для пробоя микрозазоров; при этом образуются пузырьки газа, которые и являются иницирующим фактором пробоя промежутка. По мере увеличения объемного заряда разность напряжений в микрозазорах уменьшается и процесс газообразования прекращается, поэтому через определенное количество импульсов вставка прекращает оказывать влияние на пробой промежутка. Таким образом, процесс иницирования разряда изоляционной вставкой, связанный с эффектом на границе металл–изоляция, может быть использован в технологиях, где требуется однократное воздействие импульсов. При многоимпульсном процессе этот метод иницирования не может быть рекомендован.

Второй метод иницирования, рассмотренный в работе, связан с использованием зарядного тока конденсаторной батареи для уменьшения времени создания перегретой неустойчивости вблизи потенциального электрода [4, 5]. В работе использованы две схемы подключения рабочего промежутка, представленные на рис.2. Схема рис.2, а является традиционной, в которой разрядный промежуток отделен от генератора импульсов разрядником. По схеме рис.2, б рабочий промежуток включен в зарядную цепь генератора импульсов. При этом до формирования импульса по рабочему промежутку протекает зарядный ток

$$i_3(t) = \frac{U_0}{R_0} \cdot e^{-\frac{t_3}{t_3 - RC}},$$

где R_0 – сопротивление зарядного промежутка, U_0 – зарядное напряжение генератора, t_3 – время зарядки конденсаторной батареи, C – емкость конденсаторной батареи.

Плотность тока вблизи потенциального электрода

$$j_3(t) \approx \frac{U_0}{\pi \cdot r_3^2 \cdot R_0} \cdot e^{-\frac{t_3}{t_3 - RC}} \approx \frac{4U_0}{\pi \cdot d^2 \cdot R_0} \cdot e^{-\frac{t_3}{t_3 - RC}},$$

где d – диаметр потенциального электрода.

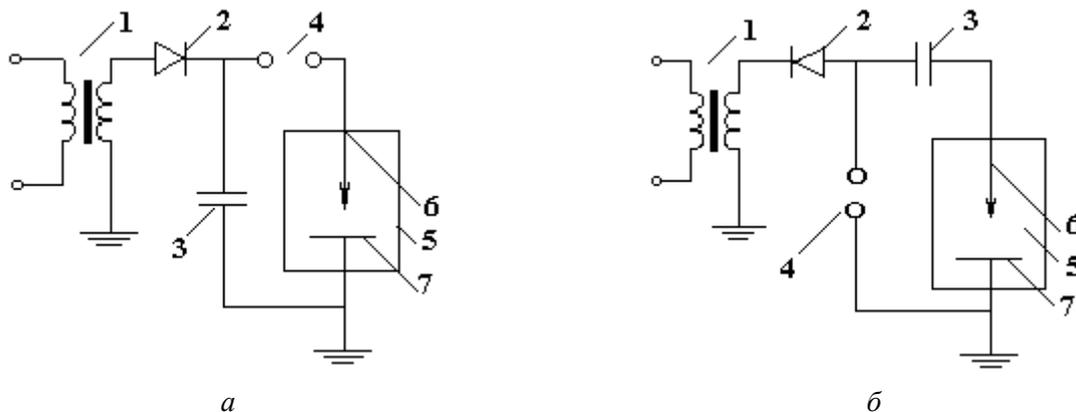


Рис.2. Схемы подключения рабочего промежутка.

а: без зарядного тока при положительной полярности высоковольтного электрода, б: с зарядным током при положительной полярности высоковольтного электрода. 1 – высоковольтный трансформатор, 2 – выпрямитель, 3 – конденсаторная батарея, 4 – шаровый разрядник, 5 – рабочая камера, 6 – высоковольтный электрод, 7 – заземленный электрод

Если время создания перегретой неустойчивости будет достаточно мало ($t_n \ll t_3$), то можно ожидать образования газовых пузырьков еще до подачи импульса от генератора. В этом случае пузырьки, образованные на стадии зарядки конденсаторной батареи, будут иницирующим фактором при пробое рабочих промежутков. Если при изменении зарядного тока и напряженности поля у потенциального электрода при зарядке конденсаторной батареи не может создаваться перегретая неустойчивость жидкости, то этот объем жидкости будет иметь повышенную температуру, и при подаче импульса условия для возникновения перегретой неустойчивости улучшатся.

Опыты проводились на технической воде и водных растворах цемента в той же рабочей камере и электродной системе. Результаты оценки вероятности пробоя в технической воде представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, вероятность пробоя рабочих промежутков увеличивается с использованием зарядного тока конденсаторной батареи. На энергиях импульса 0,54 и 1,35 кДж этот эффект более заметен в связи с тем, что предпробойные потери в электродной системе соизмеримы с энергией импульса.

Таблица 2

Длина рабочего промежутка $l_{р.п.}$, мм	Энергия импульса, кДж					
	0,54		1,35		2,25	
	схема, а	схема, б	схема, а	схема, б	схема, а	схема, б
10	100	100	100	100	100	100
20	90	100	100	100	100	100
30	65	85	100	100	100	100
40	55	65	94	100	100	100
50	10	46	71	95	100	100

В табл. 3 представлены данные по вероятности пробоя водоцементного раствора с удельным сопротивлением $\rho = 4 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Таблица 3

Длина рабочего промежутка $l_{р.п.}$, мм	Энергия импульса, кДж					
	0,54		1,35		2,25	
	схема, а	схема, б	схема, а	схема, б	схема, а	схема, б
10	12	35	100	100	100	100
20	2	10	95	100	100	100
30	0	0	68	84	98	100
40	0	0	56	68	74	91

Как видно из представленных данных, эффект инициирования разряда в таких проводящих средах, как водные цементные растворы, также присутствует.

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Использование в качестве иницирующего фактора изоляционной вставки в потенциальный электрод или протекание зарядного тока через рабочий промежуток позволяет увеличить вероятность пробоя в проводящих средах.
2. Использование изоляционной вставки целесообразно в электродных технологиях, где используется в процессе несколько импульсов.
3. Использование схем, обеспечивающих протекание зарядных токов в рабочем промежутке, можно рекомендовать для использования практически во всех электроразрядных технологиях, особенно при обработке высокопроводящих жидкостей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрический разряд в воде. М., 1971.
2. А. с. 1017142 СССР от 28.12.1981. Способ поджига управляемого разрядника. / Подплетнев В.И., Рязанов Н.Д., Шубин Б.Г.
3. Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей. Томск, 1975.
4. Барская А. В. Исследования диспергирования растительного сырья и экстракция водорастворимых веществ с использованием импульсных разрядов: Дис. канд. техн. наук. Томск, 1998.
5. Филатов Г.П. Активация глинистых буровых растворов импульсными электрическими разрядами: Дис. канд. техн. наук. Томск, 1985.

Поступила 27.06.03.

Summary

Two methods of discharge initiation in conducting liquid are considered as they can be easily realized in electro-discharge procedures. A dielectric insert in the potential electrode is used in the first method and the second methods uses the flowing charging current of a pulse generator capacitor battery through the working gap. The methods exert an effect on overheating instability forming around the potential electrode and allow to increase probability of breakdown in conducting media.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

С.Н. Маслоброд, В.Г. Каранфил*, С.Т. Чалык, Л.И. Кедис*

МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОЛЯ МЫСЛИ НА РАСТЕНИЯ

Институт генетики АН РМ,

ул. Пэдурий, 20, г. Кишинев, MD–2002, Республика Молдова

**Международный центр энерго-информационных наук «ЗЕЯ»,*

ул. Дечебал, 139 б, г. Кишинев, MD–2043, Республика Молдова

Экспериментально показано, что вокруг тела человека в процессе жизнедеятельности возникают физические поля (электрические и магнитные) и излучения (инфракрасное тепловое, радиотепловое, акустотепловое, оптическая хемилюминесценция), а также химическая микроатмосфера (“химическое поле”) [1]. При волевом (мысленном) усилии эти факторы существенно изменяются, в особенности у отдельных операторов [1 – 5], которые способны при этом дополнительно генерировать некую неидентифицированную “физическую субстанцию” [5], оказывающую влияние на объекты живой и неживой природы [1 – 6]. Обобщенно данные феномены можно охарактеризовать как специфическое поле, организованное мыслью человека.

Исследование энерго-информационного воздействия поля мысли человека на объекты окружающего мира в последнее время стали приобретать научную респектабельность и привлекать внимание ученых в основном в аспектах медицины, техники и телепатии [1 – 5]. В меньшей степени предметом исследования традиционной науки является проблема влияния мысли на растительный объект. Между тем такие исследования могут внести фундаментальный вклад в эниологию – новое научное направление, рожденное на стыке естествознания и парапсихологии и изучающее тотальный энерго-информационный обмен в природе [2].

Растение обладает чрезвычайно высокой чувствительностью к внешним раздражителям различной природы и интенсивности, иногда на порядок превышающей чувствительность объектов животного происхождения [7, 8]. В растении отсутствует нервная система, которая часто становится причиной неадекватного отклика приемника на действие мысленной программы (МП) из-за эффекта самовнушения [3 – 5]. Следовательно, с помощью МП можно получить более объективную и достоверную информацию о ее функции, благодаря лучшей воспроизводимости полученных данных. Это открывает путь, с одной стороны, к изучению механизмов влияния МП на живой объект и, с другой стороны, к идентификации МП и разработке методов экспресс – тестирования операторов, в особенности будущих селекционеров и генетиков растений [9 – 11]. Необходимо учесть и нравственно-этический момент, который не нарушается при использовании растений в качестве объекта воздействия МП.

В результате адресно-целевого мысленного общения с растением специалистов сельского хозяйства и ученых селекционеров и генетиков, а также выдающихся операторов можно надеяться на успешное решение ряда актуальных задач практического растениеводства. И это, по нашему глубокому убеждению, не голословное, ни на чем не основанное утверждение, не спекуляция на интересе к теме, а реальное использование еще не познанных возможностей человека-творца.

Первые опыты в этом направлении были проведены Бакстером в конце 60-х годов XX столетия [12]. И, несмотря на методические погрешности, методологически они оказались правильными. Как показали последующие исследователи [4], растительный объект является достаточно восприимчивым к МП человека, что выразилось в возникновении у растений быстрой электрической реакции в ответ на МП даже обычного человека, не информированного в отношении задачи опыта.

Таким образом, в принципе оператором эзотерического эксперимента может стать каждый человек. Однако авторы отмеченных сообщений использовали аппаратуру, не позволяющую регистрировать четкую реакцию растения на МП: амплитуда ее была порядка нескольких десятков микровольт [4], что находится на уровне приборного “шума”, то есть артефакта [8]. Начиная с 1980 года нами в лаборатории биофизики, а позже на Биотроне Института генетики АН Молдовы стали проводиться подобные опыты с использованием традиционной для электрофизиологии растений методики, благодаря чему удалось получить параметры электрической реакции растения на МП, соизмеримые с таковыми при действии обычных физико-химических факторов (амплитуда составляла порядка от нескольких до десятков милливольт) [8, 13, 14]. При этом многоканальное отведение биопотенциалов позволило обеспечить единство места и времени проведения многовариантного эксперимента в динамике без механического травмирования объекта. Было показано, что с помощью этой реакции можно, в принципе, идентифицировать такие МП, как подача энергии, имитация факторов среды, вживание в образ объекта и др. [9]. Поскольку в числе операторов-индукторов МП находились научные сотрудники Института генетики, возникло предположение, что по параметрам электрической реакции растения на их МП можно тестировать сотрудников по профпригодности, то есть по способности нетрадиционно работать в селекции и генетике растений. В случае успеха такого подхода мог получить, в определенной степени, обоснование феномен «удачливого» автора новых сортов или гибридов. Данный феномен уже трактуется серьезными учеными с позиции концепции «селекция как искусство» [11], иными словами, как результат логического и чувственного подходов.

Как известно, электрическая реакция живого объекта – первичный по времени возникновения и наиболее четкий отклик живой системы на действие любого раздражителя [8, 15]. Она является следствием изменения функции (проницаемости) клеточных мембран и функции общего многоуровневого электромагнитного поля организма [15]. Следовательно, мы изучаем энергоинформационное взаимодействие полей, создаваемых мыслью человека и растением.

Ранее нашими исследованиями показано, что после мысленного вхождения человека в образ растения оно способно в последующем воспринимать адресно-целевую МП человека-оператора, иными словами, его энерго-информационный программный блок (ЭИПБ), реагируя на него изменением не только электрических [9], но и морфофизиологических [16, 17] и генетических [18, 19] параметров и признаков. Убедительным подтверждением функциональности ЭИПБ являются наши опыты по индукции с помощью ЭИПБ рекомбинаций, то есть перестроек генов в генотипах кукурузы [19]. В настоящем сообщении приводятся новые данные по влиянию ЭИПБ на организменном уровне (всхожесть семян и рост проростков) и на генном уровне (частота и спектр хромосомных нарушений – ЧХН и СХН). В публикацию вошла также часть прежних данных, по-новому обсуждаемых в связи с более широким представлением экспериментального материала по проблеме.

Цель исследования

Изучить общее и адресно-целевое действие мысленных программ или энерго-информационных программных блоков (ЭИПБ) операторов на растения по индукции у растений с помощью этих факторов морфофизиологических и генетических изменений.

Задачи исследования

1. Экспериментально показать влияние ЭИПБ на растения разных видов и генотипов (при воздействии ЭИПБ на семена) по критериям всхожести и энергии прорастания семян, роста и архитектоники (левизны и правизны) проростков, частоте хромосомных нарушений в первичных корешках проростков, частоте рекомбинаций маркерных генов, числу гаплоидных растений, способных давать пыльцу в полевых условиях.

2. Провести сопоставление результатов при прямой, опосредованной (через пирамиды) и дистантной подачах ЭИПБ на объект.

Основные элементы методики

Исследования проводились в Институте генетики (ИГ) АН Республики Молдова совместно с Международным центром энерго-информационных наук “ЗЕЯ” в 1999 – 2003 годах. Часть результатов, приводимых в настоящей работе, были получены ранее в ИГ. В качестве операторов (индукторов ЭИПБ) выступали сотрудники ИГ и Центра “ЗЕЯ”.

В настоящем сообщении имена сотрудников, согласно их желанию, не приводятся. Основная задача операторов заключалась в создании надежно функционирующей системы человек-растение путем глубокой медитации и концентрации. Оператор вживался в образ объекта, затем создавал его фантом (мыслеобраз) и посылал ему ЭИПБ общего или адресно-целевого типа, одновременно имитируя на фантоме реализацию ЭИПБ (оператор А). Дополнительно подавался ЭИПБ согласования объекта в себе самом, с самим собой и всего, что есть он, с миром, окружающим его в линейных и про-

странственно-временных проявлениях, выхода на оптимум или минимум энерго–информационного статуса объекта (операторы *Б*, *В*). Оператор подавал ЭИПБ непосредственно на объект исследования (семена) или на объект неживой природы (пирамиду, кружку, воду и др.), который после восприятия ЭИПБ становился терафимом, источником этого ЭИПБ, способным оказывать воздействие на объект исследования аналогично ЭИПБ первоисточника или оказывать воздействие на другой объект, превращая его в терафим II звена.

Пирамиды, используемые в качестве контроля (чистые) и терафимов (заряженные ЭИПБ), представляли собой пентаэдры (в основании – квадрат). В одиночном варианте использования пирамиды устанавливались основанием вниз или вверх над объектом; в варианте из 6 пирамид – основанием к объекту в трех взаимно перпендикулярных направлениях симметрично по отношению друг к другу (по вертикали и горизонтали). Такая схема используется в Центре “ЗЕЯ” при проведении сеансов оздоровления пациентов [20].

Методика проведения исследований

В качестве материала для исследований использовались: кукуруза (гибриды ПЗ978, М215, М450, М428, М381, Дебют и линии Р1 и Р2 – родительские формы гибрида Дебют); ячмень (сорт Ялтушковская); пшеница (сорт Молдова); тритикале (сорта КС-4, Инген-73); перец (сорт Герцог); томат (сорта Санта Мария, Марьюшка); подсолнечник (сорт Сомбреро). Семена проращивали на дистиллированной или водопроводной воде в термостате при +24°C в чашках Петри или в почве в вегетационном сосуде (при такой же температуре). В каждый вариант опыта входило 100 – 300 семян. Среднее по всхожести вычисляли по средним значениям всхожести в каждой из 3 – 5 чашек Петри или сосудов каждого варианта. Среднеквадратичная ошибка средней арифметической по всхожести семян и длине проростков составила 5 – 10%.

В опыте по влиянию ЭИПБ на архитектуру проростков, то есть на их морфологическую левизну и правизну, была поставлена задача получения с помощью ЭИПБ нужных биоизомеров без их механического разделения в популяции. Из наших многолетних данных на томатах (сорта Санта-Мария, Факел, Нота) следует, что растения из левых (*l*) семян на 15 – 20% продуктивнее, чем из правых (*d*) [21]. Возникла идея проверить морфогенетическое действие ЭИПБ по индукции им *l* и *d* проростков. Для этого на прорастающие семена подавали ЭИПБ (оператор *А*) “энергетический поток *l* вращения” и “энергетический поток *d* вращения” (“*l* – поток” и “*d* – поток”) в течение 5 мин периодически 0, 6, 1 и 24 часа после высаживания семян в почву в вегетационные сосуды. Оценку эффекта проводили по отношению числа *l*-проростков к числу *d*-проростков. У *l*-проростков листья заворачиваются против часовой стрелки, у *d*-проростков – по часовой стрелке [21, 22], соответствующие направления имели и *l* и *d* мысленные потоки. ЭИПБ подавали снизу и сверху объекта.

В опыте с гаплоидными формами кукурузы подача ЭИПБ осуществлялась с помощью терафимов по схеме: оператор *Б* – кружка (терафим I) – водопроводная вода, налитая в кружку (терафим II) – объект (семена). Проверялась возможность использования ЭИПБ для повышения выхода гаплоидных растений, способных давать пыльцу в полевых условиях. Работа проводилась в лаборатории нетрадиционных методов селекции и генетики ИГ по общей программе создания новых продуктивных линий кукурузы из гаплоидов путем удвоения их хромосом. С помощью такого метода линии создаются в несколько раз быстрее, чем с помощью обычных методов [22]. Но здесь узким местом является, во-первых, отсутствие высокоэффективных индукторов гаплоидии и, во-вторых, низкая жизнеспособность гаплоидов после их колхицинирования, так как колхицин является ядом [23]. В нашем опыте семена гаплоидных растений (100 штук в варианте) проращивали на водопроводной воде в термостате при +25°C до появления колеоптилей. Затем верхушки колеоптилей обрезали, и проростки заливали 0,06% раствором колхицина +0,5% DMSO. Спустя 12 часов проростки промывали и высевали на песок, доращивая при естественном освещении на водопроводной воде (норма) и на «заряженной» воде (опыт) до появления двух-трех листочков. Эти проростки высаживали на полевом участке и доводили растения до созревания початков. Вел учет числа выживших проростков, скорости их роста и числа растений, способных давать пыльцу [23].

В опыте с подсчетом ЧХН семена подвергали γ -облучению (доза 500 Гр) с целью индукции в первичных зародышевых корешках проростков высокого уровня ЧХН и СХН. Опыт 1: на сухие γ -обработанные семена М450, Дебют, Р1 и Р2 подавали ЭИПБ прямого и опосредованного (через терафимы) типов (оператор *Б*), далее семена высаживали в почву в вегетационные сосуды. Опыт 2: на γ -обработанные семена М215, Дебют, Р1 и Р2, а также на нормальные семена М215, высаженные в почву в вегетационные сосуды, подавали ЭИПБ одновременно и многократно – с интервалами 0, 6, 12 и 24 часа после высаживания (оператор *А*). Затем в первичных корешках 3 – 4 дневных проростков

в двух опытах определяли ЧХН и СХН в митотических клетках в ана-телофазе по общепринятой методике [24], которая используется также для тестирования факторов среды на мутагенность [25].

Опыты с контролем ЧР (числа рекомбинаций) проводились в 1983 г. Первичные данные опубликованы в 1996 г. [19]. В настоящем сообщении более детально рассматриваются только результаты существенного влияния ЭИПБ на экспрессию конкретных генов растения. Растения кукурузы (гибрид ПЗ978) скрещивали с источником генов O_2 и gl_1 . Фенотипически они проявляются по признакам соответственно “мутный эндосперм зерна” и “глянцевый лист проростка” [26]. Как известно, ген O_2 (иначе “опак”) контролирует синтез белка с высоким содержанием незаменимых аминокислот лизина и триптофана, которые обуславливают высокую питательную ценность зерна [27]. Оператор А после ознакомления с задачей исследования в течение 10 мин воздействовал на сухие семена ЭИПБ “стимуляция ЧР”. Материалы высевали на полевом участке. Проводили самоопыление растений, выросших из этих семян, и получали семена расщепляющейся популяции F_2 (второго поколения). Эти семена в количестве до 680 шт. каждого варианта “норма” (обычные) и “опак” (с мутным эндоспермом) анализировали на содержание в семенах гена O_2 и в проростках гена gl_1 и подсчитывали частоту рекомбинаций (перестановок генов) rf [28].

Результаты

Влияние на всхожесть семян и рост проростков. Сопоставление эффектов прямой, опосредованной (через терафимы) и дистанционной подачи ЭИПБ

1. Вначале ставилась задача проверки адресно-целевого действия ЭИПБ «стимуляция всхожести семян». ЭИПБ подавали на семена разных видов и генотипов растений – овощных (на примере перца) и зерновых (на примере ячменя и кукурузы). Оценку всхожести проводили на 4 и 7-й день проращивания семян согласно методике [29]. Обнаружено существенное по сравнению с контролем повышение всхожести семян перца (в 1,3 раза), ячменя (в 1,9 раз) и кукурузы (в 2,0 – 2,8 раз). Отмеченные соотношения наблюдаются на 4 и 7-й день учета (рис.1).

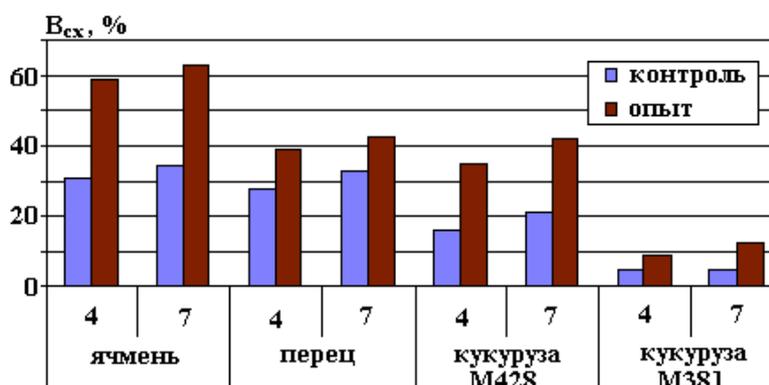


Рис.1. Всхожесть семян на 4 и 7-й день проращивания при действии адресно-целевой ЭИПБ “стимуляция всхожести семян” на сухие семена ячменя (сорт Ялтушовский), перца (сорт Герцог) и на замоченные семена кукурузы (гибриды М428 и М381)

Поэтому в дальнейшем в расчет брали один из сроков. Отметим, что в этом опыте использовались ЭИПБ двух операторов, работающих по индивидуальным методикам (на ячмене и перце – оператор Б, на кукурузе – оператор А).

Результат опыта: при прямой подаче ЭИПБ на сухие и замоченные семена можно существенно повысить всхожесть семян разных видов и генотипов растений.

2. В следующем опыте проверялось действие ЭИПБ (оператор Б) общего типа – стимуляция энерго–информационного статуса растения как такового (ЭИПБ “растение”) и человека как такового (ЭИПБ “человек”, где данное растение используется как продукт питания и оздоровления). Источником ЭИПБ служила пирамида–терафим I звена, который действовал на сухие и замоченные семена томата. Экспозиция воздействия 15 мин. Получено увеличение всхожести семян не только при действии пирамиды–терафима, но и чистой пирамиды (рис. 2). Причем последний вариант показал лучший результат. На замоченных семенах терафим “растение” оказался более эффективным, чем терафим “человек”.

Возникает предположение, что в целом ЭИПБ в данном опыте на томатах не сработал.

3. Эффективность использования пирамид в качестве терафимов, несущих ЭИПБ «растение» и «человек», проверена на сухих семенах ячменя. Дополнительно введен вариант низкотемператур-

ного стресса (+ 8°C в течение 3 часов). При нормальной температуре наблюдалась стимуляция всхожести семян. Вариант терафима уже несколько превышал вариант чистой пирамиды. Стресс привел к существенному снижению всхожести в варианте терафима “растение”. По другим вариантам различия не наблюдались (рис. 3).

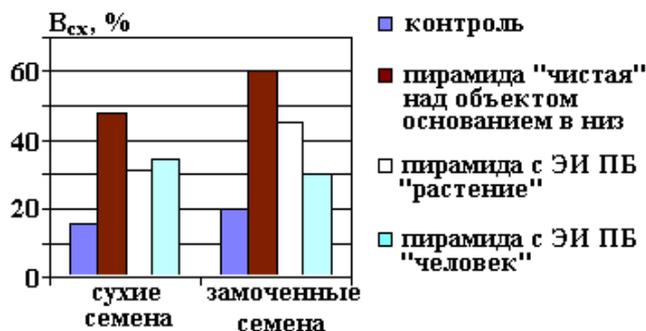


Рис. 2. Всхожесть семян томата (сорт Санта Мария) при действии пирамид – терафимов с ЭИПБ общего типа “стимуляция жизнеспособности” растения и человека на сухие и замоченные семена

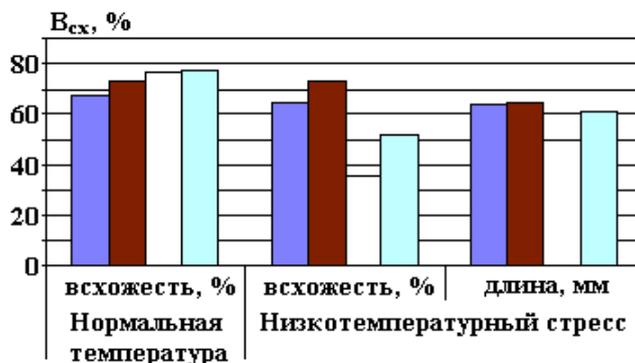


Рис.3. Всхожесть семян и длина проростков ячменя (сорт Ялтушковский) на 12-й день проращивания при 15–минутном действии на сухие семена пирамиды–терафима с ЭИПБ “растение” и “человек” в условиях нормы и низкотемпературного стресса (+ 4°C в течение 6 час) Обозначения те же, что на рис.2.

Возможно, в данном опыте просматривается самостоятельность действия ЭИПБ по сравнению с действием ее носителя – чистой пирамиды.

4. Предыдущий опыт был изменен только по одному элементу – экспозиции воздействия пирамиды–терафима на семена. Она составила 4 суток – срок учета всхожести семян и длины coleoptiles. Различий между вариантами не обнаружено (рис. 4). Ошибки средних перекрывают различия или равны различиям между средними.

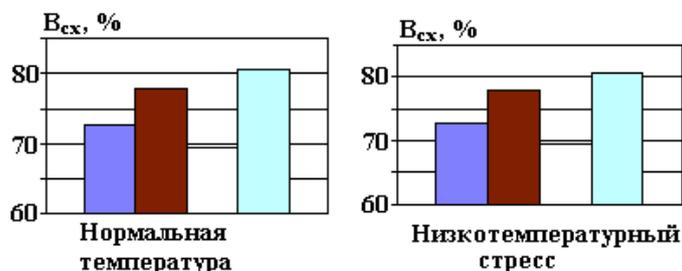


Рис.4. Всхожесть семян ячменя (сорт Ялтушковский) на 12-й день проращивания при пролонгированном (в течение 4 суток) действии пирамид-терафимов «растение» и «человек» Обозначения те же, что на рис.2

Поэтому есть серьезное основание полагать, что кратковременная экспозиция подачи ЭИПБ на семена растений более предпочтительна, чем длительная.

5. В этом опыте ЭИПБ создавал оператор В. Был использован другой объект – семена тритикале. Факторы воздействия – терафим I звена (пирамиды и водопроводная вода) и II звена (водопроводная вода, получившая ЭИПБ от пирамиды–терафима). Использовались две контрастные программы: “стимуляция всхожести семян” и “ингибирование всхожести семян”. После воздействия терафимов (в течение 15 мин) семена подвергали температурному стрессу (+ 6°C в течение 24 часов). Был расширен контроль – использовались не только чистые пирамиды основанием вниз над объектом, но и основанием вверх. Получены поразительные, на наш взгляд, результаты: если программа «стимуляция» показала только тенденцию повышения всхожести, то программа “ингибирование” вызвала резкое снижение всхожести на целый порядок (рис. 5). В целом терафимы I и II звеньев сработали аналогичным образом. Следовательно, ЭИПБ, посаженные на разные носители, различающиеся по консистенции (твердые и жидкие) и конструктиву (жесткая геометрическая конструкция и лабильная поликристаллическая структура), способны нести самостоятельную адресно-целевую функцию ЭИПБ оператора. Представляет интерес и результат действия чистой пирамиды основанием вверх – он оказался на уровне действия программы “ингибирование”. Таким образом, чистую пирамиду также можно использовать как фактор изменения посевных качеств семян. Примечательно, что и по длине coleoptилей получены аналогичные закономерности, где различия по сравнению с контролем (семена без воздействия) высокосущественны.

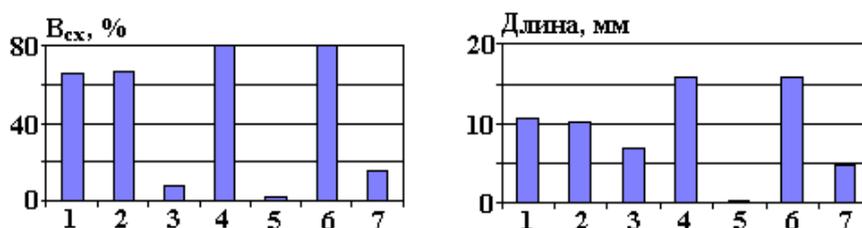


Рис. 5. Всхожесть семян тритикале (сорт КС-4) и длина coleoptилей на 4-й день проращивания семян при действии терафимов и низкотемпературного стресса (+ 6°C в течение 24 час) на семена 1 – контроль; 2, 3 – пирамида чистая над объектом основанием соответственно вниз и вверх; 4, 7 – действие терафимов I и II звеньев с ЭИПБ адресно-целевого типа “стимуляция всхожести семян” (4, 6) и “ингибирование всхожести семян” (5, 7) по линии связи “оператор-пирамида-объект” (4, 5) и “оператор-пирамида-вода-объект” (6, 7). Стресс на семена, замоченные в течение 24 часов

Итак, очевидна четкая работа контрастных адресно-целевых ЭИПБ, посаженных на различные объекты неживой природы. Подчеркнем, что результативность опыта обеспечена оператором высокого уровня.

6. Необходимо было удостовериться в том, что полученные выше закономерности не случайны. В связи с этим опыт был продолжен с тем же объектом и оператором. Был исключен вариант чистой пирамиды, но добавлен вариант прямой подачи ЭИПБ на объект для сравнения с данными при опосредованной подаче ЭИПБ – через терафимы I и II звеньев (пирамиды и воду) и II звена (воду). Кроме того, опыт проведен также при нормальной температуре. В целом подтвердились результаты прежнего опыта – получены высокосущественные различия по всхожести семян и размерам проростков между контрастными ЭИПБ “стимуляция” и “ингибирование” не только при низкотемпературном стрессе, но и при нормальной температуре, где абсолютные значения параметров были в несколько раз выше (рис. 6). Наконец, была обнаружена идентичность эффектов от прямого и опосредованного (через терафимы I и II звеньев) действия ЭИПБ.

Это наглядно доказывает сохранение функции ЭИПБ при зарядке им предметов неживой природы и открывает возможность создания удобных в эксплуатации, стабильных, долговременных и легко тиражируемых источников ЭИПБ.

7. При создании терафимов оператор как бы отстраняется от объекта исследования и работает с его фантомом, отождествляя последний с объектом или предметом, который становится после этого терафимом. Поэтому логично ожидать дистантный эффект ЭИПБ, когда оператор, не видя объект, работает с его фантомом. Такого рода опыт проведен операторами при подаче ЭИПБ на объект на расстоянии до 3 км, “стимуляция всхожести семян” на семенах тритикале и томата с низкой исходной всхожестью. По тритикале (сорт Инген-73) всхожесть в контроле составила 3,4%; в опыте – 6,0% (оператор В) и 12,1% (оператор А); по томату (сорт Марьюшка) – контроль 27,7%; опыт – 35,0% (оператор А).

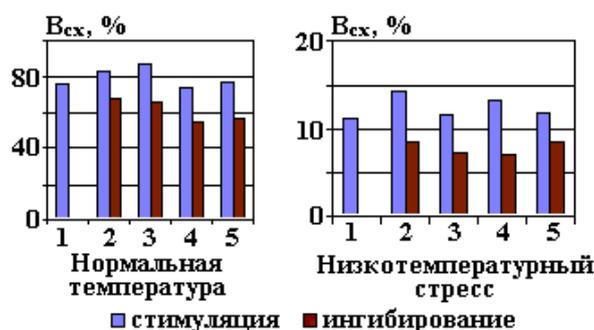


Рис. 6. Всхожесть семян тритикале (сорт КС-4) при прямом и опосредованном (через терафимы I и II звеньев) действии на семена ЭИПБ адресно-целевого типа “стимуляция всхожести семян” и “ингибирование всхожести семян” в условиях нормальной температуры и низкотемпературного стресса (4°С в течение 24 часов)

1 – контроль, 2 – ЭИПБ прямой, 3-5 – ЭИПБ опосредованный через пирамиду (3), воду (4), пирамиду и воду (5)

Как видно, эффекты соизмеримы с эффектами при прямой (визуальной) и опосредованной (через терафимы) подачах ЭИПБ на семена растений (рис. 7).

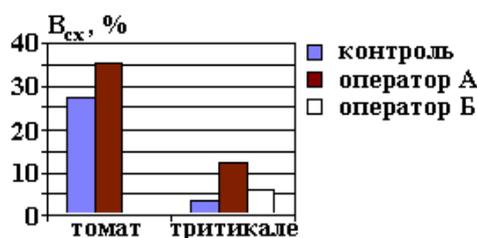


Рис. 7. Всхожесть семян томата (сорт Марьюшка) и тритикале (сорт Ингем-73) при дистантном действии ЭИПБ операторов А и Б

Влияние на архитектуру (левизну и правизну) проростков

Подача на семена разных видов растений (кукурузы, подсолнечника, томата и пшеницы) ЭИПБ «l поток» и «d поток» привела к существенному изменению исходного распределения l и d проростков в сторону левизны, либо правизны. Знак эффекта четко зависел от типа ЭИПБ и способа подачи его на объект (сверху и снизу). ЭИПБ «l-поток» и «d-поток» при подаче снизу индуцировали преимущественно соответственно l и d проростки, при подаче сверху – d и l проростки, то есть эффект обращался (табл. 1). Причина заключается, по-видимому, в том, что в первом случае вектор потока совпадал с вектором роста стебля растения, а во втором случае объект воспринимал фактор в зеркальном варианте.

В последующем целесообразно использовать доминантную по продуктивности форму растения, не только механически выделяя ее из популяции, но и получая с помощью мысленного воздействия на семена перед их проращиванием.

Таблица. 1. Отношение l/d проростков при действии на проросшие семена ЭИПБ «вращающийся энергетический поток»

Расположение фактора по отношению к объекту	Кукуруза (гибрид Дебют)		Томат (сорт Санта-Мария)		Подсолнечник (сорт Сомбреро)		Пшеница (сорт Молдова)	
	Направление вращения потока							
	L	d	l	d	l	d	l	d
Над	0,87	1,80	0,93	1,30	0,84	1,19	0,53	1,33
Под	1,64	0,74	1,95	0,74	1,81	0,73		

Примечание: l, d – вращение соответственно против и по часовой стрелке (левое и правое) листа проростка и потока ЭИПБ; l/d проростков кукурузы, томата, подсолнечника и пшеницы в контроле равно соответственно 1,00; 1,21; 1,01 и 0,75.

Влияние на жизнеспособность гаплоидных растений

В этом опыте ЭИПБ подавали по линии связи «оператор *B* – кружка – водопроводная вода – проростки гаплоидных растений», то есть объект получал ЭИПБ от терафима II звена. Получены пока предварительные данные. Жизнеспособность проростков в опыте повысилась в несколько раз (по числу растений и их высоте). В полевых условиях из этих проростков выросло в 3,3 раза больше растений, способных давать пыльцу, то есть дать начало новым линиям с диплоидным набором хромосом. Это открывает реальную возможность ускоренного получения новых линий из гаплоидных форм кукурузы.

Влияние на частоту хромосомных нарушений (аббераций) в первичных корешках проростков

При подаче ЭИПБ на γ -обработанные и нормальные семена линий и гибридов кукурузы обнаружено существенное изменение (снижение и увеличение) ЧХН в первичных корешках проростков, выросших из этих семян, а также отсутствие эффекта (табл. 2). Планируемого однозначного результата не получено. Эффект, по-видимому, обусловлен сложными, пока неизвестными причинами, и отличается при подаче на семена ЭИПБ 1): от разных операторов, 2) прямых и через терафимы, 3) от разных терафимов. Так, ЭИПБ оператора *A* вызывали чаще увеличение ЧХН (у Дебюта, P1 и M215, в последнем случае это увеличение наблюдалось и при действии ЭИПБ на нормальные необлученные семена), у P2 эффект отсутствовал. В свою очередь ЭИПБ оператора *B* вызывал увеличение ЧХН у P2 и уменьшение ЧХН у M450; по Дебюту, P1 и M215 эффект отсутствовал. Созданные оператором *B* терафимы «система шести пирамид» у P2 не дали эффекта, у Дебюта вызвали снижение ЧХН; терафим «вода» (от терафима «кружка», использованного в опыте с гаплоидами кукурузы) у P2 вызвал повышение ЧХН. Во всех вариантах с повышением ЧХН наблюдался сдвиг СХН в сторону образования одиночных хромосомных мостов, в особенности при действии ЭИПБ (табл. 2).

Таким образом, закономерностей в действии разных типов ЭИПБ на один и тот же объект и одинаковых типов ЭИПБ на различные объекты не обнаружено, но наличие самого факта существенного влияния ЭИПБ на растения на хромосомном уровне не вызывает сомнений.

Влияние на частоту рекомбинаций (перестановок маркерных генов)

В контроле при проращивании нормальных и опакowych семян были получены проростки с геном gl_1 соответственно 7,12 и 65,26%. В опыте (при воздействии ЭИПБ) – 8,79 и 34,37%. Таким образом, с помощью ЭИПБ удалось изменить фенотипическое проявление гена gl_1 («глосси») – увеличить число растений с этим геном в норме и резко уменьшить их число в варианте O_2 («опак»). Число опакowych семян (и растений из них) из общего числа растений составило в контроле 20,65%, в опыте (при подаче ЭИПБ) – 41,29%.

Следовательно, с помощью ЭИПБ удалось почти вдвое повысить число растений с хозяйственно-ценным геном O_2 . Частота рекомбинаций в результате действия ЭИПБ также оказалась существенно выше, чем в контроле (rf опыта = $35,8 \pm 2,96\%$, rf контроля = $15,2 \pm 1,84\%$, $t_{кр} = 5,9$).

Эффект изменения частоты рекомбинаций при реализации адресно-целевой ЭИПБ может быть использован при создании форм растений (линий и гибридов) с ценными признаками (в частности, биохимических мутаций), контролируемых конкретными маркерными генами.

Обсуждение

Авторы настоящего сообщения, вынося на суд читателей необычные для тематики данного академического журнала материалы, относящиеся к парапсихологии, в частности к эффектам поля мысли на растениях, полностью отдают себе отчет в том, что представленные материалы могут вызывать у некоторых читателей недоверие и строгое критическое отношение, поскольку подобные сообщения часто сопровождаются околону научными спекуляциями. Именно по этой причине один из авторов данной статьи вначале также критически воспринял идею Бакстера о «мыслящих» растениях [8].

Однако заинтересованные попытки разобраться с вопросом постепенно привели его к изменению первоначального отрицательного мнения. Автор на личном примере еще раз убедился в справедливости исходной позиции настоящего исследователя – быть непредвзятым и прежде чем выносить окончательный вердикт, постараться провести, по возможности, собственную проверку «сумасшедшей» идеи. Как сказал профессор МГТУ им. Баумана доктор технических наук В.Н. Волченко, «терпимость плюс умный нравственный барьер – вот путь закономерного разрешения дилеммы традиционного и нетрадиционного знания» [6]. Величие науки и в том, что она – вне кастовости и корпоративных амбиций.

Первый необходимый шаг на пути сближения очевидного и невероятного – накопление достоверной феноменологии (авторы убеждены в принципиальной воспроизводимости парапсихологи-

ческих феноменов). Это, например, позволило перевести космогеофизику из разряда «лженауки» (как считали некоторые ортодоксы) в перспективную область академического знания [30].

Таблица 2. Частота и спектр хромосомных нарушений (аббераций) в клетках корешков проростков кукурузы при действии γ -облучения (500 Гр) ЭИПБ оператора и терафимов на семена

Гено-тип	Вариант	Количество исследованных аноктелофаз, шт	Число аббераций, %	Типы аббераций, шт			
				I	II	III	IV
M450	Норма	413	$3,0 \pm 0,5$	3	–	2	–
	γ	629	$23,7 \pm 1,7$	84	26	24	10
	γ +ЭИПБ Б	234	$10,2 \pm 1,9$	24	–	–	–
Дебют	Норма	326	$1,8 \pm 0,5$	2	2	2	–
	γ	531	$20,9 \pm 1,7$	84	12	9	6
	γ +ЭИПБ А	258	$30,2 \pm 2,8$	60	18	–	–
	γ +ЭИПБ Б	477	$18,2 \pm 1,8$	51	12	24	–
	γ +Т ₁ Б	543	$11,6 \pm 1,4$	36	15	12	–
P1	Норма	326	$1,6 \pm 0,5$	–	2	3	–
	γ	531	$15,4 \pm 2,2$	20	10	10	6
	γ +ЭИПБ А	258	$29,6 \pm 1,7$	17	10	10	20
	γ +ЭИПБ Б	384	$16,7 \pm 1,9$	0	12	2	4
	γ +Т ₁ Б	402	$18,2 \pm 1,9$	46	15	5	5
	γ +Т ₂ Б	482	$27,4 \pm 2,0$	43	–	–	12
				12			
			0				
P2	Норма	305	$1,6 \pm 0,5$	5	–	–	–
	γ	417	$13,4 \pm 1,7$	33	9	12	3
	γ +ЭИПБ А	410	$14,6 \pm 1,7$	40	15	–	5
	γ +ЭИПБ Б	318	$24,5 \pm 2,4$	54	18	6	–
	γ +Т ₁ Б	595	$14,3 \pm 1,4$	60	15	5	5
M215	Норма	460	$2,2 \pm 0,7$	5	–	5	–
	Норма+ЭИПБ А	402	$10,4 \pm 1,5$	33	–	3	6
	γ	265	$28,2 \pm 2,3$	80	12	2	8
	γ +ЭИПБ А	645	$38,0 \pm 1,9$	12	85	8	32
	γ +ЭИПБ Б	301	$25,6 \pm 2,5$	0	14	–	–
			63				

Примечание: ЭИПБ А, ЭИПБ Б – мысленные программы операторов «А» и «Б»; Т₁Б, Т₂Б – терафимы соответственно «шесть пирамид, расположенных симметрично в трех взаимно-перпендикулярных направлениях» и «фаянсовая кружка», заряженные ЭИПБ оператора «Б». I, II – соответственно одиночные и двойные хромосомные мосты; III – отставание хромосом; IV – другие типы аббераций (тройные хромосомные мосты, двойные хромосомные мосты с парными фрагментами, парные фрагменты, двойные хромосомные мосты с парными фрагментами, три парных фрагмента)

Как известно, практические достижения рефлексотерапии, нетрадиционного целительства и диагностики, вначале категорически не принимаемые официальной медициной, оказались настолько востребованными, что в Москве в срочном порядке был организован Институт рефлексотерапии, который теперь называется Институтом традиционной медицины [2, 6], а в Институте радиотехники и электроники (ИРЭ) АН СССР была открыта специальная лаборатория «Физические поля биологических объектов», где, в частности, тщательно исследовался феномен небезызвестной Джуны [1, 4, 31].

В БСЭ парапсихологические феномены, при всех оговорках и даже неприятиях, все же оцениваются как «явления, реально существующие, но еще не получившие удовлетворительного научного психологического и физиологического объяснения» [32]. И академическая наука, похоже, преодолевает психологический барьер по отношению к таким феноменам. Так в академическом журнале «Биофизика» за 1995 год появилась статья Э.С. Горшкова и В.В. Кулагина «О возможном механизме воздействия оператора на магнитоизмерительные системы» [5]. Напомним, что еще в конце 80-х го-

дов XX века экспериментальные статьи на подобную тему даже авторитетных ученых, например, академика Гуляева решительно отвергались центральными журналами с мотивировкой типа: «учитывая нездоровый интерес ... дорожа именем журнала» [31].

В упоминаемой статье [5] констатируется: «Правомочность существования проблемы «оператор–прибор» в настоящее время уже не вызывает сомнений. В измерительной практике зарегистрировано достаточно много случаев неосознанного воздействия экспериментаторов на процесс измерения, выражающегося в необъяснимом разбросе показаний приборов. Очевидно, есть примеры и сознательного «волевого» воздействия, когда субъект как бы угадывает, а в действительности создает, конструирует ожидаемые закономерности. Нетрудно предположить, какими последствиями чревато такое вмешательство в измерительный процесс, особенно в тех случаях, когда оператор осуществляет функцию управления» [26, с.1025].

Еще более значимыми могут оказаться последствия мысленного воздействия оператора на живой объект, с которым человек во имя успеха эксперимента вынужден постоянно общаться, так сказать, на паритетных началах, чувствовать его, понимать его, «говорить» с ним.

Профессор Молчан, анализируя творчество выдающихся селекционеров–растениеводов Бербанка, Мичурина, Шехудина, Пустовойта и др., прямо указывает на их уникальный метод чувственного интуитивистского решения задачи исследования [11], причем эти большие ученые без помощи сложной аппаратуры достаточно точно оценивали, предугадывали, планировали нужные для человека признаки и свойства растений.

Похожей интуицией обладал профессор Анатолий Ефимович Коварский, создатель молдавской школы генетиков и селекционеров растений. На его кафедре работал ассистент В.М. Боговский, который мог мысленно переносить генетические признаки с одного растения на другое, о чем упоминает сын профессора, создатель молдавской школы биофизиков, академик Виктор Анатольевич Коварский [33].

В этой связи уместно сделать акцент на малоизвестном факте: гениальный электротехник Тесла создавал свои уникальные технические устройства по фантому, то есть видя их вначале внутренним зрением как бы наяву (пример инженерного использования «ясновидения»). Далее он испытывал эти устройства по фантому в невещественном мире, по ходу испытания заменяя оказавшиеся ненадежными детали и выдавая в конечном счете в чертежах готовую продукцию – прибор или устройство, которые после «материализации» в вещественном мире уже не нуждались в последующей доработке [34]. По известным причинам Тесла свой «странный» метод не афишировал и поэтому в истории науки числится как классик. Приведенные примеры, мы надеемся, помогут снять с наших опытов обвинение в мистичности, тем более, что они – лишь слабое эхо опытов великих предшественников.

Считаем принципиально важным в проведенных нами опытах экспериментальное доказательство наличия материального (морфогенетического) действия мысли человека на растения и «запечатления» функции мысли на предметах неживой природы, превращающихся в терафимы, источники поля мысли.

Было показано влияние ЭИПБ как общего, так и адресно-целевого типа на растения на организменном и геномном уровнях. Надеемся, что эти данные будут встречены с доверием, во-первых потому, что были соблюдены требования общепринятой методики при получении и оценке традиционных параметров состояния объекта, и эти параметры стали опорными при выявлении эффектов от ЭИПБ, и, во-вторых, потому, что были проведены многовариантные эксперименты, позволяющие выявить нюансы эффектов от ЭИПБ, поскольку неизбежные в таком опыте отрицательные результаты по каким-то единичным вариантам в отсутствии сравнения с другими более удачными вариантами могут стать причиной необоснованного скепсиса оппонентов в отношении самой проблемы.

Как показали наши данные, такой подход позволил обнаружить специфику действия ЭИПБ, создаваемых разными операторами, зависимость эффекта от экспозиции воздействия фактора на объект, зависимость от генотипа объекта, экологического стресса и др. В целом опыты показали сложность проблемы и поставили новые вопросы для ее решения.

Весьма важным представляется доказательство идентичности эффектов от прямого, опосредованного (через терафимы) и дистантного действия ЭИПБ. В связи с этим становится реальной возможность создания долговременных и стабильных в работе источников ЭИПБ, своеобразных биогенераторов, выгодно отличающихся от оригиналов – живых генераторов. ЭИПБ, действующий непосредственно от оператора, не всегда эффективен из-за изменения психофизического состояния оператора во времени, а терафимы заряжаются оператором, как правило, однажды и при оптимальном энерго–информационном состоянии операторов. Кроме того, можно мысленно задать срок год-

ности терафима. Так кружка-терафим успешно была применена нами на гаплоидных проростках кукурузы, а спустя несколько месяцев – на семенах других генотипов кукурузы и в настоящее время продолжает активно функционировать.

Важно также доказательство возможности тиражирования терафимов друг от друга и сохранения функции ЭИПБ при посадке его на объекты разной природы (воду, сосуды, пирамиды).

Вместе с тем использование пирамид–терафимов и чистых пирамид (контроль) позволило выявить функцию последних, получившую наименование эффекта формы [35, 36].

В настоящее время широкое распространение получила точка зрения, что причиной эффекта форм является способность фигур определенной топологии и геометрии генерировать торсионные (спинорные, вихревые) поля, полностью не сводимые к известным физическим полям (электромагнитному и гравитационному) [36]. Действительно, геометрические фигуры, в данном случае пирамиды, по-разному влияют на всхожесть семян и рост проростков в зависимости от характера расположения пирамид по отношению к объекту. Нашими прежними данными было показано, что пирамиды, конусы, цилиндры и купола с помощью своих торсионных полей способны индуцировать преимущественно либо левые (l), либо правые (d) проростки у разных видов растений в полном соответствии с l или d знаком торсионных полей этих геометрических фигур [37].

Аналогичный эффект индукции l и d проростков дают и ЭИПБ «потоки l или d вращения», что говорит о неких общих чертах механизма действия фигур и ЭИПБ. В то же время необходимо учитывать и показанную в нашем опыте независимость функции ЭИПБ от функции торсионных полей предметов, которые становятся терафимами, то есть необходимо учитывать, что эффект ЭИПБ доминантен по отношению к эффекту от торсионных полей объектов неживой природы.

Отметим, что другие исследователи оценивали эффект формы по параметрам объекта, в том числе растительного, помещенного внутри пирамиды [5]. В наших опытах объект помещается вне пирамиды и других фигур [36]. Это расширяет трактовку эффекта формы.

Возвращаясь к генетическим эффектам ЭИПБ, подчеркнем, что они получены впервые генетическими методами – при оценке структурного состояния хромосом (по частоте хромосомных нарушений) и частоте рекомбинаций (перестановок) генов (по фенотипическому проявлению маркерных генов).

По ЧХН, индуцированным внешним фактором, судят о его мутагенном действии [24]. ЭИПБ по этому критерию оказался соизмеримым с мощным классическим мутагенным фактором – γ -излучением [38]. Поэтому есть все основания считать, что ЭИПБ также может выступать в качестве своеобразного мутагенного фактора, причем принципиально нового типа – антропоного, то есть генерируемого мыслью человека.

При использовании этого фактора, по-видимому, следует ожидать появления нетрадиционного спектра генетической изменчивости у растений, что может быть использовано при создании ценного исходного материала для селекции.

С другой стороны, ЭИПБ может выступить и как радиопротекторный и модифицирующий фактор, снижающий уровень γ -повреждений у растений, что важно с точки зрения получения экологически чистой продукции растениеводства и оздоровления экологической обстановки.

Отсутствие видимых эффектов по ЧХН при воздействии ЭИПБ не исключает индукцию скрытых, «мягких» мутагенных эффектов, имеющих значение при формировании полигенных хозяйственно-ценных признаков. Изменение ЧР при действии адресно-целевой ЭИПБ может быть использовано при создании форм растений с ценными признаками, контролируруемыми конкретными генами.

Для объяснения возможных механизмов этих необычных эффектов полезно привлечь представления о волновой структуре ДНК, так как считается, что генетическая информация организма реализуется не только с помощью вещественной структуры генетических молекул [39, 40].

Организм в целом также можно представить в виде волновой функции или биоэлектромагнитного поля, а также поля пока еще неизвестной природы (биополя) [41]. Такое поле – матрица формы организма [42, 43] или фенотипического проявления экспрессии генов на макроуровне в архитектонике (в том числе в l и d биоизомерии) организма [14].

По нашим данным, растение и сообщество растений – ансамбль взаимосвязанных электрофизиологических осцилляторов, спектр частот которых, по-видимому, запрограммирован в генотипе и отражает функцию волновых генов основных физиологических процессов [44].

В отношении механизма действия ЭИПБ можно высказать предположения, что мысленная установка, кроме воссоздания образа растения, сопровождается словесной программой реализации этой установки (целевой морфогенез объекта). Звуковое (волновое) поле ЭИПБ при наличии тесной связи в системе «человек–растение» взаимодействует с волновым полем ДНК растения, благодаря

чему наступает резонанс частот этих полей, приводящий к изменению вещественной структуры ДНК. Методами лингвистической генетики и математической лингвистики выявлено, что последовательности нуклеотидов ДНК являются речеподобными структурами, которые, возможно, взаимодействуют с сознанием и речью человека [40], поскольку язык генома (ДНК–хромосома) и человеческая речь имеют общие корни и универсальную грамматику.

Выводы

1. При действии ЭИПБ на семена разных видов растений обнаружено влияние ЭИПБ общего и адресно-целевого типа на всхожесть семян и рост проростков, на архитектуру проростков (левизну–правизну), на увеличение жизнеспособности гаплоидных растений, на частоту хромосомных нарушений в корешках проростков и на частоту рекомбинаций (перестроек) маркерных генов.
2. Эффекты от ЭИПБ аналогичны при прямом, опосредованном (через терафимы) и дистантном действии ЭИПБ.
3. Эффекты зависят от «силы» оператора, экспозиции действия ЭИПБ, экологических стрессов и генотипа объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гуляев Ю.В., Годик Э.Э.* Физические поля биологических объектов // Вестник АН СССР. 1983. № 8. С. 118–125.
2. *Ханцеверов Ф.Р.* Эниология. Т. 1. М., 1996. Т. 2. М., 1999.
3. *Гримак Л.П.* Магия биополя. М., 1994.
4. *Дубров А.П., Пушкин В.Н.* Парапсихология и современное естествознание. М., 1989.
5. *Горшков Э.С., Кулагин В.В.* О возможном механизме воздействия оператора на магнитоизмерительные системы // Биофизика. 1995. Т. 40. Вып. 5. С. 1025 – 1030.
6. *Волченко В.Н.* Миропонимание и экзотика XXI века. М., 2001.
7. *Патури Ф.* Растения – гениальные инженеры природы. М., 1982.
8. *Маслоброд С.Н.* Электрический «язык» растений. Кишинев, 1981.
9. *Маслоброд С.Н., Каранфил В.Г. и др.* Электрическая реакция растений на мысленные энерго-информационные воздействия // Материалы IX Международного симпозиума «Нетрадиционное растениеводство. Эниология. Экология и здоровье». Симферополь, 2000. С. 656 – 657.
10. *Маслоброд С.Н., Каранфил В.Г. и др.* Оценка адресно-целевой телепатической связи в системах «человек–человек» и «человек–растение» по биофизическим и морфофизиологическим параметрам перцепиента // Материалы XI Международного симпозиума «Нетрадиционное растениеводство. Эниология. Экология и здоровье». Симферополь, 2002. С. 742 – 747.
11. *Молчан И.М.* Селекция как искусство // Там же. С. 324 – 326.
12. *Backster C.* Evidence of a Primary Perception in Plant Life // Journal of parapsychology. N.Y., 1968. V.10. № 4. P. 329 – 348.
13. *Маслоброд С.Н.* Электрофизиологическая полярность растений. Кишинев, 1973.
14. *Маслоброд С.Н.* Пространственно временная организация поверхностных биоэлектрических потенциалов растительного организма. I. Электрофизиологическая стереополярность растительного организма // Электронная обработка материалов. 1999. № 6. С. 46 – 64.
15. *Полевой В.В.* Физиология растений. С-Пб. 1989.
16. *Маслоброд С.Н., Каранфил В.Г. и др.* Влияние мысленных программ оператора (прямых и через терафимы) на всхожесть семян и скорость роста проростков // Материалы IX Международного симпозиума «Нетрадиционное растениеводство. Эниология. Экология и здоровье». Симферополь, 2000. С. 664 – 665.
17. *Маслоброд С.Н., Каранфил В.Г., Чалык С.Т., Кедис Л.И.* Влияние энергоинформационных программных блоков (ЭИПБ) на всхожесть семян и жизнеспособность культурных растений // Біологічні науки і проблеми рослинництва. Умань, 2003. С. 525 – 528.
18. *Маслоброд С.Н., Шабала С.Н. и др.* Модификация радиобиологического эффекта у растений биополями технических устройств и оператора-экстрасенса // Problemele si perspectivele radioecologiei in Republica Moldova. 1996. P. 93 – 96.

19. *Маслоброд С.Н., Чалык С.Т.* Влияние биополя оператора-экстрасенса на частоту рекомбинаций у генотипов кукурузы // Там же. С. 83 – 84.
20. *Каранфил В.Г., Маслоброд С.Н. и др.* Лечебно-оздоровительный комплекс «Зея» // Материалы XI Международного симпозиума «Нетрадиционное растениеводство. Эниология. Экология и здоровье». Симферополь, 2002. С. 680 – 683.
21. *Маслоброд С.Н., Грати М.Н. и др.* Некоторые селекционно-генетические и экологические аспекты диссиметрии растений // Там же. С. 237 – 239.
22. *Сулима Ю.Г.* Биосимметрические и биоритмические явления и признаки у сельскохозяйственных растений. Кишинев, 1970.
23. *Чалык С.Т.* Методы гаплоидии в генетике и селекции кукурузы. Кишинев, АН Молдовы. 2003.
24. *Паушева З.П.* Практикум по цитологии растений. М., 1974.
25. *Бондарь Л.М., Попова О.Н.* Цитогенетический анализ действия хронического облучения на природные популяции *Vicia Laba L* // Радиобиология. 1989. Т.19. Вып. 3. С. 310 – 315.
26. Каталог мировой коллекции ВИР (генетическая коллекция кукурузы). Ленинград, 1984. Вып. 396.
27. *Палий В.Ф.* Генетические основы улучшения качества зерна кукурузы. Кишинев, 1989.
28. *Жученко А.А., Король А.Б.* Рекомбинация в эволюции и селекции. М., 1985.
29. Международные правила анализа семян. М., 1984.
30. *Шноль С.Э.* 3-й Международный симпозиум по космогеофизическим корреляциям в биологических и физико-химических процессах // Биофизика. 1995. Т. 40. Вып. 4. С. 725 – 731.
31. *Мороз О.* От имени науки. М., 1989.
32. Парапсихология // БСЭ. 1975. Т.19. С.566.
33. *Коварский В.* Стрела времени в моей жизни. Кишинев, 1999.
34. *Абрамович В.* Метафизика и космология ученого Николы Тесла // Дельфис. 1999. № 1. С. 27 – 33. (первоисточник – N.Tesla. My inventions. Electrical experimenter. N.Y. 1919).
35. *Нариманов А.А.* Об эффектах формы пирамид // Биофизика. 2001. Т. 46. В. 5. С. 951 – 957.
36. *Акимов А.Е.* Эвристическое обсуждение проблемы поиска дальнодействий EGS – концепция. // Сознание и физический мир. Вып.1. М., 1995. С. 36 – 84.
37. *Маслоброд С.Н.* Эффект формы как фактор экологии и растениеводства // Biodeversitatea vegetala a Republicii Moldova. Kisinau, 2001. P. 272 – 275.
38. *Гродзинский Д.М.* Радиобиология растений. Киев, 1990.
39. *Чиркова Э.Н.* Волновая природа регуляции генной активности. Живая клетка как фотонная вычислительная машина // Успехи современной биологии. 1994. Т. 144. Вып. 6. С. 659 – 678.
40. *Гаряев П.П.* Волновой геном. М., 1994.
41. *Гурвич А.Г.* Теория биологического поля. М., 1944.
42. *Becker R.O.* The significance of bioelectric potentials // Bioelectrochem. and bioenerg. 1974. № 1-2. P. 167 – 189.
43. *Jaffe L.F., Nuccitelli R.* Electrical control of development // Ann. Biophys. Bioenerg. 1977. V. 6. P. 445 – 476.
44. *Маслоброд С.Н., Шабала С.Н.* Волновые гены основных физиологических процессов растительного организма // Genetica si ameliorarea plantelor si animalelor in Republica Moldova. Chisinau, 1998. P. 93 – 96.

Поступила 14.07.2003

Summary

It is shown general and (adress) directly-purposeful influence of mental programs on the seeds of different plant species that manifests in alteration in seeds germination, in growth and germs architectonics (leftness and rightness), in frequency of chromosome in fringements in germs radicles, in frequency of marked genes recombinations in number of haploid plants able to give pollen in field conditions. The effects are analogous under direct indirect (by teraphims) and distant influence of the factor.

А.И. Жучков, В.И. Курец, М.А. Соловьев*, Э.Н. Таракановский, Г.П. Филатов

РЕГУЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ТРУБЫ ПРИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ РАЗВАЛЬЦОВКЕ

НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете,

пр. Ленина, 2А, г. Томск, 634050, Россия

** Томский политехнический университет,*

пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

В ремонтных работах на теплообменных аппаратах основной проблемой является несоответствие стандартам обрабатываемых элементов. Так, отверстия в трубных досках имеют недопустимую овальность, вмятины и риски, зачастую проходящие через всю поверхность отверстия. В связи с этим при работах, связанных с развальцовкой, невозможно эффективно решать такие задачи с помощью традиционных механических методов. Поэтому одной из технологий, нашедшей свое применение в промышленности, является метод электроразрядной запрессовки труб в трубных досках теплообменных аппаратов.

Предложенный нами метод основан на многоимпульсном воздействии на сопрягаемые элементы с дозированной энергией импульса при стохастическом расположении траектории канала разряда в активной зоне.

Механизм запрессовки труб ударными нагрузками достаточно хорошо изучен [1], и суть его заключается в создании гарантированного натяга по поверхности контакта трубы и трубной решетки за счет их совместного деформирования и последующей упругой разгрузки соединения. Энергию импульса (W_0) при однократном воздействии (характерном для метода, связанного со взрывом проволочки) можно рассчитать из уравнения [1]:

$$\eta W_0 = A_{у.т.} \pi L_t (R_n^2 - R_b^2) + A_{у.р.} \pi L_p (R_{пл.р}^2 - R_0^2), \quad (1)$$

где η – коэффициент, учитывающий долю энергии импульса, идущей на создание давления внутри трубы ($\eta = 0,2 - 0,5$), $A_{у.т.}$ и $A_{у.р.}$ – удельное сопротивление деформации трубы и трубной решетки, L_t и L_p – длина деформируемой части трубы и трубной решетки, R_n и R_b – наружный и внутренний радиусы трубы, $R_{пл.р} = \Delta_{пл.р} + R_0$, $\Delta_{пл.р}$ – толщина зоны пластической деформации трубной решетки, R_0 – радиус отверстия в трубной решетке.

Все значения коэффициентов, входящих в уравнение (1), находятся по соответствующим номограммам [1] для известных физико-механических свойств используемых материалов, размеров изделий и требований к прочности соединения. Результаты расчета необходимой энергии единичного импульса для стальной трубной решетки (диаметр отверстия 19,3 мм) и латунной трубы (диаметр 19 мм) по уравнению (1) для рабочего давления $2 \cdot 10^6$ Па и испытательного давления $4 \cdot 10^6$ Па показывают, что для указанных параметров соединения энергия единичного импульса должна быть не менее 6,7 кДж. Рассматривая эту энергию как суммарную по известной методике [2] можно найти энергию единичного импульса и их количество, необходимые для получения качественного соединения.

При запрессовке труб в трубных досках требования к раздаче труб на внутренней части теплообменников зачастую включают условия, которые исключают ее увеличение [3]. Поэтому нами предложен метод регулирования раздачи трубки за трубной доской. В качестве элемента, ограничивающего деформацию, предложено применить преграду в виде цилиндрической вставки [4]. Она должна принимать на себя давление ударной волны и давление жидкости, вызванное расширением парогазовой полости, и надежно защищать стенку трубки от деформации.

Отличительной особенностью предложенной нами вставки было наличие центрального отверстия для прохода воды.

Основные достоинства метода: надежное ограничение зоны распространения давления, отсутствие расходных материалов, дешевизна, технологичность, простота конструкции.

Гашение энергии, выделенной в канале разряда, может осуществляться как за счет отражения волны давления от преграды, так и за счет диссипативных потерь [5]. В первом случае для того, чтобы отразилась максимальная часть падающей волны, необходимо, чтобы акустическая жесткость преграды была много больше акустической жесткости воды:

$$\rho_v c_v \ll \rho_c c_c. \quad (2)$$

Однако преграда из материала с очень большой акустической жесткостью и соответственно массой (например, металл) будет иметь большой момент инерции при воздействии волны давления и может разрушить фиксирующие его устройства или заземленный электрод.

Во втором случае, когда основной упор делается на гашение энергии волны давления за счет диссипативных потерь, необходимо, чтобы акустическая жесткость преграды была меньше акустической жесткости среды. Но в этом случае граничным условием будет механическая прочность материала, так как преграда может просто разрушиться после первого разряда. Поэтому в процессе экспериментов необходимо было подобрать материал преграды, обладающий комплексным набором этих качеств и эффективно гасящий энергию волны давления как за счет отражения и преломления, так и за счет диссипативных потерь.

Для изготовления вставки использовались как материалы с преобладанием диссипативных потерь (пенопласт, пористая резина, дерево), так и материалы, отражающие волну давления (винилпласт, полиэтилен, металл), вставка фиксировалась загнутыми заземленными электродами. Внешний вид электродной системы с использованием вставок представлен на рис. 1.

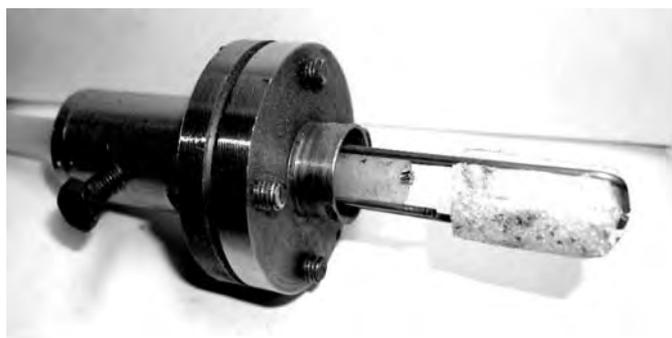


Рис. 1. Внешний вид электродной системы со вставкой

Электродная система состоит из потенциального электрода, изолированного полиэтиленовой трубкой, вокруг которой смонтированы 4 проволочных заземленных стержня из стали Ст.65 Г. Для стабилизации месторасположения вставки предложено использовать часть заземленных стержней, которые загибались под углом 90° и фиксировали вставку с одной стороны, с другой стороны вставка фиксировалась оставшимися заземленными стержнями. В экспериментах трубная решетка моделировалась толстостенной трубой из Ст.3 (предел текучести $2,1 \cdot 10^8$ Па), внешний диаметр которой составлял 33 мм, внутренний диаметр – 19,3 мм, длина – 90 мм. Вальцуемая труба (материал ЛЮ70-1, предел текучести 10^8 Па) имела внешний диаметр – 19 мм, толщина стенки – 1 мм, длина образца – 180 мм. Латунная труба размещалась в стальной трубе так, чтобы один конец, моделирующий внешнюю часть бойлера, выступал на 10–12 мм за край стальной трубы. Противоположный конец латунной трубы соединялся с резиновым шлангом, через который в течение опыта непрерывно подавалась вода. Стык между трубами со стороны электродной системы герметизировали с целью исключения попадания воды в зазор. Вся система располагалась горизонтально. Конец потенциального электрода во всех опытах размещался на расстоянии 30 мм от внешнего среза стальной трубы (рис. 2). В работе использовался генератор импульсных токов с уровнем амплитуды импульса 30 кВ, энергия которого варьировалась от 200 до 2000 Дж путем изменения разрядной емкости, собираемой из малоиндуктивных конденсаторов типа ИК. Индуктивность разрядного контура составляла ~ 5 мкГн.

В процессе экспериментов оценивались диаметры раздачи латунной трубы на обрезках стальной трубы – d_1 (внешний), d_2 (внутренний), визуально оценивалось состояние вставки, после серии импульсов запрессованное соединение испытывалось на специальном стенде давлением $4 \cdot 10^6$ Па. Результаты эксперимента представлены в таблице.

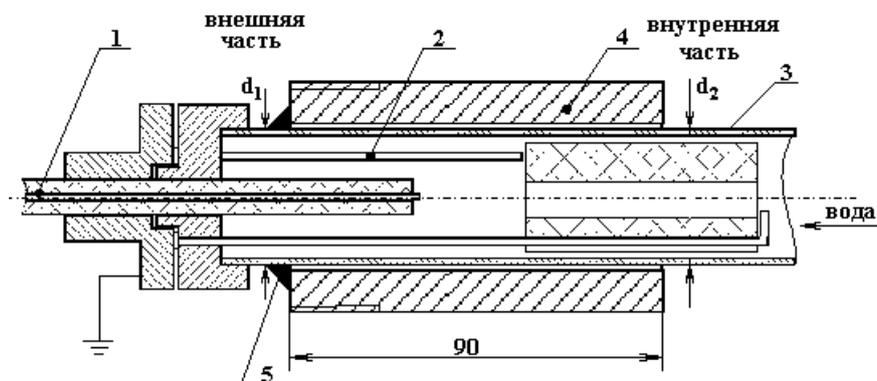


Рис.2. Расположение электродной системы в вальцуемой трубе
1 – потенциальный электрод; 2 – заземленный электрод; 3 – латунная труба;
4 – модель трубной доски; 5 – герметик

Таблица. Результаты эксперимента по выбору материала вставки

Число имп, шт.	1		2		3		4		5		6	
	d_n	$d_{вн}$	d_n	$d_{вн}$	d_n	$d_{вн}$	d_n	$d_{вн}$	d_n	$d_{вн}$	d_n	$d_{вн}$
Пенопласт	19,0	19,0	Вставка полностью деформировалась									
Пористая резина	19,0	19,0	19,3	19,1	19,5	19,3	20,1	19,5	22,0	19,7		
Дерево (сосна)	19,0	19,0	19,8	19,1	20,1	19,5	Вставка раскололась					
Винипласт	19,0	19,0	19,0	19,1	Вставка раскололась							
Вакуумная резина	19,0	19,0	19,6	19,0	20,4	19,8	20,1	20,0				
Полиэтилен	19,2	19,0	19,8	19,0	20,4	19,1	22,7	19,2	23,1	19,2	24,0	19,3

Как видно из таблицы, пенопласт, дерево, винипласт не выдерживают уровня давления, инициируемого каналом электрического разряда, и разрушаются. Вставки из пористой резины, вакуумной резины, хотя и сохранили свои геометрические размеры, но вследствие высокого уровня деформации не смогли полностью предохранить трубку. Материалы данной группы не подходят для дальнейшей работы, так как они недостаточно прочные либо излишне пластичны.

Наилучшие результаты получены в случае полиэтиленовой вставки, которая эффективно защищает трубку от деформации на внутренней части трубной доски. Давление, создаваемое расширяющейся парогазовой полостью, деформирует и развальцовывает трубку внутри модели трубной доски. А вне трубной доски давление на стенку трубки ослаблено за счет многократных отражений в зазоре между вставкой и трубкой, а также диссипативных потерь в полиэтилене.

Определяющим был вопрос о длине вставки. Так, теоретически, чем она длиннее, тем большую поверхность вальцуемой трубки она защищает. Однако, при этом возникают конструктивные проблемы, связанные с фиксацией длинной вставки. Кроме того, перестановка электродной системы с длинной вставкой становится нетехнологичной и громоздкой.

Как показали эксперименты, при нашем расположении канала разряда (30 мм от внешней части трубной доски) заметная деформация трубки наблюдается на расстоянии, не превышающем 25 – 30 мм от внутреннего края трубной доски. Поэтому длина вставки с учетом простоты конструкции крепления, технологичности и экспериментальных данных выбрана 45 мм. Положение вставки относительно высоковольтного электрода ограничивалось необходимостью развальцевать трубку на всей толщине трубной доски.

При увеличении захода вставки внутрь трубной доски, деформация трубки на внутреннем срезе трубной доски увеличивается. Это связано с распространением давления через центральное отверстие вставки и воздействием его непосредственно на стенку трубки и через зазор между вставкой и трубкой. При этом ухудшается качество вальцовки в месте расположения вставки из-за потерь энергии, связанных с многократными отражениями и преломлениями волны давления в зазоре.

Уменьшение захода вставки в трубную доску также приводит к увеличению деформации трубки, что связано с уменьшением зоны гашения давления (величина перекрытия вставкой толщины трубной доски). Экспериментально установлено, что вставка длиной 45 мм должна входить в трубную доску на 10–15 мм. Применение вставки с таким расположением позволяет получить качественное соединение с величиной деформации трубки на внутреннем срезе трубной доски не более внутреннего диаметра отверстия в трубной доске.

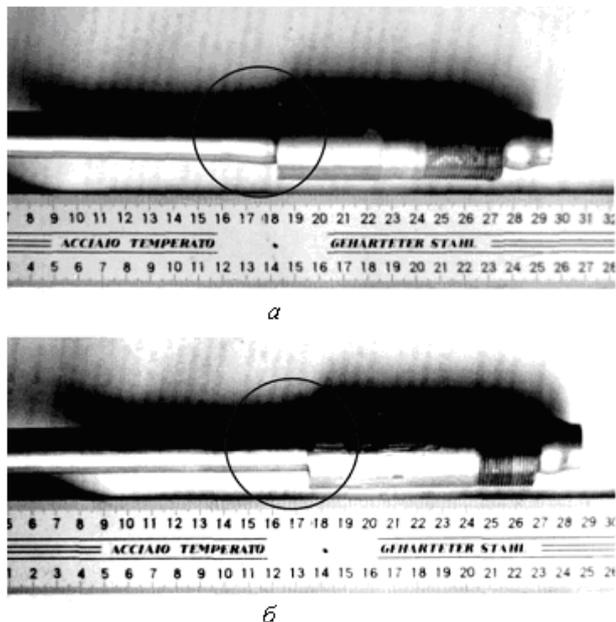


Рис.3. Внешний вид образцов развальцованных без применения вставки (а) и со вставкой (б)

образцов давлением $4 \cdot 10^6$ Па подтвердили это предположение. Внешний вид образцов развальцованных без вставки и с применением полиэтиленовой вставки приведен на рис. 3.

Так, диаметр трубки на внутреннем срезе трубной доски в течение 5 импульсов оставался не более диаметра отверстия в трубной доске. Вставка осталась неповрежденной, что позволяло использовать ее многократно. Кроме того, благодаря упругим свойствам полиэтилена проволоочные электроды, фиксирующие месторасположение вставки, не деформировались. Как было установлено ранее, в экспериментах без вставок вальцовочное соединение выдерживает испытательное давление $4 \cdot 10^6$ Па, если диаметр трубки на срезах трубной доски лежит в диапазоне 20,5–21,7 мм [2]. Поэтому при энергиях импульса 1260 Дж с использованием в качестве элемента, ограничивающего зону распространения волны давления, полиэтиленовой вставки с отверстием можно уменьшить число импульсов до 4, что соответствует снижению на 25–30% суммарной энергии, необходимой для получения качественного соединения. Испытания серии из пяти модельных

ЛИТЕРАТУРА

1. Мазуровский В.Я. Электрогидроимпульсная запрессовка труб в трубных решетках теплообменных аппаратов. Киев, 1980.
2. Жучков А.И., Зиновьев Н.Т., Курец В.И и др. Многоимпульсная электрогидравлическая запрессовка труб в трубных досках // Электронная обработка материалов. 2001. № 1. С. 77 – 81.
3. Запрессовка труб с применением источников импульсного давления //ГОСТ 23691-79, ГОСТ 23693-79, М., 1979.
4. Патент РФ № 2191085. Устройство для электрогидравлической развальцовки труб / Жучков А.И., Инамходжаев С.У., Курец В.И., Таракановский Э.Н., Филатов Г.П.
5. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва. Л., 1961.

Поступила 08.05.2003

Summary

Proposed method allows to limit the tube deformation on the inside cut of the tube plate. Limiting deformation is obtained applying special embedding that has central aperture for water flow. The best embedding position is determined as well as its geometrical size providing maximum pressure extinction formed when gas-vapor cavity is enlarged. Pressure wave energy is quenched because of dissipative losses inside the embedding material and due to losses derived from pressure wave reflection and refraction in the gap between the embedding and the tube side. The best material for embedding is polyethylene that not only protects tube side from deformation but also it is not destroyed and it is possible to use this embedding iteratively.

Л.П. Ануфриев, А.С. Турцевич, В.В. Глухманчук

КИНЕТИКА ОСАЖДЕНИЯ ПЛЕНОК НИТРИДА КРЕМНИЯ, ПОЛУЧАЕМОГО АММОНОЛИЗОМ ДИХЛОРСИЛАНА В РЕАКТОРЕ ПониЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ

*Унитарное предприятие "Завод Транзистор" НПО "Интеграл"
ул. Корженевского, 16, г. Минск, 220064, Республика Беларусь*

Пленки нитрида кремния широко используются в технологии изготовления интегральных схем в качестве маскирующих, пассивирующих слоев, конденсаторного и подзатворного диэлектриков, а также в качестве геттера [1, 2]. Для их получения используется аммонолиз моносилана и хлорсиланов [2, 3], причем из-за лучших технологических параметров аммонолиз дихлорсилана предпочтительнее [4]. Однако в связи с недостаточной изученностью и отсутствием четких представлений о многофакторном влиянии условий получения пленок нитрида кремния аммонолизом дихлорсилана на параметры процесса, а также на свойства осаждаемых пленок, необходимо проведение дальнейших исследований. На практике необходимо знать о взаимодействии, взаимозависимостях между различными шагами технологического процесса, потенциально важных источниках вариаций, понимать влияние критических параметров процесса на стабильность и воспроизводимость осаждения, свойства осаждаемых пленок, а также выход годной продукции. В работе исследована кинетика процесса осаждения нитрида кремния аммонолизом дихлорсилана, свойства осаждаемых пленок, характеризующие их состав и однородность пленок по толщине с целью минимизации отклонений процесса.

Методика эксперимента

Осаждение пленок нитрида кремния осуществляли аммонолизом дихлорсилана в промышленном реакторе пониженного давления с горячими стенками, конструкция которого аналогична описанной в [5]. Загрузка-выгрузка подложек осуществлялась бесконтактным методом с применением карбидкремниевой консоли. В качестве подложек использовались кремниевые пластины КДБ-12 диаметром 100 мм. Осаждение осуществлялось при температурах 720 – 850°C. Давление в реакторе варьировалось от 20 до 133 Па. Использовались дихлорсилан и аммиак электронного класса чистоты. Отношение объемных источников аммиака к дихлорсилану – (γ). Толщина пленок нитрида кремния определялась спектрофотометром, а величина показателей преломления – при помощи лазерного эллипсометра. Плотность пленок нитрида кремния определялась методом полного внешнего отражения рентгеновских лучей при помощи дифрактометра ДТС. Разброс толщины пленки по пластине устанавливался по формуле

$$R_j = \pm \frac{D_{j\max} - D_{j\min}}{2D_j} \times 100\% , \quad (1)$$

где $D_{j\max}$, $D_{j\min}$ – максимальное и минимальное значения толщины на j -й пластине, D_j – среднее значение толщины на j -й пластине, которое определялось как

$$D_j = \sum_{i=1}^{i=5} \frac{D_i}{5}.$$

Разброс толщины пленки по процессу осаждения определялся по формуле

$$R_k = \pm \frac{D_{k\max} - D_{k\min}}{2D_k} \times 100\%, \quad (2)$$

где $D_{k\max}$, $D_{k\min}$ – максимальное и минимальное средние значения толщины на пластине в k -м процессе, D_k – среднее значение толщины на пластине в k -м процессе, которое определялось как

$$D_k = \sum_{i=1}^{i=5} \frac{D_k}{6}.$$

Кроме того, определялось C_p и C_{pk} :

$$C_p = \frac{\Delta}{3\delta}, \quad (3)$$

где Δ – полуширина поля допуска, δ – среднеквадратичное отклонение.

C_p характеризует состояние процесса и дает ответ на вопрос: достаточен ли допуск на норму, а также определяет потенциальную воспроизводимость процесса [6].

$$C_{pk} = \frac{\Delta - D_m}{3\delta}, \quad (4)$$

где D_m – среднее значение толщины по m -процессам, которое определялось как

$$D_m = \sum_{k=1}^{k=6} \frac{D_k}{6}.$$

C_{pk} характеризует реальную воспроизводимость процесса с учетом его настроенности [6].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

При γ равном 10 и температуре 800°C (рис.1) скорость осаждения пленок нитрида кремния (V_{oc}) монотонно возрастает от 2,4 до 11,2 нм/мин (в 4,67 раза) при увеличении давления от 20 до 133 Па, а при температуре 750°C – от 1,45 до 4,3 нм/мин (в 2,96 раза). Таким образом чувствительность скорости осаждения к изменению температуры на 1°C снижается при уменьшении давления от 133 до 20 Па от 1,34 до 0,189 А/мин (в 7,1 раза). В то же время изменение давления на 1 Па при температуре 750°C приводит к изменению скорости осаждения нитрида кремния на 0,256 А/мин. Таким образом, зависимость V_{oc} от давления становится более слабой при снижении температуры осаждения.

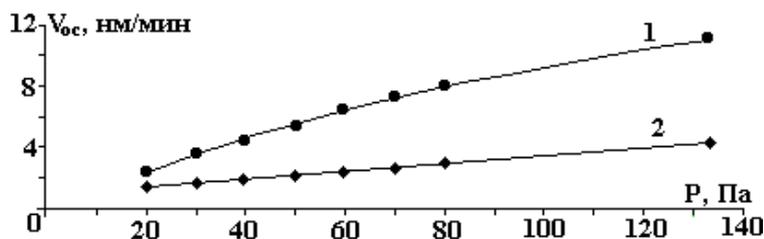


Рис.1. Зависимость скорости осаждения пленки нитрида кремния от давления при γ равном 10; температуры осаждения, °C: 1 – 800, 2 – 750

Из зависимостей V_{oc} от температуры (рис. 2) видно, что при γ равном 3 скорость осаждения пленки нитрида кремния монотонно возрастает от 1,5 до 9,2 нм/мин с увеличением температуры осаждения T_{oc} от 720 до 800°C. Характер температурной зависимости сохраняется при увеличении γ от 3 до 10 при постоянном потоке аммиака, однако при возрастании γ скорость осаждения снижается. Кроме того, температура осаждения существенно влияет на зависимость V_{oc} от γ (рис. 3). Так как при постоянном суммарном потоке (880 см³/мин), давлении 50 Па и T_{oc} равной 800°C с увеличением от 3 до 15 V_{oc} снижается от 9,2 до 4,7 нм/мин (в 1,96 раза), а при температуре 750°C – от 3,2 до 1,8 нм/мин (в 1,78 раза).

При снижении суммарного потока до 370 см³/мин скорость осаждения уменьшается от 3,6 до 2,1 нм/мин (в 1,71 раза) при температуре 800°C и от 2,1 до 1,3 нм/мин (в 1,62 раза) при температуре 720°C с увеличением γ от 5 до 15 (рис. 3).

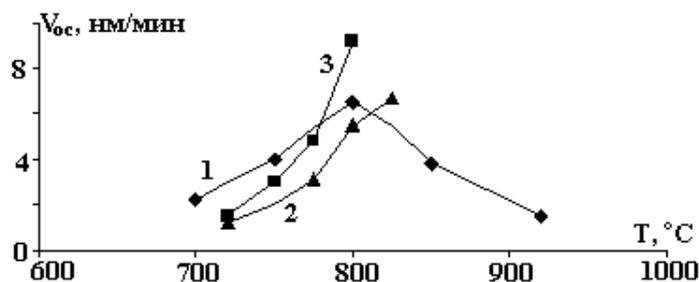


Рис.2. Зависимость скорости осаждения пленки нитрида кремния от температуры осаждения при давлении 50 Па и γ : 1 – [7], $\gamma = 4$, $P = 126$ Па; 2 – $\gamma = 10$, 3 – $\gamma = 3$

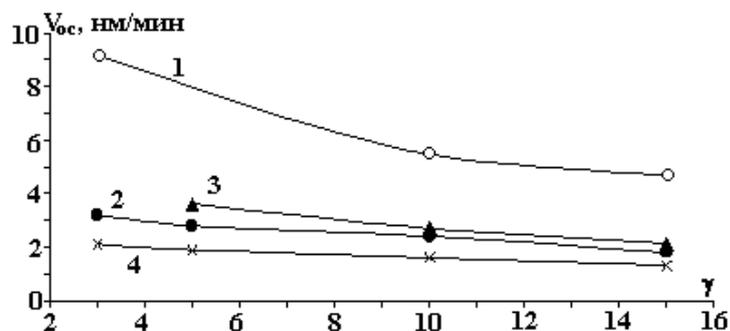


Рис. 3. Зависимость скорости осаждения пленки нитрида кремния от γ при постоянном потоке реагентов: 1 – 800 °С, 50 Па, $Q_{\text{сум}} = 880$ см³/мин; 2 – 750 °С, 50 Па, $Q_{\text{сум}} = 880$ см³/мин; 3 – 800 °С, 50 Па, $Q_{\text{сум}} = 370$ см³/мин; 4 – 750 °С, 50 Па, $Q_{\text{сум}} = 370$ см³/мин

Таким образом, как при снижении температуры осаждения, так и при уменьшении суммарного потока реагентов зависимость $V_{\text{ос}}$ от γ становится линейной и более слабой. В то же время при увеличении γ от 3 до 15 при постоянном потоке дихлорсилана (33 см³/мин) и давлении 50 Па скорость осаждения нитрида кремния увеличивается незначительно – от 2,5 до 2,7 нм/мин (рис. 4), что хорошо согласуется с результатом работы [3], где сообщалось, что при соотношениях $\gamma > 30$ скорость не зависит от температуры аммиака.

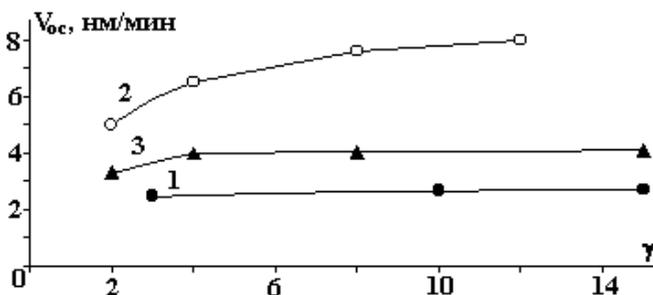


Рис. 4. Зависимость скорости осаждения пленки нитрида кремния от γ при фиксированном потоке дихлорсилана: 1 – 800 °С, 50 Па, $V_{\text{dxc}} = 33$ см³/мин; 2 – [5], 800 °С, 126 Па, $V_{\text{dxc}} = 25$ см³/мин; 3 – [5], 750 °С, 126 Па, $V_{\text{dxc}} = 25$ см³/мин

В исследованном диапазоне изменения γ , P , и T пленка является стехиометрическим нитридом кремния ($n = 1,95 \pm 0,05$).

В свою очередь плотность пленок нитрида кремния при температуре 720 °С составила 2,72 и 2,95 г/см³, а при температуре 800 °С – 2,83 г/см³ и 3,11 г/см³ при давлениях 50 и 133 Па соответственно. Разброс по толщине пленок нитрида кремния (рис.5), сильно зависит от давления в процессе осаждения.

По мере уменьшения давления от 133 до 30 Па разброс по толщине пленки почти линейно уменьшается от ± 8 до $\pm 2,5\%$ (в 3,2 раза) при температуре 800 °С, а при температуре 750 °С ± 5 до $\pm 2\%$ (в 2,5 раза) соответственно. Таким образом, понижение как температуры, так и давления в процессе осаждения способствует улучшению однородности пленок нитрида кремния по толщине, что

хорошо согласуется с результатами работы [7]. Дальнейшее уменьшение температуры осаждения ограничено из-за низких скоростей осаждения, повышения токов утечки и увеличения доли пробитых конденсаторов [8]. При этом при толщинах пленки нитрида кремния 14 – 17 нм обеспечивается удельная емкость конденсаторного диэлектрика 2,7 – 3 фФ/мкм².

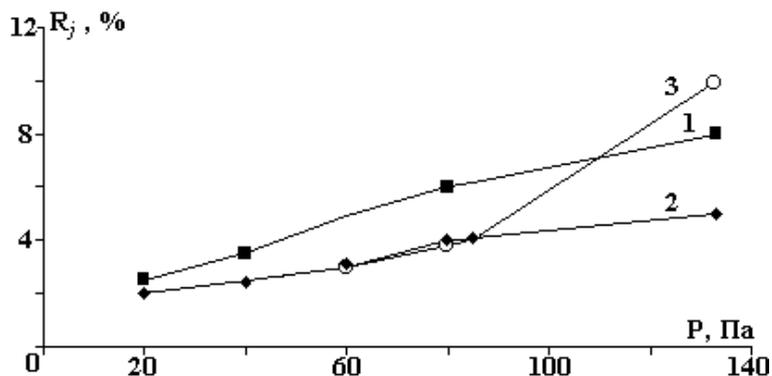


Рис. 5. Зависимость разброса по толщине пленок нитрида кремния от давления в процессе осаждения: 1 – 800 °С, $\gamma = 10$, $\vartheta = 370 \text{ см}^3/\text{мин}$; 2 – 750 °С, $\gamma = 10$, $\vartheta = 370 \text{ см}^3/\text{мин}$; 3 – [10], 750 °С, $\gamma = 10$, $\vartheta = 165 \text{ см}^3/\text{мин}$

В свою очередь увеличение диэлектрической проницаемости сверхтонких пленок нитрида кремния и снижение токов утечки возможно, как показано в работе [9], за счет использования особо чистого аммиака и азотного затвора для исключения попадания паров влаги и окислителей в реактор в момент загрузки – выгрузки. Кроме того, использование осаждения из газовой фазы при сверхнизких давлениях способствует повышению однородности осажденных пленок по толщине за счет того, что процесс становится ограниченным реакцией на поверхности [10].

Полученные закономерности существенно отличаются от зависимостей, представленных в работах [5, 11]. Так в [5] зависимость скорости осаждения от температуры при $\gamma = 4$ (рис. 3) носит экстремальный характер с максимумом скорости осаждения при температуре 800 °С, что связывается с обеднением смеси дихлорсиланом из-за интенсивного взаимодействия реагентов в зоне предосаждения и в начале рабочей зоны. В [11] скорость осаждения монотонно возрастает от 1,58 до 2,05 нм/мин при увеличении γ от 2 до 12 при температуре 769 °С и потоке дихлорсилана 15 см³/мин. Однако в этом случае рост $V_{\text{ос}}$ связан с увеличением общего давления в реакторе, так как регулирование скорости откачки не проводилось. В [5] скорость осаждения также возрастает при увеличении γ , но при фиксированном давлении выходит на насыщение при γ более 10 (рис. 4). В то же время зависимости $V_{\text{ос}}$ от давления, полученные в [5, 11], аналогичны. Имеются также сообщения [12], что при увеличении потока аммиака скорость осаждения возрастает при относительно малых потоках дихлорсилана (10 см³/мин) и уменьшается при относительно больших потоках дихлорсилана (50 см³/мин). Однако при этом не даются объяснения выявленным закономерностям.

Для сопоставления кинетических зависимостей, полученных при различных условиях, необходимы дополнительные параметры, связывающие геометрию реактора и условия проведения осаждения. В качестве таких параметров можно использовать удельный поток дихлорсилана α , определяемый как отношение объемного потока дихлорсилана к общей площади, на которую производится осаждение пленки в реакторе, и скорость движения газового потока w , определяемую как отношение суммарного объемного потока реагентов к площади зазора между внутренней поверхностью реактора и кассетой с подложками на консоли. Кроме того, можно оценить степень использования дихлорсилана по формуле

$$K_{\text{исп}} = V_{\text{ос}} \cdot \rho \cdot v \cdot V_{\text{моль}} / (\alpha \cdot M),$$

где $V_{\text{ос}}$ – скорость осаждения (нм/мин); ρ – плотность нитрида кремния (г/см³); v – отношение количества атомов Si в формулах пленки и газа [3]; $V_{\text{моль}}$ – объем 1 моля газа [22414 см³/моль]; α – удельный поток дихлорсилана, определяемый как отношение потока к общей площади осаждения в реакторе (м/с); M – молярная масса нитрида кремния [140,31 г/моль].

В табл. 1 представлены результаты оценочного расчета величин удельного потока дихлорсилана и скорости движения газа для реакторов с разными геометрическими параметрами и получаемые при этом скорости осаждения. Видно, что особенностью работы [5] является использование более высоких удельных потоков дихлорсилана и более низких w . К сожалению, данные, необходимые

для расчета удельного потока и скорости движения газа и корректного анализа кинематических зависимостей, в работах [11, 12] не приводятся.

Таблица 1. Результаты оценочного расчета величин удельного потока дихлорсилана и скорости движения газа для реакторов с различными геометрическими параметрами

№ п/п	Поток ДХС, см ³ /мин	T _{ос} , °С	γ, отн.ед	Q _{сум} , см ³ /мин	Давление, Па	Удельный поток ДХС, см/мин x10	Скорость движения газа, см ³ /мин	V _{ос} , нм/мин	Источник информации	
1	25	750	2	75	126	2,05	45	3,3	[5]	
			4	125			75	4,0		
			12	325			195	4,1		
2	25	800	2	75	126	2,05	45	5,0	[5]	
			4	125			75	6,5		
			8	225			135	7,6		
			12	325			195	8,0		
3	23	800	15	370	50	0,5	331	2,1	Данная работа	
	33		10					0,7		2,7
	60		5					1,26		3,6
4	60	800	15	880	50	0,98	619	4,7		
	80		10					1,3		5,5
	220		3					3,58		9,2
5	33	800	3	132	50	0,7	121	2,47		
			10	363			331	2,67		
			15	533			490	2,71		

С учетом сделанных оценок полученные результаты можно объяснить следующим образом. В области малых потоков дихлорсилана и относительно низких скоростей движения газа происходит обеднение смеси дихлорсиланом уже в зоне предосаждения, что обуславливает снижение V_{ос} по длине реакционной зоны, ибо максимум скорости осаждения находится в зоне предосаждения, а рабочей зоне соответствует спадающий участок кинетической кривой. Причем данный эффект проявляется сильнее при более высоких температурах. В свою очередь увеличение потока аммиака и, следовательно, возрастание суммарного потока реагентов при постоянном давлении в реакторе приводит к увеличению скорости движения газа, что способствует смещению максимума скорости осаждения пленки нитрида кремния из зоны осаждения в рабочую зону. И, наконец, в области высоких значений w реакция переходит в кинетическую область, где скорость осаждения перестает зависеть от w. При увеличении γ с сохранением постоянного суммарного потока реагентов происходит уменьшение удельного потока дихлорсилана, что снижает скорость осаждения пленок нитрида кремния.

В области больших потоков дихлорсилана при высоких значениях w с увеличением происходит смещение максимума скорости осаждения к зоне откачки. При этом из-за высоких скоростей движения газовой смеси все большая доза реагентов не успевает прореагировать в рабочей зоне. Подобный эффект описан в [13] для системы SiH₄ – NH₃. Поэтому при увеличении суммарного потока реагентов сверх определенной величины происходит уменьшение скорости осаждения пленок нитрида кремния.

Полученные зависимости использованы для оптимизации процесса осаждения конденсаторного нитрида кремния для силовых интегральных схем. Результаты аттестации процесса по толщине представлены в табл. 2. Величина среднеквадратичного отклонения толщины пленки не превышает 3,43 А. Таким образом, обеспечивается C_p ≥ 1,33, C_{рк} ≥ 1,0 на этапе опытного производства (для допуска 145 ± 15 А – величина допуска ≥ ± 4σ ≈ 13,72). Следует отметить, что для получения стабильного и воспроизводимого процесса необходим системный анализ и исчерпывающие знания о нем, а также использование соответствующих методов проектирования оборудования [14]. Причем улучшение качества обеспечивается накоплением и концентрацией локальных улучшений в каждом процессе. Кроме того, необходима взаимозаменяемость деталей и узлов установки, чтобы их заменить, не оказывая влияния на разбросы по толщине и параметры пленки. Процесс реализуется в наиболее стабильной области, то есть той, где он менее всего подвержен отклонениям.

Таблица 2. Результаты аттестации процесса осаждения нитрида кремния по толщине

№ п п	D, А					D_{cp} по пл., А	R по пл., А	$\frac{R}{2D_{cp}}$ по пл., $\pm \%$	D_{cp} по пр., А	R по пр., А	$\frac{R}{2D_{cp}}$ по пр., $\pm \%$	D_{cp} м-ду пр., А	ско А	$\frac{C_p}{C_{pk}}$
	1	2	3	4	5									
1	141	136	141	142	141	140,2	6	2,1						
2	140	139	137	142	140	139,6	5	1,8						
3	139	138	138	141	138	138,8	3	1,1	141,9	8,4	3,0			
4	145	143	140	146	144	143,6	6	2,1						
5	144	139	142	146	140	142,2	7	2,4						
6	149	145	145	152	145	147,2	7	2,4						
1	141	139	140	141	141	140,4	2	0,7						
2	140	136	141	140	141	139,6	4	1,8						
3	139	134	134	139	139	137,0	5	1,8	141,7	8,4	3,0			
4	146	141	147	147	143	144,8	6	2,1						
5	146	139	145	143	142	145,4	7	2,7						
6	147	144	141	149	146	143	8	2,4						
1	145	140	140	143	144	142,8	5	1,8						
2	143	137	137	141	141	139,8	6	2,1						
3	138	136	138	138	140	138	4	1,4	139,9	4,8	1,7			
4	144	139	137	143	141	140,8	7	2,5				140,7	3,43	$\frac{1,46}{1,04}$
5	142	137	133	141	137	138	9	3,3						
6	143	137	138	143	141	140,2	6	2,1						
1	141	138	138	140	141	139,8	3	1,1						
2	141	137	135	141	139	138,4	6	2,2						
3	142	135	137	142	142	139,6	7	2,5	139,2	2,0	0,7			
4	140	136	136	140	138	138,0	4	1,4						
5	141	137	137	140	140	139,0	4	1,4						
6	141	135	140	142	141	140	7	2,5						
1	145	142	139	144	144	142,8	6	2,1						
2	143	137	138	141	141	140,0	6	2,1						
3	145	139	142	145	142	142,6	6	2,1	142,0	2,8	1,0			
4	148	141	138	143	144	142,8	10	3,5						
5	145	139	139	145	139	141,4	8	2,1						
6	148	141	137	146	141	142,6	11	3,9						
1	143	142	147	145	145	144,4	5	1,7						
2	138	136	142	142	143	140,2	7	2,5						
3	140	136	141	139	142	139,6	6	2,1	139,7	7,0	2,5			
4	140	135	140	138	141	138,8	6	2,2						
5	134	134	141	139	142	138,0	8	2,9						
6	134	133	141	138	141	137,4	8	2,9						

Заклучение

Исследована кинетика процесса осаждения нитрида кремния аммонолизом дихлорсилана в температурном диапазоне 720 – 850°C и γ от 3 до 15. Показано, что характер температурной зависимости V_{oc} не зависит от γ и определяется удельным потоком дихлорсилана и скоростью движения газов. Температура осаждения, удельный поток дихлорсилана и скорость движения газового потока оказывают существенное влияние на зависимость V_{oc} от γ . При снижении T_{oc} или γ , или увеличении w зависимость V_{oc} от γ становится более слабой. С увеличением давления скорость осаждения пленок нитрида кремния монотонно возрастает, однако при этом существенно (в 2,5 – 3,2 раза) увеличивает-ся разброс по толщине пленок. Для уменьшения последнего, повышения стабильности и воспроизводимости процесса осаждения целесообразно уменьшение давления, температуры и увеличение скорости пролета газов за счет возрастания суммарного потока реагентов при постоянном давлении. В исследованном диапазоне изменения γ , P и T пленки, полученные аммонолизом дихлорсилана, являются стехиометрическим нитридом кремния с показателем преломления $1,95 \pm 0,05$ и плотностью $2,72 - 3,11 \text{ г/см}^3$. Предложен механизм, объясняющий различный характер зависимостей скорости осаждения от γ в области относительно малых и больших потоков дихлорсилана. Полученные зависимости использованы для оптимизации процесса осаждения конденсаторного нитрида кремния для интегральных схем силовой электроники.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Goodwin C.A.* The Use off Silicon Nitride in Semiconductor Device // Engineering and Science Proceeding. 1982. V. 3. № 1–2. P. 109 – 119.
2. *Morosanu C.E.* The preparation, characterization and application of silicon nitride films // Thin Solid Films. 1980. V. 165. P. 171 – 208.
3. Современные проблемы физической химии поверхности полупроводников / Под. ред. А.В. Ржанова и С.М. Репнинского, Новосибирск, 1988. С. 130 – 144.
4. *Васильев В.Ю., Сухов М.С.* Аппаратура и методика осаждения слоев при пониженном давлении. Ч. 2. // Обзоры по электронной технике. Сер.7. 1985. Вып. 4 (1088). С. 42 – 46.
5. *Roenigk K.F., Jensen K.F.* Low Pressure CVD of Silicon Nitride // J. Electrochem. Soc. 1987. V. 134. № 7. P. 1777 – 1785.
6. Семь инструментов качества в японской экономике. М., 1990. С. 46 – 47.
7. *Адонин А.С., Васильев А.Н., Гарба Л.С., Михайлов Л.Н.* Осаждение диэлектрических и проводящих слоев из газовой фазы при пониженном давлении. Обзоры по электронной технике. Сер.2. Полупроводниковые приборы. 1983. Вып. 7. С. 35 – 36.
8. *Турцевич А.С., Гранько В.И., Макаревич И.И., Наливайко О.Ю.* Влияние условий получения нитрида кремния аммонолизом дихлорсилана при пониженном давлении на его диэлектрические свойства // Вакуумная техника и технология. 1992. Т. 2. № 2. С. 33 – 37.
9. *Турцевич А.С., Шахова С.Ф., Макаревич И.И., Наливайко О.Ю., Румак Н.В.* Влияние степени очистки аммиака на диэлектрические свойства нитрида кремния, полученного путем аммонолиза дихлорсилана // Высокочистые вещества. 1995. № 3. С. 108 – 113.
10. *Турцевич А.С., Гранько В.И., Смаль И.В., Наливайко О.Ю.* Химическое осаждение из газовой фазы при сверхнизком давлении (ULPCVD) возможности и перспективы // Вакуумная техника и технология. 1992. Т. 2. № 2. С. 10 – 13.
11. *Pan P., Berry W.* The Composition and Physical Properties of LPCVD Silicon Nitride Deposited with Different $\text{NH}_3/\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ Gas Ratio // J. Electrochem. Soc. 1985. V. 132. №. 12. P. 3001 – 3005.
12. *Gregory J.A., Douglas J., Yong J., Montrain R.W., Doherty L.D.* Characterization of low pressure chemically vapor deposited silicon nitride using experimental design // Thin Solid Films. 1991. V. 206. P. 11 – 17.
13. *Васильева Л.В., Гиновер Л.Я., Попов В.П.* Исследование процесса осаждения пленок нитрида кремния при взаимодействии моносилана с аммиаком // Химические науки. 1979. Вып. 5. № 12. С. 54 – 58.
14. *Barlett G., Dahm J., Mappin K. et al.* Using "Six Sigma" to Gauge PECVD // Semiconductor International. 1992. № 6. P. 94 – 100.

Поступила 5.03.03

Summary

The kinetics of the silicon nitride deposition by ammonolysis of dichlorosilane and the stoichiometry of the films deposited in the temperature range 720 – 850°C with a γ value of an ammonia flow-dichlorosilane ratio in the range of 3 to 15 and pressure 20 to 133 Pa is discussed. It is found that in the explored range of T , P , γ the films are stoichiometric silicon nitride with refractive index $1,95 \pm 0,05$ and density 2,72 to 3,11 g/cm³. The mechanism explaining the variable nature of deposition rate- γ relations in the area of relatively small and large flows of dichlorosilane is proposed. The obtained results were used to optimize the procedure of capacitor silicon nitride deposition for non-power electronics.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ Au-n-InP И РОЛЬ ПЕРЕХОДНОГО СЛОЯ

Ташкентский государственный технический университет
*Навоийский государственный горный институт
ул. Университетская, 2, г. Ташкент, 700095, Узбекистан

Рассмотрен детальный анализ электрофизических свойств металл-полупроводник (МП) с барьером Шоттки (БШ) на InP. На его основе установлены характеристики токопередачи в контактах и влияние на них концентрации основных носителей заряда и температуры. Дано обоснование необходимости применения модели контактов с переходным слоем для описания характеристик МП структур на InP. Для приближения к реальным условиям БШ создавались на химически обработанных поверхностях InP с помощью вакуумного и термического распыления и электрохимического осаждения металлов. Анализировались в основном ВАХ (вольтамперных) и ВФХ (вольт-фарадных) характеристики, которые позволяют оценить основные параметры границы раздела МП. Концентрация электронов $n = 9 \cdot 10^{15} - 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, ориентации (100), площадь контакта $S = 3 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$.

Для лучшего понимания свойств полученных МОП (металл-оксид-полупроводник) структур вольтамперные характеристики измерялись при различных температурах. Обнаружено, что обратные токи утечки малы при низких температурах; они меньше 10^{-9} А при 1 В ниже 270 К.

На рис.1 показаны обратные ВАХ для МОП структур с одним промежуточным окисным слоем, измеренные при нескольких температурах выше 280 К. Обратные токи утечки возрастают с увеличением температуры. Однако токи утечки (рис.1), намного меньше, чем наблюдаемые в общепринятых n-InP контактах Шоттки [1, 2]. Плотность обратного тока $I_{\text{нас}} = 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ А/см}^2$ при 2 В и 300 К.

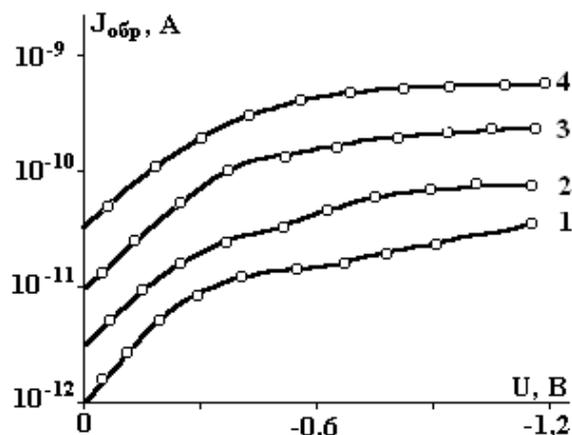


Рис.1. Обратные ВАХ Au-n-InP структур с промежуточным окисным слоем при различных температурах $T, \text{ К}$: 1 – 283; 2 – 300; 3 – 315; 4 – 323

Коэффициент идеальности оценивался при каждой температуре, что показано на рис.2. Явной зависимости n от температуры не обнаружено.

Несмотря на наличие промежуточного окисного слоя, коэффициент идеальности n довольно хорошо приближается к единице, то есть $n = 1,2$. Следовательно избыточные токи, такие как ток рекомбинации, существенно не влияют при прямых смещениях. В области низких температур наблюдается увеличение n , то есть при низких температурах увеличиваются избыточные токи за счет рекомбинационных составляющих.

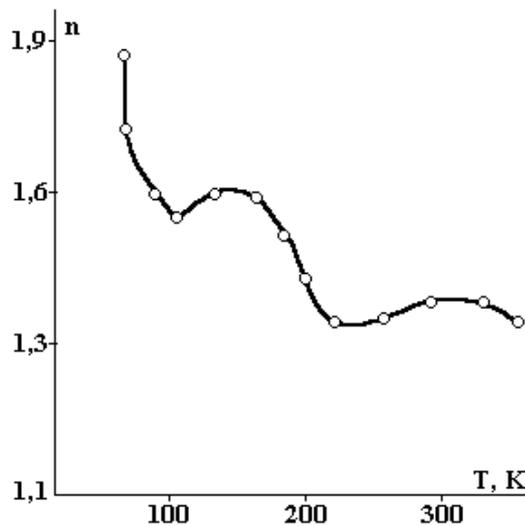


Рис.2. Изменение фактора неидеальности от температуры для Au-n-InP МОП структур

Обнаружена теоретически ожидаемая линейная зависимость $q\Phi_0$. Наклон прямой $q\Phi_0 = f(T)$ пропорционален фактору туннелирования электрона $2(2m\chi)^{1/2} \delta/h$. Хорошо известно, что, когда контактирующий металл осаждается на химически травленную полупроводниковую поверхность, тогда металл и полупроводник не находятся в близком контакте. Между металлом и полупроводником обязательно присутствует тонкий промежуточный окисный слой. Поэтому он присутствует даже в общепринятом контакте Шоттки без какого-либо специально создаваемого промежуточного окисного слоя. Для общепринятых n-InP контактов Шоттки $q\Phi_0$ меньше 0,5 эВ при комнатной температуре. В данной структуре $q\Phi_0 = 0,86$ эВ при $T = 300$ К и приблизительно на 0,4 эВ больше значений для общепринятых n-InP контактов Шоттки.

Такая разница значений $q\Phi_0$ вытекает из того, что $q\Phi_0$, и $2(2m\chi)^{1/2} \delta/h$ зависят от процесса формирования промежуточного слоя.

Из зависимости $\ln(I_{нас}/T) = f(1/T)$ определяли точные значения $q\Phi_0$ и $2(2m\chi)^{1/2} \delta/h$.

$$\ln(I_{нас}/T^2) = q\Phi_0/kT - 2/h(2m\chi)^{1/2} + \ln(A*S). \quad (1)$$

Наклон ричардсоновской зависимости пропорционален $q\Phi_0$. Фактор туннелирования $2(2m\chi)^{1/2} \delta/h$ определяется из экстраполированного пересечения прямой $\ln(I_{нас}/T^2)$. На рис.3 показана ричардсоновская зависимость, полученная по данным тока и напряжения.

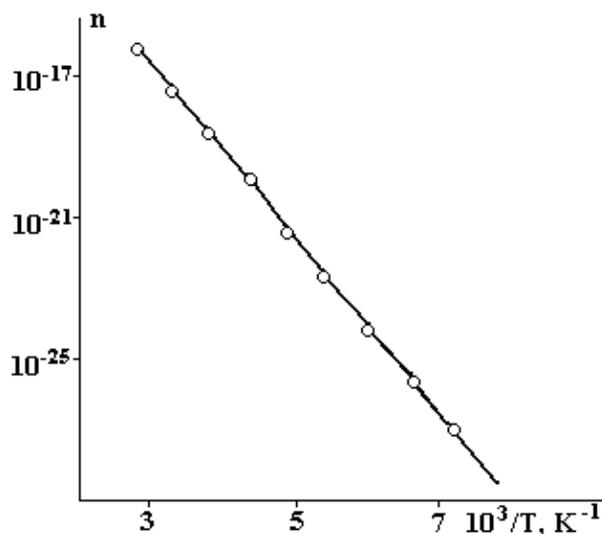


Рис.3. Зависимость $\ln(I_{нас}/T^2) = f(10^3/T)$ для Au-n-InP МОП структур

Высота барьера $q\Phi_0$ составляет 0,56 эВ. Фактор туннелирования электронов $2(2m\chi)^{1/2} \delta/n$ оценивается приблизительно 19,4.

Вольт-емкостные характеристики измерены при частоте 100 кГц в интервале температур 77 – 300 К. На рис. 4 изображены зависимости $I/C^2 = f(U)$ для МОП-структур. Проанализируем $C - U$ данные, основываясь на теоретической обработке. Зависимость $I/C^2 = f(U)$ выражается в виде

$$\left(\frac{S}{C}\right)^2 = \left(\frac{\delta}{\varepsilon_{np}\varepsilon_0}\right)^2 + \frac{2}{q\varepsilon_{np}\varepsilon_0 N_D} \left\{ \Phi_0 - E_{Fn} - \frac{kT}{q} - U + \frac{\delta}{\varepsilon_{np}\varepsilon_0} \left[2q\varepsilon_{np}\varepsilon_0 N_D \left(\Phi_0 - E_{Fn} - \frac{kT}{q} \right) \right]^{1/2} \right\}, \quad (2)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, ε_{np} – относительная диэлектрическая проницаемость промежуточного слоя, ε_n – относительная проводимость полупроводника, N_D – концентрация доноров, qE – энергия уровня Ферми, измеренная на краю зоны проводимости в нейтральной области. Значение ε_n для InP составляет 12.

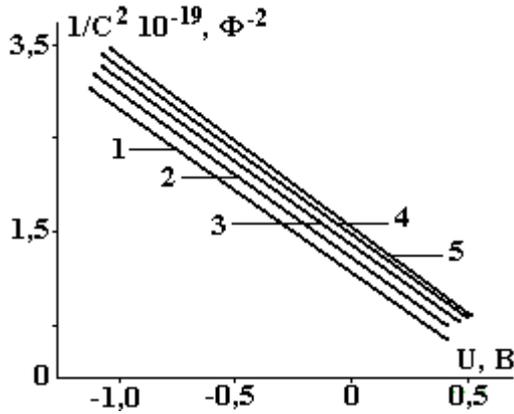


Рис.4. Вольт-емкостные характеристики для Au-n-InP МОП структур при различных температурах. T, K : 1 – 315; 2 – 260; 3 – 217; 4 – 176; 5 – 120

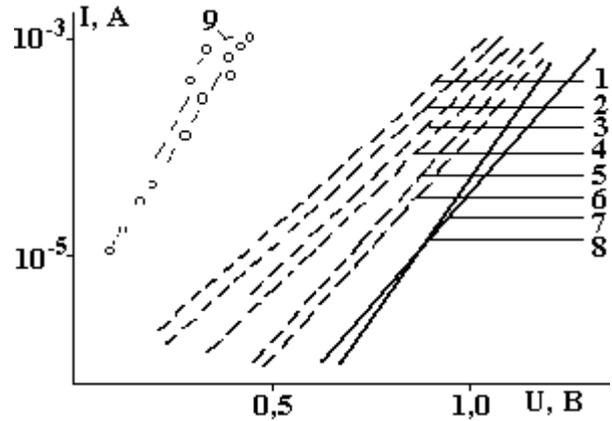


Рис.5. Прямая ветвь ВАХ Au-n-InP структур при 300 К и $n = 1,9$ (1), 2,3(2), 2,6(3), 4(4), 6(5), 10(6), 20(7), в нм и для почти идеальных структур (8, 9)

Значения I/C^2 при заданном напряжении уменьшаются с ростом температуры, как вытекает из уравнения (2). Концентрация доноров N_D определяется из наклона кривой $I/C^2 = f(U)$

$$N_D = -2 \left[q\varepsilon_n \varepsilon_0 \frac{d}{dU} \left(\frac{S}{C} \right)^2 \right]^{-1}. \quad (3)$$

Из данных $C - U$ на рис. 5 получаем $N_D = 7,6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Из пересечения кривой $I/C^2 = f(U)$ с осью напряжения получаем

$$V_0 = \left[\left(\Phi_0 - E_{Fn} - \frac{kT}{q} \right)^{1/2} + \frac{\delta}{\varepsilon_{np}} \left(\frac{q\varepsilon_n N_D}{2\varepsilon_0} \right)^{1/2} \right]^2, \quad (4)$$

отсюда

$$\frac{\delta}{\varepsilon_{np}} = \left(\frac{q\varepsilon_0}{2\varepsilon_n N_D} \right)^{1/2} \left[V_0^{1/2} - \left(\Phi_0 - E_{Fn} - \frac{kT}{q} \right)^{1/2} \right]. \quad (5)$$

Энергию уровня Ферми определяем как

$$E_{Fn} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_C}{N_D} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{2}{N_D} \left(\frac{m^* kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \right]. \quad (6)$$

Здесь N_C – эффективная плотность состояний в зоне проводимости, m^* – эффективная масса электрона, равная $m^* \text{InP} = 0,078m_0$ где m_0 – масса свободного электрона. Подставляя значения

$N_D = 7,6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\Phi_\delta = 0,56 \text{ эВ}$, $V = 0,48 \text{ эВ}$ и $E_{Fn} = 0,12 \text{ эВ}$ в уравнение (5), получаем эффективную толщину промежуточного окисного слоя $\delta/\epsilon_{np} = 22:30 \text{ \AA}$. Толщина промежуточного слоя порядка 60 \AA . Тогда $\epsilon_{np} = 2,8$ при 100 кГц .

Таким образом, нами разработан новый метод изготовления Au-n-InP диодов Шоттки с промежуточным слоем, полученным путем анодирования поверхности InP, толщина слоя 60 \AA . Индекс рефракции слоя, измеренный эллипсометрически при 6323 \AA , оценивался как $1,62 - 1,64$ и равен индексу InPO_4 . В изготовленных контактах Шоттки обнаружено отличное выпрямление. Несмотря на присутствие окисного промежуточного слоя, фактор идеальности немного выше единицы и составляет $n = 1,2$. Обнаружено, что обратные токи утечки меньше, чем токи в контактах Шоттки с промежуточным слоем. Разработанный метод полезен для изготовления затворов на InP.

На рис. 5 приведены прямые ветви ВАХ с различной толщиной промежуточного окисного слоя. Прямые ветви ВАХ описываются соотношением

$$I = I_{\epsilon_-} \left[\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right]. \quad (7)$$

Тогда ток насыщения

$$I_{\epsilon_-} = A^* ST^2 \exp\left[-\frac{2}{\hbar}(2m\chi)^{1/2} \delta\right] \exp\left(-\frac{q\Phi_\delta}{kT}\right), \quad (8)$$

где $A^* = 9,4 \text{ А см}^{-2} \text{ К}^{-2}$ для InP, m – эффективная масса туннелирующих электронов, χ – эффективная высота потенциального барьера для туннелирующих электронов. Оценка $n = \frac{q}{kT} \ln \frac{\partial U}{\partial \ln I}$ по наклону кривых приводит к значениям $1,2 - 2,2$. Следовательно, что увеличение толщины промежуточного окисного слоя увеличивает коэффициент идеальности n . Большое значение коэффициента идеальности свидетельствует о сильном влиянии промежуточного, вероятно, окисного слоя на механизм токопрохождения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Guinea F, Sarches-Dehesa J, Flores F. // J. Phys. C.Solid State Phys. 1983. V. 16. №. 33. P. 6499 – 6512.
2. Takachi Suginom, Hiroyuki Vamamoto, Voshifumi Sakamoto et. al. Effect of Phosphine-plasma treatment on characteristics of Au-n-InP Schotky junctions // Jap. J. of Appl. Phys, Part 2, V. 30. № 8B. 1991. P. 1439 – 1442.
3. Jeong Yoon-Ha, Kim Geon-Tea, Kim Seok-Tea, et al. Effects of Photochemical vapor deposition phosphorus-nitride interfacial layer on electrical characteristics of Au-InP Schotky diodes // J Appl. Phys, 1991, V. 69. № 9, P. 6695 – 6701.
4. Kendelevicz T, List R.S, Berthess K.A. et al. Photoemission study of the reactive Pd/InP (110) interface // J. Vac. Sci. And Technol. B. 1986. V. 4, № 4, P. 959 – 965.

Поступила 08.04.03

Summary

Work is devoted to the detailed analysis of physical properties of metal semiconductor (MS) with barrier Schotky on InP. On its basis a mechanism of current transport in contacts and the influence of concentration of carriers of charge and temperature is established. The substantiation of necessity of application of the model of contacts with a transitive layer for the description of characteristics of MS-structures on InS is given. The new method of manufacturing Au-n-InP Schotky diodes with an intermediate layer can be used for manufacturing (FST) on InP.

SOME NEW PERSPECTIVES ON IMPROVING WEAVING PROCESS OF COTTON YARNS

*Institute of Applied Physics, Academy of Sciences of Moldova
Academiei str. 5, Chisinau, MD-2028, Moldova*

** Southern Regional Research Center, Agricultural Research Service, USDA,
New Orleans, LA, USA 70124*

1. Introduction and research background

Scientific research and technological developments in the weaving field worldwide have always followed the fundamental goals of providing improvements in the process and product qualities and producing efficiently a great variety of products for consumption. Weaving is the most predominant method of producing cotton textile materials. Approximately 80% of cotton produced worldwide is used in woven fabrics. In the weaving process, the warp yarns on a loom undergo extremely harsh mechanical actions of repeated stresses and strains as well as substantial abrasion due to friction. As a result, a virgin, greige yarn would develop a significant amount of hairiness (projecting fibers), which would hinder satisfactory fabric formation due to generation of lint, formation of balls in dense warps, inter fiber clinging and inter yarn entanglements, and, consequently, excessive yarn breakages, loom stoppages, and, hence, production and quality interruptions. To avoid these problems in weaving, the warp yarns, for centuries, have always been coated with a thin strong film of a suitable adhesive, generally any ordinary or modified starch. This process of coating the warp yarns on a slasher is called sizing or slashing. Basically, a sheet of warp yarns is impregnated with a special size formulation containing several chemical agents beside the main starch [1, 2]. However, the sizing chemical agents must be completely washed out and removed from the fabric, in order to achieve satisfactory fabric bleaching, dyeing, and/or any special finishing such as a flame-retardant treatment (FR) or a durable- pressed (DP) finish. In fact, fabric finishing starts with fabric desizing. The size mixture not only covers the yarn surface with a thin film, but it also is absorbed into the yarn core, thus gluing and cementing the projecting fibers to the yarn surface, increasing the yarn smoothness and strength, and, thereby, facilitating the weaving process.

The global need for sizing agents all over the world is estimated to be more than 3 million tons per year. Among the commonly used agents, the various starches make about 75% (potato and corn starch 60%; modified starch 15%; (poly) acrylates 12%; polyvinyl alcohol (PVA) 11%; and carboxymethylcellulose (CMC) and other substances 2%). According to the published data, the main size formulations include starches that are made of food raw materials [2, 3]. The demand of textile industry for starches in the CIS (Commonwealth of Independent States) countries alone is 80 – 85 thousand tons per year [4]. Due to scarcity of food raw materials, the importance of new research and technological developments to modify, conserve, and even eliminate starch applications in textile industry becomes obvious [5, 7].

During the past 20 – 25 years, with the objective of completely or partly eliminating starch applications in size mixtures, a number of new size compositions have been developed using synthetic polymers based on vinyl monomers and (poly) condensate high-molecular compounds [8, 11], as well as multi-component size formulations [12, 13]. However, these sizing materials are very costly, not easily available especially in CIS and East European countries, and are harmful for the environment when they are removed in the process of fabric desizing.

Although the textile chemists and technologists worldwide are continuously trying to develop new and improved size formulations and methods of size application, the classical or traditional size and sizing method, which were introduced in the industry more than 140 years ago, are still very much used without any substantial changes at more than 85 % of textile mills in the world today. The yarn immersion in the sizing mixture with the subsequent squeezing of the yarn still remains the main sizing procedure with all its technological weaknesses, drawbacks and difficulties. In several countries, however, progressive methods, such as warp yarn sizing with deposit rollers [14, 15]; sizing with porous sintering rolls [16, 17]; hot melt sizing [18, 19]; foam sizing [21–23]; pre-wet yarn sizing [24, 25]; and mechanical methods of starch splitting during size preparation [26–29], have been developed and applied. But these relatively new developments are still applied with caution and are not widely used by the industry.

Another significant operation in the process chain of manufacturing a woven cotton fabric, before actual finishing, is fabric desizing. As mentioned previously, desizing consists of completely washing out all of the sizing agents in order to achieve quality fabric finishing. Today, some effective methods involving continuous and simultaneous desizing, boiling and bleaching have been introduced in the mass production of certain cellulose textile materials [30, 31]. But, at this stage, they still remain somewhat sensitive to the environment and cause pollution (BOD), since large amounts of unsafe chemicals are released, without any wastewater treatment, into the sewage.

Summarizing all the facts mentioned above, we can state that the sizing and desizing processes deployed in the weaving industry today demand too much amount of heat and electric energy, human resources, water consumption, and sewage water treatment. In addition, the use of various chemical reagents (perhaps, toxins of complex compositions) that may be harmful to the environment is alarming. Therefore, a serious research focus on the development of improved, cost-effective, and environment-friendly process of warp sizing for cotton yarn weaving deserves a high priority. In fact, there is a comprehensive research program underway at the Southern Regional Research Center (SRRC), ARS, USDA, USA, to possibly eliminate the process of warp sizing for certain types of fibers, yarns and fabrics [32]. According to Dr. Sawhney, the sizeless weaving truly involves a development of a new, wholesome technology that includes almost all aspects of textile science and technology, viz., fiber selection and processing, yarn formation and quality, warp preparation and consistency, weaving machinery and conditions. Although it is well known that the plied, folded or cord yarns of cotton can be efficiently woven without the traditional sizing, the main reasons that hinder size-free weaving of singles cotton yarns are: 1) the unbalanced yarn twist torque (liveliness) that causes loss of twist and hence integrity of yarn structure during “repeated shedding” in high speed weaving; 2) the inherently non-uniform orientation of fibers in the cross section of any type of yarn structure; 3) presence of too many short fibers that are almost impossible to control during drafting, especially in spinning; 4) excessive hairiness of single’s yarn that causes formation of lint balls and beads in a dense warp for a densely woven fabric; and 5) excessive abrasion and torture of the warp yarn during weaving. An extensive literature search shows only a very limited work (attempts) relating to size-free weaving, which truly indicates the complexities of the problem of size-free weaving. The idea to eliminate the sizing process (and subsequent desizing) was also proposed, among others, by Dr. Richard A. Schutz at the 4th International Symposium on Sizing in Mulhouse (France) [33]. At any rate, considering the many complexities of size-free weaving, any progress in the field of size reduction and minimization is necessary and beneficial for the near future and especially for the developing countries of CIS and East Europe. One of the promising methods to achieve reduction of conventional starch sizes, while improving the warp sizing and weaving processes as well, is mechanical splitting of starch. We have developed a new method of starch splitting through an ultrasonic cavitation technology, which is described in this paper.

2. Cavitation Technology (a new approach to an improved starch size preparation and formulation)

Starch splitting based on the cavitation technology provides rapid and effective reduction of high-molecular natural chains without using chemical reagents. The results of this study were obtained by using ultrasound cavitation to split potato starch, in order to minimize the starch content in the size composition for cotton yarns. The main technological parameters, viz., the amplitude of ultrasound oscillations, the size temperature, and the average rate of splitting, were controlled. The size composition was characterized by such physio-chemical parameters as concentration, viscosity and adhesion. Starch sizes with concentrations K equal 3, 5, and 6% were obtained, using the laboratory ultrasound installation shown in Fig. 1, at the amplitudes of ultrasound oscillations ξ of 3, 6, 9, 12, and 15 m and the temperatures T of 70, 75, 80, and 85 °C.

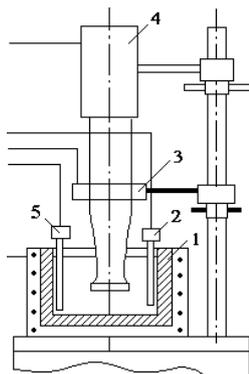


Fig. 1. Laboratory ultrasound installation for splitting starch: 1 – bath for size preparation; 2 – a transducer for ultrasound cavitation registration; 3 – a transducer for registration of the oscillation amplitude; 4 – a converter; 5 – a transducer for temperature control and registration

The process of size preparation consisted of heating the water up to 30°C, starch loading and homogenization of the mixture in the cavitation field for 2 – 3 minutes, and then heating the size, while giving the cavitation treatment, until the specified (programmable) temperature and minimal relative constant viscosity were reached. The size viscosity was determined by the time (in seconds) of the size flow from the measuring funnel of 500 ml volume, with 5 mm diameter holes, and capillary length of 50 mm. The size adhesion was determined in percentage, as the ratio of the increasing mass of the sized yarn with respect to that of the sizeless yarn.

In Fig. 2, the viscosity curves show that viscosity values depend on the amplitude of ultrasound oscillations at various temperatures and concentrations. The change of the relatively constant minimal viscosity reached at the cavitation treatment can be explained/characterized as follows. It decreases with the temperature growth for all the concentrations and amplitudes of ultrasound oscillations. For example, when temperature increases from 70 to 85°C, viscosity decreases from 32.3 to 28.1 sec. (for $K = 5\%$, $\xi = 3 \mu\text{m}$) and from 30.8 to 26.6 sec. (for $K = 5\%$, $\xi = 15 \mu\text{m}$). Viscosity increases with the concentration growth for all temperatures and amplitudes of the ultrasound oscillations. For example, when concentration increases from 3 to 5%, minimal viscosity increases from 24.8 to 27.2 sec. at the amplitude of ultrasound vibrations $\xi = 6 \mu\text{m}$ and temperature 85°C. Viscosity decreases with the increasing amplitude of ultrasound oscillations, but minimal viscosity values that are attainable do not differ dramatically. For example, when the amplitude of ultrasound oscillations increases from 3 to 15 μm , the minimal viscosity decreases from 31 to 29 sec. for the concentration of 3% and temperature 70°C.

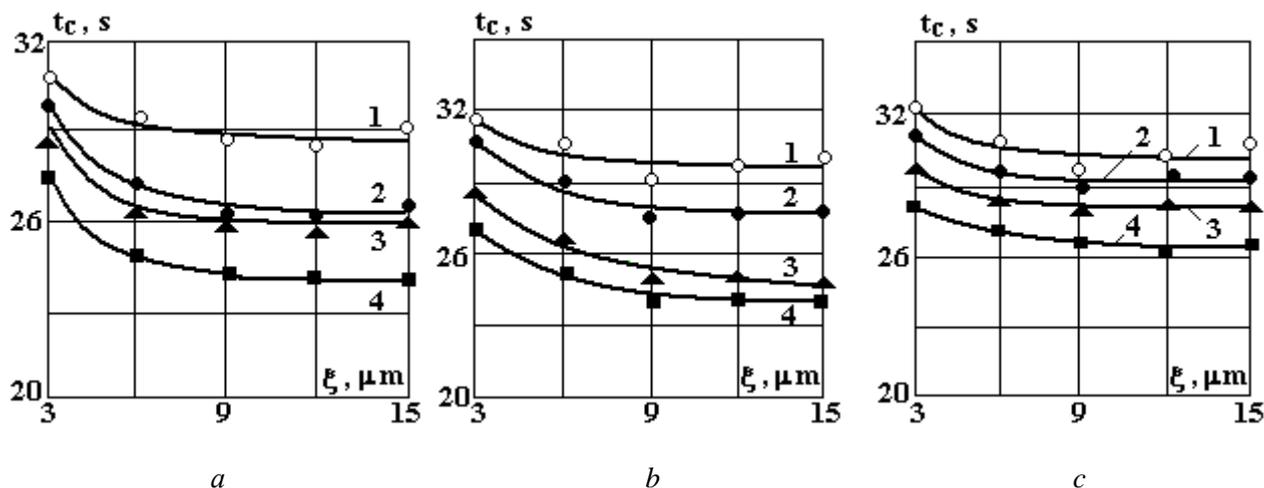


Fig. 2. Size viscosity vs oscillation amplitude. 1 – 4, $T^{\circ}C = 70; 75; 80; 85$. a – c $K = 3; 4; 5\%$

The starch splitting (by the ultrasound cavitation) time that is needed to decrease the viscosity value to its minimum possible value is the other important technological parameter which can be used to state the duration of splitting and, hence, the duration of size preparation. In Fig. 3 the dependences are shown of the size processing duration needed to reach the minimal constant viscosity versus the amplitude of ultrasound oscillations, concentration and temperature. Those dependences can be characterized in the following way. The duration of treatment decreases when the amplitude of the ultrasound oscillations increases at all concentrations and temperatures. For example, the duration of ultrasound cavitation treatment decreases from 20 to 9 min. when the amplitude of ultrasound oscillations increases from 3 to 5 μm at concentration of 3% and temperature 70°C. The duration of treatment increases with the concentration growth at all temperatures and amplitudes. For example, the duration of treatment increases from 9 to 14 min, when the concentration increases from 3 to 5% at the temperature 70°C and amplitude of ultrasound oscillations 15 μm . The time of treatment decreases with growth of the size temperature for all concentrations and amplitudes of ultrasound oscillations. For example, the duration of treatment decreases from 20 to 16 min, when temperature increases from 70 to 85°C for size concentration 3% and amplitude of ultrasound oscillations 3 μm .

The time and percentage of the starch splitting (by the ultrasound cavitation) allow to determine the average rate of splitting which also is an important technological parameter. The average rate of desizing, defined via the percentage of starch splitting per minute, was studied versus the amplitude of ultrasound oscillations for various concentrations and temperatures.

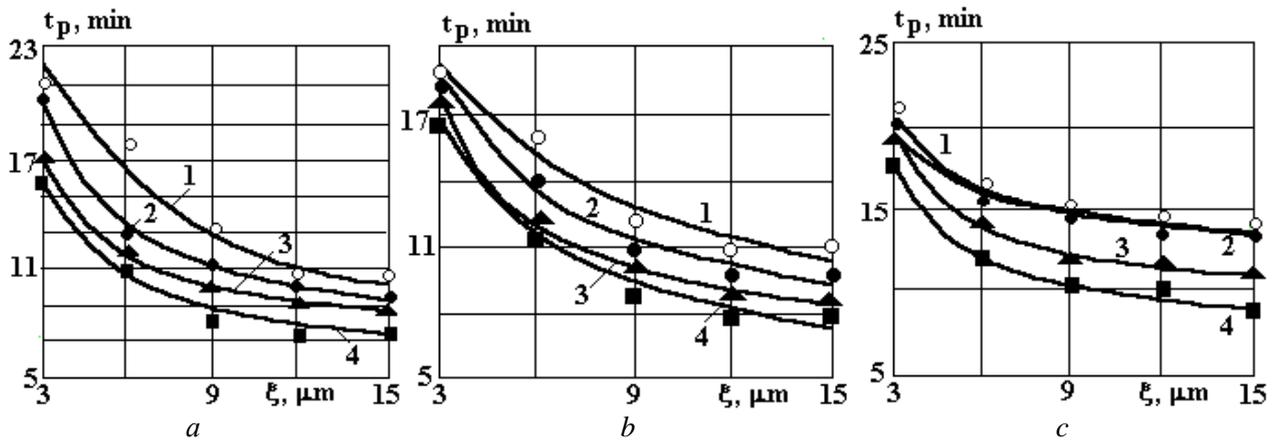


Fig. 3. Time of size treatment needed to reach the minimal constant viscosity.
 1 – 4, $T^{\circ}C = 70; 75; 80; 85$. a – c $K = 3; 4; 5\%$

Fig. 4 shows the influence of the amplitude of ultrasound oscillations on the starch splitting rate at various size concentrations and temperatures. The starch splitting rate is characterized in the following way. It increases when the amplitude of ultrasound oscillations increases for all the concentrations and temperatures studied. For example, the average rate of splitting increases from 3.7 to 10.2% per minute when the amplitude of oscillations increases from 3 to 15 μm at concentration 3% and temperature 70°C. It decreases with the growth of starch concentration in the size for all temperatures and amplitudes of oscillations. For example, the average rate of splitting decreases from 10.2 to 5.3 % per minute when concentration increases from 3 to 6% at the temperature 70°C and the amplitude of oscillations 15 μm . It also increases with the growth of size temperature for all concentrations and amplitudes. For example, the average starch splitting rate increases from 3.7 to 5.6 % per minute when temperature increases from 70 to 85°C for concentration 3% and amplitude of oscillations 3 μm .

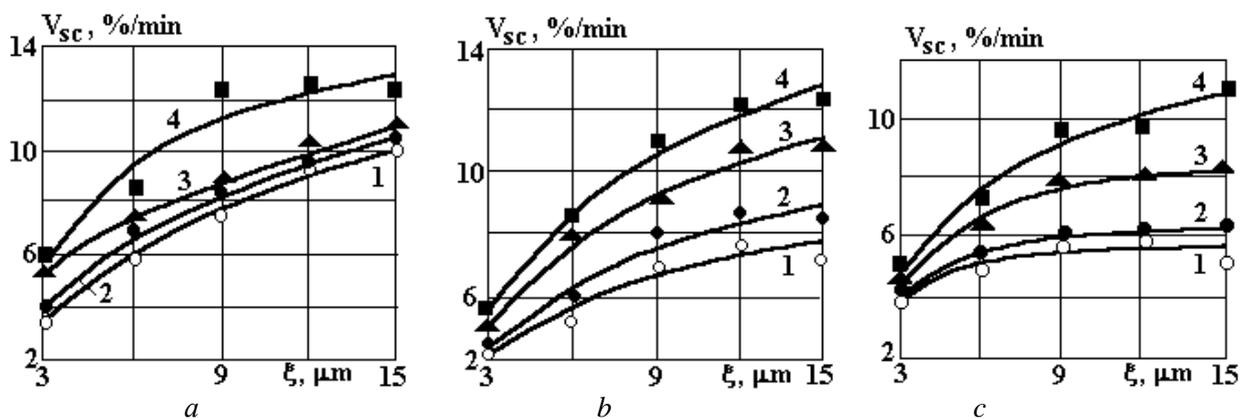


Fig. 4. Average rate of the starch splitting vs the amplitude of oscillations.
 1 – 4, $T^{\circ}C = 70; 75; 80; 85$. a – c $K = 3; 4; 5\%$

The size viscosity and, hence, the percentage of the starch splitting influences the size adhesion to the yarn. Therefore, technological parameters of the starch splitting by ultrasound cavitation can also influence the yarn size adhesion. In Fig. 5 the experimental data related to the yarn size adhesion versus the amplitude of ultrasound oscillations for various concentrations and temperatures are shown.

Analyzing those curves one can state that the adhesion can be characterized in the following way. Adhesion decreases with the growth of the amplitude of ultrasound oscillations due to increasing of the splitting percentage and size fluidity at all concentrations and temperatures. It decreases when the temperature increases due to fluidity increasing. It increases with concentration growth due to viscosity increasing at constant parameters of splitting (temperature, amplitude)

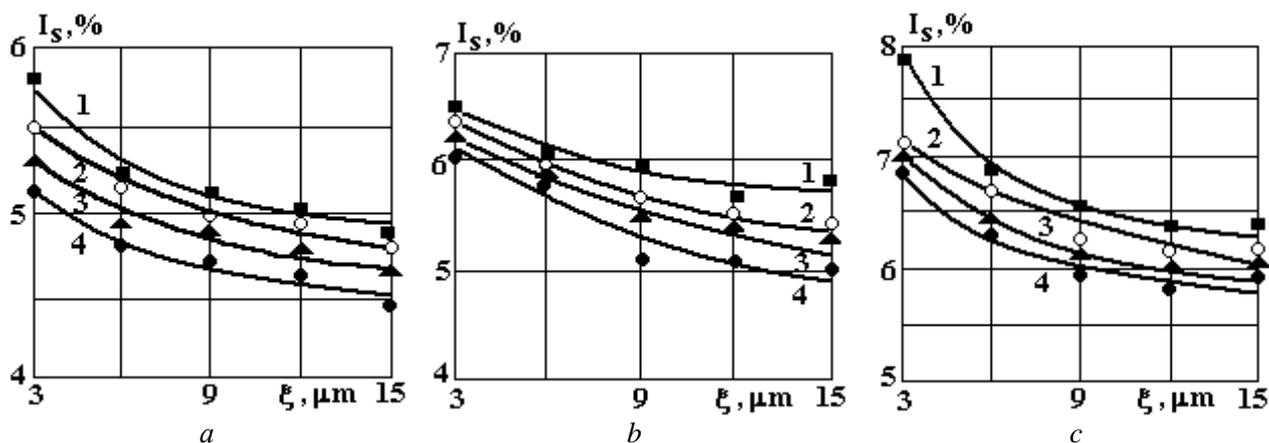


Fig. 5. Yarn size adhesion vs. the amplitude of ultrasound oscillations.
 1 – 4, T^0 C = 70; 75; 80; 85. a – c K = 3; 4; 5 %

Conclusions

Analysing the recent achievements in the reduction/minimization of the traditional size or sizing through starch splitting cavitation technology and even considering the possible elimination of sizing for weaving cotton warps, we can derive the following conclusions:

One of the main problems that needs to be resolved, especially for sizeless weaving, is the production of a yarn of the highest uniformity and evenness and the least amount of hairiness. In other words, a uniform, even packing of the fibers in the yarn cross section throughout the entire yarn length is very important. Obviously, this is a function of the fiber quality, yarn structure, and spinning machine or operation.

The current research results obtained from the starch splitting process conducted under the action of ultrasound cavitation indicate that it is possible to develop an effective and ecologically friendly size formulation by using the cavitation technology.

The cavitation method of preparing starch size may provide starch saving up to 30%, (depending on the fabric style), softening agent saving up to 50%, and 35% energy saving.

Weaving productivity may increase by up to 8%, mainly due to the improvement in the quality of the sized warp, which would lead to less yarn breakages during weaving. The modified size and sizing process would eliminate the use of harmful chemical reagents, which would make the sizing process ecologically friendly.

The weaving and fabric quality improvements resulting from the reduced starch concentration in the size composition would be further complimented by the decrease in the consumption of the chemical reagents.

Finally, it is safe to claim that the ultrasonic cavitation technology for the preparation of a starch size is a promising application for the cotton textile industry.

References

1. Ramaszeder. Die chemische und mechanische Technologie des Schlichtens – Dresden, 1973. (In German).
2. Lothar Simon, Manfred Humber. Technology of yarn preparation for weaving and knitting. Veb Fashbuchverlag, Leipzig, 1989. P. 172. (In German).
3. The chemistry of spun sizing. Troubleshooting and innovation in Slashing. AATCC Warp Sizing Symposium. 1999. P. 41–47.
4. Ganzjuk L.I. New reagents in sizing. Kyiv, Technika, 1992. P. 169. (In Russian).
5. Heinz Leitner. Fabric finishing begins with sizing – experience with acrylate sizes, Ludwigshafen, Melliand Textilberichte. Nr.7/1980. P. 579–583.
6. Smirnov G.A., Kurilova V.A., Indeikin E.A., Rybin N.V., Mogilevich M.M., Molchanova E.V. Vinyl Alcohol and Vinyl Acetate Copolymers for Cotton Yarn Sizing. (State Tech.Univ. - Yaroslavl). Textile Chemistry: Theory, Technology, and Equipment. 1997. P. 79–85.
7. V. Steibel. Polyacrylate Sizes – Focused Recipe Formulation in Staple Fiber Sector., Melliand Textilberichte / International Textile Reports (German Edition) 80, N 1/2. 1999. P. 34–37.
8. World perspectives on warp sizing. Troubleshooting and innovations in slashing. AATCC Warp Sizing Symposium. 1999. P. 107–112.

9. *Shchegolevsa R.M., Kurilova V.A., Bykova I.V.* Application of thermoactive resin polycondensates in sizing. In the book: Research on the finishing of cotton fabrics. M., 1984. P. 17–19. (In Russian).
10. Pat. USA 4158083. ICI³ D02 C 3/00. Size for fibrous materials.
11. Pat. USA 4259457. ICI³ D05 C 3/06. Size on the basis of polyether resin.
12. *Glubish P.A.* Application of acryle acid and related compounds in textile and light industry. M., Light Industry, 1975. P. 35. (In Russian).
13. *Franclin J.* Practical Sizing. Slashing update. (Nov. 30-Dec. 1, 1999). ITT Cat. nr. TS 1488. C6 S52. 1999.
14. *Trauter J.* Chemiefasern Textil Industrie, nr. 4/1983. P. 264.
15. *Penghini A.* New sizing systems at textile mills. Melliand Textilberichte. Nr. 3/1990. P. 566 – 572.
16. *Trauter J.* Neul Etwicklungen aus dem I.T.V. Denkendorf für die Schlichterei. Melliand Textilberichte. Nr. 1/1990. P. 11–15.
17. *Götz K., Trauter J., Halsch D.* Size process testing using sintering rolls. Textil Praxis International. Nr. 5/1991. P. 418 – 425.
18. Prospect. Slashing machines. Hot Melt Sizing. ITMA'83.
19. Pat. Japan 48-28399 ICI³ C 09 3/14. Sizing agent for fibres.
20. *Saribekov G.S., Osik Yu.I., Vidyushchenko E.N., Glushchenko A.I.*, Substitutes for food raw materials in textile industry. Kyiv, Technika, 1987. P. 142.
21. *Perkins Warren S.* Foam sizing. Text. Res. J. 1982. Nr. 9. P. 547–554.
22. *Trauter J., Vialon R.* Test bench for investigating foam sizing. Melliand Textilberichte. Nr. 2/1987. P. 99–105.
23. *Kanungo R.N.* Sizing in foamy solutions. Indian Text. Nr 5/1983. P. 105–110.
24. Pre-Wet Sizing Spun and Filament Here to Stay? Slashing technology: Mar. 28-29. 2000.
25. *Trauter J., Abele Y., Guo G. et. al.* Highlights from the sizing research of the ITV Denkendorf (Germany) Meilland Textilberichte. 1999. P. 38–42.
26. *Lipatova I.M., Sedova I.L., Iermolaeva N.A., Padokin V.A., Moryganov A.P.* (Russian Acad. of Sciances - Ivanovo) Textile Chemistry: Theory, Technology and Equipment. 1999. P. 265–271.
27. *Kusova A.A., Lipatova I.M., Kumeeva T.Y., Moryganov A.P.* Effect of surface-active agents on starch size quality in mechanical preparation. Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seria Tekhnologia Tekstil'noi Promyshlennosti. Nr 5/1999. P. 62–67. (In Russian).
28. *Dumitras P., Liute D.* Investigation of viscosity of size on the basis of decomposed by hydroacoustic cavitation starch, Proceedings of Iasi Polytechnic Institute, Romania, V. XLII, P. 63–69 (1996). (In Romanian).
29. *Dumitras P. G., Bologa M.K., Liute D.* Cavitation technology in textile industry, Proceedings of International Conference “Technologies and devices”, Sibiu, Romania, 2000. P.17–26. (In Romanian).
30. Pat. USA 3740188, ICL³ D06M 3/02. Process of simultaneous desizing, boiling and bleaching.
31. Pat. Germany 1292128, ICI³ D06M 13/02. Method of desizing and bleaching.
32. *Sawhney P.S.* Preparation and weaving of cotton yarns without the traditional warp sizing: Some new concepts. Proc. Beltwide Cotton Conference. National Cotton Council of America, Memphis, TN (2000).
33. *Richard A. Schutz.* Possible Solutions to Sizing and Desizing Problems. Melliand Textilberichte. Nr.7/1980. P. 566–569.

Received 11.07.03

Summary

With the technological developments of high-speed, high performance weaving machines, the existing drawbacks of common warp sizing procedures and practices have become even more critical. Although warp sizing and fabric desizing are centuries-old processes and have undergone some significant improvements, they still remain expensive, complicated, and environmentally harmful. The optimal way to further improve significantly the cotton yarn weaving process and its ecological impact on the textile industry lies in the reduction and minimization of the size add-on and, eventually, in the elimination of the sizing process altogether. On the basis of the research presented here, it is proposed to use an ultrasonic cavitation technology in the starch splitting process. This technology offers a significant improvement in the physio-chemical properties of the starch-based sizing agents for preparation of high-quality cotton warps for efficient weaving. In addition, this technology reduces consumption of expensive food raw materials and renders the weaving process ecologically friendly.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КИСЛОРОДА С ПОВЕРХНОСТЬЮ КРЕМНИЯ

*Ташкентский государственный технический университет им. А.Р. Беруни,
ул. Университетская, 2, г. Ташкент, 700095, Узбекистан*

При изучении процесса окисления кремния возник интерес к адсорбционным–десорбционным явлениям на поверхности кремния. Как известно, если частицы на поверхности имеют энергию связи более 0,5 эВ, то их принято относить к химически адсорбированным, при меньших энергиях связи адсорбция считается физической.

Установлено, что на начальном этапе окисления вместо увеличения привеса наблюдается его уменьшение. Этот эффект связан с тем, что происходит активация десорбции частиц с поверхности кристалла.

Из анализа экспериментальных данных видно, что на начальном этапе окисления кремния в процессе участвуют как минимум три вида точечных дефектов. Их релаксацию можно представить в виде

$$\frac{dn_t}{dt} = -\alpha_1 \cdot n_1 \cdot n_t. \quad (1)$$

Интегрирование (1) дает экспоненту с постоянной времени τ_1 :

$$\tau_1 = \left[\frac{1}{\alpha_1 \cdot n_1} \right], \quad (2)$$

которая и определяет начальную стадию процесса релаксации. Здесь τ_1 – средняя по состояниям зоны проводимости вероятность захвата электрона, n_1 – концентрация электронов в зоне проводимости в том случае, когда положение уровня Ферми на поверхности совпадает с положением уровня центра захвата ε_t . Тогда n_1 можно выразить соотношением:

$$n_1 = N_c \cdot e^{-\left[\frac{\varepsilon_t}{kT} \right]}, \quad (3)$$

где N_c – эффективная плотность состояний в зоне проводимости, равная:

$$N_c = \left[\frac{(2 \cdot \pi \cdot m^* \cdot k \cdot T)^{1,5}}{4\pi^3 \cdot h^3} \right]. \quad (4)$$

Здесь m^* – эффективная масса $\approx 10^{-27}$ г; $h = 2\pi\hbar$ – постоянная Планка.

Эффективные концентрации плотности состояний в зонах при комнатной температуре для n -типа кремния равны:

$$N_c = 2,5 \cdot 10^{19} \cdot \left(\left[\frac{m_e^*}{m} \right] \right)^{1,5} \text{ см}^{-3} = 2,5 \cdot 10^{19} \cdot 1,1^{1,5} = 2,89 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3},$$

а для p -типа кремния

$$N_A = 2,5 \cdot 10^{19} \cdot \left(\left[\frac{m_p^*}{m} \right] \right)^{1,5} \text{ см}^{-3} = 2,5 \cdot 10^{19} \cdot 0,57^{1,5} = 1,08 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3},$$

где $\left[\frac{m_e^*}{m} \right] = 1,1$ и $\left[\frac{m_p^*}{m} \right] = 0,57$.

Можно считать, что τ_s – сечение захвата не зависит от температуры, тогда начальный момент концентрации поверхностных центров и временную релаксационную зависимость можно определить из уравнения

$$\frac{dn_i}{dt} = -\alpha_1 \cdot n_1 \cdot N_i. \quad (5)$$

Изменения концентрации избыточных точечных дефектов запишем в виде

$$\frac{dn_i}{dt} = -\alpha_1 \cdot n_1 \cdot D_0 \cdot e^{-\frac{\varepsilon_i}{kT}}, \quad (6)$$

где, ε_i – энергия активации релаксационного процесса. С учетом величин Δn_i , получаемых из экспериментальных кинетических данных, концентрацию центра захвата вычислим из уравнения

$$\Delta n_i = \frac{dn_i}{dt} \cdot \tau_1 = N_i, \quad (7)$$

которое является общей формулой для отражения релаксационного процесса для точечных дефектов анионного типа (адсорбированных частиц):

$$\frac{dn_i}{dt} = -n_i \cdot \alpha_0 \cdot D_0 \cdot e^{-\frac{\varepsilon_B}{kT}} = \frac{n_i}{\tau_B}, \quad (8)$$

здесь ε_B – энергия активации адсорбированных частиц; D_0 – предэкспоненциальный множитель коэффициента диффузии адсорбированных частиц; α_0 – коэффициент, связанный с толщиной слоя, в котором существуют объемный заряд и электрическое поле, искривляющее энергетические зоны характеризующие Дебаевской длиной:

$$L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 \cdot k \cdot T}{e^2 \cdot n}}, \quad (9)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника; $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная; e – заряд электрона; n – концентрация примесей в полупроводнике.

С учетом уравнения (9)

$$\alpha_0 = -\frac{\pi^2}{L_D^2}. \quad (10)$$

Из уравнения (8) получаем соотношение

$$\frac{1}{\tau_B} = \frac{\pi^2}{L_D^2} \cdot D_{OB} \cdot e^{-\frac{\varepsilon_B}{kT}}. \quad (11)$$

Предэкспоненциальный множитель представим как

$$\frac{1}{\tau_{OB}} = \frac{\pi^2}{L_D^2} \cdot D_{OB} = \alpha_0 \cdot D_{OB}. \quad (12)$$

Подставляя (12) в уравнение (2), получаем соотношение:

$$\frac{1}{\tau_B} = \alpha_0 \cdot D_{OB} \cdot e^{-\frac{\varepsilon_B}{kT}} = \frac{1}{\tau_{OB}} \cdot e^{-\frac{\varepsilon_B}{kT}} \quad (13)$$

Из уравнения (13) следует выражение для коэффициента диффузии частиц:

$$D_B = D_{OB} \cdot e^{-\frac{\varepsilon_B}{kT}} \quad (14)$$

По тангенсу угла наклона определим энергию активации десорбирующихся частиц (ε_B).

Таким образом, приведенные выше данные показывают реальную картину, происходящую в процессе взаимодействия кислорода с поверхностью кремния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литовченко В.Г. //Журнал “Новое в жизни, науке, технике”, сер. “Физика поверхности и микроэлектроники”, М., 1990. С.1 – 63.
2. Арсламбеков А.В., Сафаров А.С. // Микроэлектроника. 1980. Т. 9. Вып.1. С. 54 – 60.
3. А.С. № 1702822. Способ получения тонких пленок оксида кремния. Сафаров А.С. / 1991. (ДСП).

Поступила 29.04.03

Summary

Interaction between oxygen and the surface of silicon is analyzed.

**ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННЫЕ
МЕТОДЫ МОДИФИКАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
(8 – 11 сентября 2003 года, Кострома, Россия)**

В начале сентября 2003 года в старинном русском городе Костроме состоялась Международная научно-практическая конференция «Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей», организованная Министерством образования Российской Федерации, Костромским государственным университетом, МАТИ (Российским государственным техническим университетом им. К.Э. Циолковского). Председатель Оргкомитета – профессор П.Н. Белкин. В программу конференции включены более 70 научных докладов из России, Украины, Беларуси, Молдовы, Турции.

Несмотря на существующую точку зрения об отставании исследователей стран СНГ в данной области (а именно их доклады в основном были представлены на конференции), следует отметить, что основные тенденции развития этой области науки и технологических приложений, связанных с использованием возможностей микро- и нанотехнологий, в той или иной степени представлены на конференции.

Это относится как к докладам пленарного заседания профессора А.И. Дикусара (Институт прикладной физики АН РМ, Молдова) «Локализация процессов электрохимической обработки и микрообработки», доктора химических наук С.А. Лилина (Ивановский химико-технологический университет, РФ) «Электрохимические методы получения нанопорошков», так и к докладам секционных заседаний А.В. Эпельфельда (МАТИ, РФ) «Микродуговое оксидирование как способ электролитно-плазменной обработки вентильных металлов и их сплавов», А.Г. Балянова и других (Уфимский авиационный институт, РФ) «Анодное поведение ультрамелкозернистого титана» и «Влияние маршрутов равноканального углового прессования на электрохимические свойства меди», А.В. Носкова (Институт химии растворов РАН, г. Иваново, РФ) «Использование методов фрактальной геометрии в электрохимических измерениях».

Новые результаты использования расчетных методов электрохимического формообразования (как аналитических, так и численных) были представлены в пленарном докладе профессора В.В. Клокова (Казанский госуниверситет, РФ) «Формообразование и гидродинамика при стационарной электрохимической обработке».

В докладе профессора И.В. Суминова (МАТИ, РФ) «Разработка и исследование комбинированных методов лазерной обработки» продемонстрированы широкие возможности этих методов обработки поверхности.

Некоторые доклады (С.Ю. Шадрина, А.Б. Белихова, И.Г. Дьякова – Костромской госуниверситет; В.В. Морозова, А.И. Григорьева и С.О. Ширяевой – Ярославский госуниверситет) были посвящены методам описания и технологическим приложениям анодного электролитного нагрева.

Следует выделить интересные доклады по работам, выполненным в Костромском технологическом университете (профессор А.И. Галанин и др.), Ивановском химико-технологическом университете и Институте химии растворов РАН (Е.П. Гришина, В.Л. Котов, О.И. Невский и др.), посвященные различным электрохимическим методам модифицирования поверхности с целью придания ей особых функциональных свойств.

Ряд докладов (А.В. Рыбалко, В.И. Симинела, О. Сахина – Институт новых технологий в г. Гебзе, Турция) посвящен теоретическим основам и практическим приложениям нового поколения оборудования для электроэрозионных методов модифицирования металлических поверхностей.

Значительная часть весьма интересных и информативно значимых сообщений представлена в виде стендовых докладов.

Небольшая по составу участников, но крайне полезная и важная конференция, прошедшая в старинном русском городе (к тому же хорошо организованная), продемонстрировала, что на карте СНГ появилась еще одна достаточно яркая точка, в которой активно развиваются и исследуются электрофизические и электрохимические методы обработки материалов.

Прозвучавшие при завершении конференции высказывания о возможности сделать эту конференцию постоянно действующей заслуживают самого серьезного внимания.

А.И. Дикусар