

ЖУРНАЛУ НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО – “ЭЛЕКТРОННАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ” – 55 лет

М. К. Болога

*Институт прикладной физики,
г. Кишинев, MD-2028, Молдова, e-mail: mbologa@phys.asm.md*



К 110-летию со дня рождения академика Б.Р. Лазаренко основателя журнала

Описан 55-летний путь, пройденный международным журналом «Электронная обработка материалов» (<http://eom.phys.asm.md>), охватывающий научные направления, касающиеся электрофизических и электрохимических методов обработки и синтеза материалов; использования электрических и магнитных полей и разрядов для обоснования новых и совершенствования существующих технологий; электрические процессы в технике и химии. Отражена информация о переиздании ЭОМ на английском языке под названием «Surface Engineering and Applied Electrochemistry» (<http://link.springer.com>), распространении его компанией Springer, включении в международные библиографические базы данных и индексировании журнала. Отражены аспекты редакторской и рецензионной деятельности, сотрудничества с авторами из многих стран.

Ключевые слова: создание и основные рубрики журнала, электрофизические и электрохимические технологии, английская версия, юбилейные издания, настоящее и будущее журнала

УДК 001

DOI: 10.5281/zenodo.3669595

Сознавая длительность и специфику пути, пройденного международным журналом «Электронная обработка материалов» (ЭОМ), нельзя не отметить значимость и дальновидность сравнительно давно принятых решений, предопределивших прошлое, настоящее и перспективное развитие Института прикладной физики (ИПФ). Предложенные и безупречно аргументированные учеными мирового уровня [1] направления исследований, определивших статус ИПФ [2], со временем становятся все более интересными научно и значимыми практически. Весной 9 марта 1964 г. началась биография института, ознаменовавшаяся вскоре решением о создании (2 апреля 1964 г.) журнала ЭОМ, которому предстояло быть и который стал единственным изданием, пропагандирующим научные и инновационные знания по новым применениям электричества, впоследствии подхваченные и другими известными периодическими изданиями.

Научный журнал ЭОМ, издаваемый ИПФ с 1965 г. (вкл. 1), публикует оригинальные и обзорные работы и статьи о текущих теоретических и прикладных вопросах и задачах в области электрофизических и электрохимических методов обработки материалов; физико-химических методов, синтеза макро-, микро- и наноматериалов, изучения их свойств;

использования электрических и магнитных полей для обоснования и создания новых и совершенствования существующих технологий; электрических процессов в технике и химии; электрических методов обработки биологических и пищевых объектов; электромагнитных полей в биосистемах. Журнал (<http://eom.phys.asm.md>) практически постоянно переиздавался в английском варианте: первоначально в Англии – «Applied Electrical Phenomena», а впоследствии в Соединенных Штатах под названием «Surface Engineering and Applied Electrochemistry» (SEAE) компанией Pleiades Publishing при участии Международной академической издательской компании Inc Nauka/Interperiodica и распространяется известной компанией Springer. Английская версия журнала доступна по адресу: <http://link.springer.com>. Журнал включен в международные библиографические базы данных и проиндексирован в базе данных Scopus. С 2017 г. SEAE включен в базу данных индекса цитирования нового источника (ESCI). Ежегодно выпускается по шесть номеров ЭОМ и SEAE.

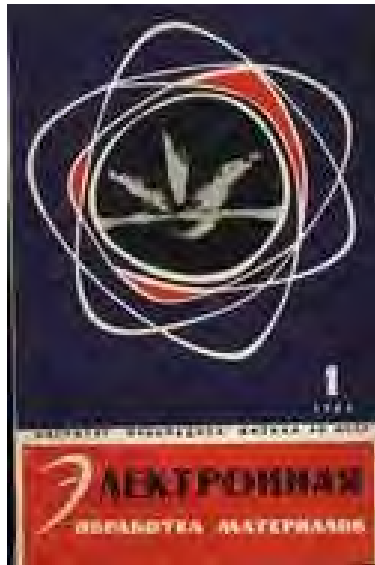
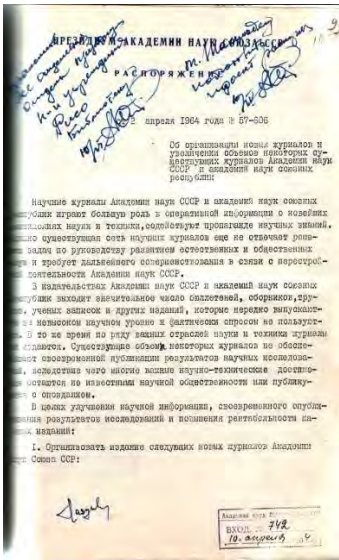
Прошли годы, академическая наука консолидировалась, периодические издания обогатили свой опыт и традиции. Находимся в пору 55-летия института, накануне 55-летия журнала «Электронная обработка материалов» и 110-летия со дня рождения основателя ИПФ и ЭОМ академика Б. Р. Лазаренко (вкл. 1), благодаря которому мы стали теми, кем являемся.

На этом этапе решил вспомнить и отдать дань памяти тем, которых уже нет среди нас, которые посвятили себя науке. Актуальность и оригинальность результатов и событий прошлого не должны забываться, поскольку для некоторых описанное в большей степени представляется историей, чем биографией института и журнала. И надеюсь, коллеги не раз будут возвращаться к истокам создания журнала. Написание статьи инициировано и тем, что ее автор был сооснователем журнала, участвовал в подготовительной работе по его созданию, выполнял обязанности заместителя главного редактора и главного редактора после ухода в мир вечности академика Бориса Лазаренко.

В памятные дни острее воспринимаешь и больше задумываешься о прошедших годах. Знаем, откуда мы пришли, и ничего не можем изменить в прошлом, можем только его констатировать. Ясно и понятно, на каком этапе находимся, – это время гармонизации и согласования оптимальных условий функционирования науки и инноваций. Стремимся к будущему, к новым результатам, которые, не исключено, могут быть и эксклюзивными. Основные, кульминационные моменты жизни, надеемся, принадлежат будущему, к которому стремимся, ожидаем и, несомненно, заслуживаем.

Мы превратили работу в призвание, которое для одних – мечта, а для нас – достижения и реальность. На пройденном пути накопили богатый опыт, и никогда не исчезало желание соответствовать требованиям времени. Необходимо разумно выполнять возложенные обязанности, быть и оставаться в гармонии с самим собой.

Времена не выбирают, в них рождаются и умирают. К сожалению, в 1979 году в расцвете лет ушел из жизни академик Борис Лазаренко. Его звезда освещает путь ИПФ, ЭОМ и их служителям (вкл. 2). Пусть прошлое останется в воспоминаниях, а настоящее мотивирует и обеспечивает многообещающее будущее. А магия электричества, с которой постоянно встречаются читатели журнала на его страницах, как и все, что является научным, инновационным и человеческим, пусть нас никогда не покидает. Мы были и остаемся при исполнении своих обязанностей, надеюсь, что деятельность журнала и института будет считаться приоритетной и поддерживаться. Надеемся на успехи, благодаря которым мы становимся более опытными и мудрыми, растем профессионально и духовно.



РОЖДЕНИЕ ЖУРНАЛА



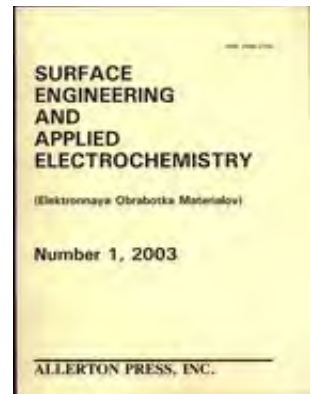
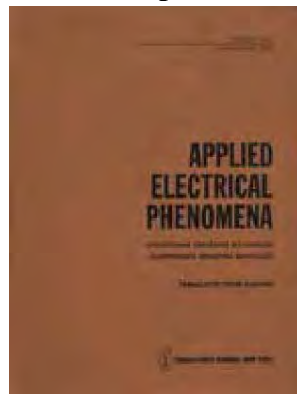
Академик
Борис
Лазаренко



Академик
Яким
Гросул



Конференция по электрической обработке материалов, 1967 год



На 55-летнем пройденном пути

Вкладыш 1



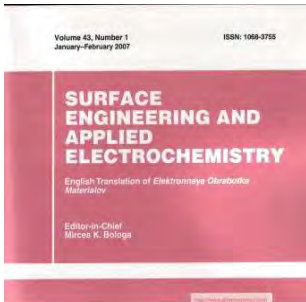
КОНФЕРЕНЦИЯ ПАМЯТИ ДИРЕКТОРА ИПФ, ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА ЖУРНАЛА



Номер посвящается 40-летию ИОНСКОМУ ЦЕНТРУ УПРАВЛЕНИЯ ФИЗИКОЙ АИМ



"ЭОМ": ТРАДИЦИИ, ДОСТИЖЕНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ



ALLERTON PRESS, INC.
a division of Pleiades Publishing
Distributed by Springer



АКАДЕМИЯ НАУК МОЛДОВЫ
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ
ЮБИЛЕЙНЫЙ ВЫПУСК



АКАДЕМИЯ НАУК МОЛДОВЫ
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ



АКАДЕМИЯ НАУК МОЛДОВЫ
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ



АКАДЕМИЯ НАУК МОЛДОВЫ
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ



АКАДЕМИЯ НАУК МОЛДОВЫ
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ

ЮБИЛЕЙНЫЕ ВЫПУСКИ ЖУРНАЛА

Вкладыш 2

Для редакционной коллегии, редакционного коллектива и авторов не только из института 55-я годовщина журнала – событие особой значимости. Пятидесятипятилетие журнала ЭОМ, его настоящее и будущее знаменательны еще и тем, что практически совпадают с 55-летием института. Благодаря журналу мы стали и являемся послами науки. Кроме того, журнал обеспечил и обеспечивает нашу значимость в мировом масштабе. Под стать институту ЭОМ. Сотрудники журнала ведут активную деятельность, имеют традиции, которые заслуживают высокой оценки.

Журнал был основан под руководством академика Бориса Лазаренко, первого директора ИПФ, при поддержке первого президента Академии наук академика Якима Гросула (вкл. 1). Мотивирование необходимости и важности журнала не было простым и поспешным.

Не менее хлопотным было комплектование первых изданий в основном работами, написанными и рецензированными практически только членами редколлегии. Это был напряженный период с поиском и приглашением авторов, выбором рецензентов, бесчисленными обсуждениями и анализами, которые, безусловно, оправдались.

Что касается развития деятельности журнала и его распространения ЭОМ, то созыв конференций (вкл. 1, в президиуме – члены редакционной коллегии) в значительной степени способствовал увеличению количества авторов и читателей. В первую очередь это способствовало расширению и углублению научных исследований, по отдельным направлениям которых институт стал координатором во всех республиках того времени. А возможность представлять 55 лет научной и редакционной деятельности – это большая ответственность и честь, так как все рождается и развивается благодаря желанию работать, призванию, самоотверженности, большой самоотдаче, убежденности в необходимости и магии научных исследований, редакционной и издательской деятельности. Каждое начало – это наследство всех поколений, это великий дар человеческого разума, вместе с результатами отражающий благородство и возможности развития. А значимость разработки новых технологий и будущее некоторых из них сложно представить. Исследования не имеют возраста, они проходят разные стадии развития и жизни. Не важно, где сделано (желательно у нас), кто сделал, а главное – что сделано. А после достигнутого результата видно – и кто.

К юбилею журнала причастен каждый представитель института. Мы росли вместе с авторами работ, а также с рецензентами. Это и есть жизнь многих представителей научного сообщества. Важно идти по непроторенным тропам прогресса и будущего. В то же время мы должны сочетать традиции, современность и инновации. Часто ожидаемые результаты появляются благодаря незабытым успешным исследованиям прошлого. К каждому успеху и исследователю, которому он принадлежит, должно быть особое внимание и отношение.

Учитывая совпадение сроков организации ИПФ и ЭОМ и один и тот же путь развития, постараюсь описать взаимозависимость и задачи института и журнала. Особенно в связи с тем, что прошел этот путь рука об руку с коллективом института и сотрудниками журнала, мы всегда были вместе при исполнении обязанностей в нашей семье и нашем научном доме – Институте прикладной физики.

Можем констатировать, что были подготовлены и выпущены 320 выпусков журнала, были прочитаны, исправлены, отредактированы и подготовлены к изданию десятки тысяч страниц. И это реальность, которая заслуживает быть отмеченной в ряду крупных событий. По сути, на протяжении всего периода своего существования журнал переводился и переиздавался на английском языке сначала в Англии, позже и в настоящее время – в США, что свидетельствует об убедительной важности и о перспективности электротехнологий и электрохимических процессов. Электричество полно очарования и красоты, оно выше

достижений и ожиданий. Поэтому следует постоянно поддерживать высокий уровень и дух исследований и инноваций на пути прогресса. Необходимо идти в ногу с требованиями и перспективами, оправдывая настоящее и тем более будущее. А предстоящие исследования и мероприятия по институту и журналу должны проводиться на основе имеющегося богатого опыта.

Научная деятельность – это лекарство, которое поддерживает сильные стороны и возможности исследователя. А новое поколение исследователей демонстрирует зрелость. Прошлое и будущее важны, но не будем забывать о Великом сейчас. Мы должны беречь и хранить институт и журнал как сокровище, обязаны выделять ясные мысли, которые несут свет и тепло, а также быть успешными и известными в научном мире. Быть исследователем – это большое достоинство, которое достигается желанным и интересным трудом на всем жизненном пути. ИФА – это наше достояние, это книга, которую следует читать и дополнять ежедневно.

Если знаем, чего желаем, то невозможно не найти то, что ищем. Ключом к успеху является симбиоз стараний молодых людей и усилий зрелых исследователей на долгом целенаправленном пути. Чтобы глубже понять жизнь, должны понять прошлое, оглянувшись назад, и двигаться дальше.

Мы благодарим авторов за красивые и содержательные работы, за поддержку журнала, который призван помочь им, конечно же, при соблюдении предусмотренных требований. С ЭОМ у авторов есть шанс превратить свои мечты и ожидания в реальность, стать известными в широких кругах научно-технической общественности. В то же время необходимо проявлять больше уверенности в себе, в своих возможностях и способностях.

Перелистывая страницы времени, с волнением вспоминаю этапы зарождения и становления ЭОМ. Приятно сознавать, что журнал развивается по восходящей траектории актуальности научных результатов и идей, научной ценности и практической значимости публикуемых материалов, которые все увереннее пересекают самые широкие параллели и меридианы. Он стал заметным явлением среди научных периодических изданий и за пятьдесят пять лет прошел путь от первых номеров, состоящих преимущественно из материалов, подготовленных членами редколлегии, до многочисленных публикаций ученых из разных стран. У журнала было исключительное начало, которое имело достойное продолжение, он отличается таким же настоящим, и мы надеемся на успешное будущее ЭОМ. На пройденном пути редколлегия ЭОМ адаптировалась и осталась восприимчива к растущим издательским требованиям, обеспечивала регламентированное издание и постоянное переиздание журнала в английской версии без каких-либо отклонений от предусмотренных сроков, издательских норм и правил; добилась вхождения журнала в мировые банки данных (см.: <http://www.eom.phys.asm.md>), присвоения импакт-фактора, распространения журнала в твердой копии и электронном варианте (<http://link.springer.com>). Практикуется широкий обмен журналами с ведущими библиотеками многих стран. Таким образом, ЭОМ объединяет специалистов разных стран и континентов, способствует осознанию и пропаганде безграничных возможностей мира электричества.

Стало традицией выпускать юбилейные издания журнала, которые отличаются, быть может, определенной эмоциональностью. Они возвращают нас к различным пройденным этапам. Вчитываясь в летопись ЭОМ и ИПФ, ощущаешь, что ностальгия дополняется новыми реалиями, подтверждающими многоликость и величие электричества, инициирующего историю, традиции, инновации. В обзорах, издаваемых, как правило, к юбилейным датам, анализируются публикуемые материалы, констатируется, что журнал – это единый

сплав методов получения и обработки материалов, электрических методов воздействия на традиционные и современные бурно развивающиеся технологические процессы.

Продолжается издание лицензионного журнала, распространяемого компанией Springer. Пропагандируя научные и инженерные достижения, журнал пользуется заслуженным признанием мирового научного сообщества, становится основным источником информации по новым применениям электричества. Надеемся, что, сотрудничая в международном масштабе, сделаем мир электричества и мир материаловедения доступнее и богаче.

Согласно лучшим традициям журнала, существенно расширяется круг зарубежных авторов, в редколлегию и группу рецензентов привлекаются известные ученые, в первую очередь из экономически и технологически развитых стран. ЭОМ – своеобразная и исключительная по своей важности коллекция технологий и инноваций, которую мы бережно храним и преумножаем. Журнал – один из значимых символов ИПФ и Академии наук, наша визитная карточка. Пройдя с «Электронной обработкой материалов» 55-летний путь, работая над каждым номером, испытываешь чувство ответственности и гордости за журнал, получивший международное признание, его мы воспринимаем как жемчужину института. ЭОМ – это панорама публикаций о новых применениях электричества, информация, которая неизменно становится более интересной, содержательной и привлекательной.

Благодаря журналу очевидно, что электричество – великий дар, его необходимо ценить, рационально использовать по прямому назначению без каких-либо трансформаций. ЭОМ – это парад электрических и электрофизических решений, это солидарность специалистов, связь поколений. И мы должны подпитывать журнал новшествами, продвигать его, чтобы ЭОМ стал более известным и признанным, стал моделью отражения и пропагандирования современных и перспективных знаний и инноваций.

Подымаясь по ступенькам исследований и инноваций, мы испытываем гордость за Институт прикладной физики и журнал «Электронная обработка материалов». Наши результаты становятся известными в мировом масштабе, и это традиции, проверенные временем. Накоплен 55-летний опыт работы в области электричества, и начинается очередной отсчет времени. Волшебная сила науки – это и воспоминания, и стремления к новым горизонтам. В ближайшем будущем следует обеспечить свежесть, оригинальность и значимость публикаций, высокий уровень рецензирования, искренность и уважительное отношение к авторам и читателям журнала, соблюдение издательских норм, успешное продвижение во впечатляющем и особо требовательном мире научных периодических изданий. Обязательство состоит в том, чтобы чувствовать то, что делаем, беречь и продвигать самые красивые представления об ЭОМ. Большие дела видны на расстоянии. Мы выросли с ИПФ и журналом ЭОМ, 55 лет – это период, в котором аккумулировались успехи, тревоги, надежды и одолевали мысли, где и какими увидим себя через 5, 10 и 15 лет. Наука – это сущность перспектив, неизведанных возможностей. Будет передовая наука, отраженная в престижных международных журналах, увидим и ожидаемое будущее. ЭОМ – это возможность объективно оценивать достижения и служить стимулом для продвижения в охватываемых журналом областях знаний, это подспорье для роста экономики.

Наш долг и обязанность – продвигать имидж ЭОМ, ИПФ и страны в мире, жить с надеждами, быть восприимчивыми к реальности. Мы начали с идей и надежд, сконцентрировались, у нас были амбициозные планы. И мы преуспели, у нас есть модель интеграции в международные периодические издания, есть моменты, чтобы насладиться успехами авторов. Возможно, не всегда были примером, но сделали все возможное, ориентируясь и преодолевая конкретные ситуации. Если допускали ошибку, ее исправляли.

Были некоторые недостатки, но понимали, что падать не страшно, главное – встать; поняли, что сотрудничество – это не смотреть глаза в глаза, а смотреть в одном и том же направлении. Мы оправдали доверие. Констатируем, что сильный человек-исследователь – это тот, кто может заложить прочный фундамент из кирпичей, которые бросили в него. Будущее принадлежит тем, кто верит в достижение своей мечты.

Творчество и талант являются определяющими факторами научного профессионализма, в нашем случае – через взаимосвязь ИПФ и ЭОМ. Привлекают внимание многие результаты ИПФ, собранные в журнале ЭОМ, и они совершенствуются благодаря модели продвижения интересных тематик, способных молодых специалистов, при помощи опытных исследователей. Понимаю, что не все одинаково талантливо, но быть вместе, достойно представлять институт – мы обязаны. Располагая технологиями и техническими средствами, мечтаем иметь возможности их продвигать и реализовывать. Любопытно увидеть последующие результаты, наметить новые цели и представить себе будущее. В то же время необходимо сохранять интеллигентность и доброту.

В случае необходимости придут молодые специалисты, которые могут оказаться лучше нас. Но не будем забывать о специфике нашей деятельности и о том, что молодые отличаются от старшего поколения, живут по-своему и со своими ожиданиями. Кроме того, оказывает отрицательное влияние на развитие науки утечка мозгов. Пусть одиночество и чужбина не найдут места среди нас. Мы счастливы быть дома. Живем в современном научном мире, являемся участниками и почитателями интересных результатов, инновационных технологий и практик. Связь с прошлым и возможность сохранения воспоминаний дают нам определенные привилегии. Каждое начало является следствием, каждое начало что-то завершает. Главное, быть креативными и курьезными, открытыми и добрыми, трудолюбивыми и мечтательными. Необходимо время, которое оправдает наши ожидания.

Многие мнения и предложения авторов, читателей, рецензентов и издателей заслуживают внимания. Без этого журнал не существовал бы. И мы стремимся быть командой, которая интенсивно работает, организовано, коллективно, оперативно и главным образом – со всей объективностью, обеспечивая доброжелательную рабочую атмосферу. Вера в то, что мы делаем и планируем на будущее, явится ключом к успеху. И было бы уместно упомянуть небольшую ретроспективу, знакомясь с юбилейным выпуском журнала [3], отражающую пройденный полувековой путь.

Подчеркиваю, что журнал стал изданием международного масштаба, его составление и подготовка к изданию происходят в Институте прикладной физики. Радуемся успехам молодых авторов, которые становятся служителями науки. Чувствую и себя привилегированным, потому что была обязанность и право постоянно заботиться о журнале с момента его создания, являясь частью редакционной коллегии, большой семьи авторов и рецензентов.

Выражаю свою признательность академиям наук того времени, поскольку они дали жизнь институту и журналу, поддерживали их на протяжении многих лет. И сегодня у нас огромный научный потенциал, богатый архив работ с технологиями и достижениями. И очень важно, что мы удачно начали свой путь – в подходящее время.

Пишу о традициях института и журнала исходя из собственного опыта – много лет занимал и должность директора. В лучшие, пиковые для института годы в нем трудилось более 1200 сотрудников. Обеспечивали замкнутый цикл – от фундаментальных и прикладных исследований до технологий и технических решений, реализованных и продаваемых. В институте было более 80 докторантов и постдокторантов, ежегодно – более

20 защит диссертаций, в пиковый год – 28. Это критерии, к которым можем стремиться. В то же время неоднократно спрашиваю себя: повторится ли это когда-нибудь снова?

Престиж научной деятельности характерен для всех времен, и творческое мышление всегда объединяло прошлое, настоящее и будущее, причем последнее приближается благодаря лавине новых идей, явлений и целей, продиктованных жизнью. Научная деятельность становится все более важной, ставит главные цели и ответственные задачи. При этом следует учитывать, что сумма идей – хорошо, но главное – это связь между ними.

Не всякая деятельность приносила и приносит успех, но без активности и результата нет. Мы освоили и совершенствовали стиль, приемы, искусство исследований и инноваций. Многие коллеги поставили и могут ставить автографы на материалы и технологии настоящего, но что важнее и принципиальнее – будущего. Современные и будущие исследователи преуспели и преуспевают в создании коллективов, научных школ и мостов профессиональной деятельности.

Оставшись единственным из состава первоначальной редколлегии, отмечу, что заботился о журнале в течение 55 лет. Вспоминая многолетнюю деятельность, констатирую, что опыт – это имя, которое каждый вкладывает не столько в свои успехи, сколько в свои ошибки. Сдавал экзамен в течение долгого времени, было нелегкое начало, когда написание работ и комплектование изданий обеспечивалось своими собственными статьями. Но это было начало, которое имело хорошее продолжение, оно непрерывно, журнал увеличивает свою ценность и обогащает свой опыт.

Прошедшие 55 лет, богатые работами и событиями, благодаря преимуществам электрофизических и электрохимических технологий, усердной редакционной работе, впечатляют. И надеюсь, что прошлое и настоящее будут сопровождаться успешным будущим. И если бы человеку было дано две жизни, посвятил бы их нашему институту и юбилейному журналу. Успокаивающим моментом является то, что мы предприняли все, что было в наших силах, и шли, я бы сказал успешно, по пути судьбы и новых технологий [4]. Мы живем этими событиями и нашими буднями, но самое главное – со многими возвышенными начинаниями и богатым опытом. ИПФ и ЭОМ – важные достижения, и мы должны продолжать искать общие цели и дела, чтобы не было безвыходных ситуаций.

Скучаю по навсегда ушедшим нашим коллегам – членам академии, редколлегии, оставивших яркий след в представляемых ими областях знаний. На протяжении многих лет они проводили исследования на передовых рубежах физических, технических и химических наук. Были руководителями академии, отделений, институтов, лабораторий, создателями научных школ. И не будет преувеличением сказать, что многие из них стали легендами академической и вузовской науки, символами своего времени. С годами все острее ощущается отсутствие бывших коллег. Все чаще стало казаться, что сейчас откроется дверь кабинета, в котором неизменно нахожусь со дня сдачи лабораторного корпуса в эксплуатацию (1968 г.), и войдет кто-нибудь из них – они это делали по доброй традиции на протяжении всего периода слаженной совместной работы и искреннего взаимопонимания. Это были «звезды» науки в первом поколении академии, которые, к счастью, остались в ярких и добрых наших воспоминаниях. Успокаиваю себя тем, что, пока о них помним, – они с нами. Будем чаще произносить их имена и вспоминать.

Особая благодарность – ветеранам, которые были рядом с нами и публиковали работы с уникальными результатами, являющимися частью важных достижений, выдающихся успехов и ориентиров. Стремясь к будущему, мы должны понять, каковы были цели, перспективы и условия для обеспечения растущих потребностей научной и редакционной

жизни. В этом контексте призываю практиковать сотрудничество и партнерство для обеспечения достойного международного распространения журнала. Он был хорошо продуман, мы остаемся с накопленными знаниями, а также с надеждой на более широкое сотрудничество с авторами, с актуальными и потенциальными рецензентами, которые не остаются равнодушными к ЭОМ.

Мы всецело поддерживаем переиздание журнала. И должны обеспечить достойное его распространение, чтобы быть ближе к успехам, соответствующим времени, и гордиться ими. Должны предугадывать требования времени, оправдывая приоритеты настоящего, и иметь более широкий и уверенный выход в издательский мир. Журнал – это фестиваль инноваций, красивых и бессмертных работ. В журнале мы находим технологии, которые заслуживают самой высокой оценки. Надеемся, что основные успехи принадлежат будущему, а ЭОМ является и будет являться источником вдохновения, платформой и дорогой в будущее.

С момента своего основания журнал был и остается частью моей души. Как и другие коллеги, редактировал, писал, рецензировал. Впечатляли многие работы, а те, что касались электроэрозионной обработки, были феноменальными. Думаю, достойно продолжаем дело основателя электроэрозионного метода и журнала академика Бориса Лазаренко. На протяжении этих лет предприняли все, что было возможно, для выполнения растущих требований научной и редакционной жизни. Спасибо всей команде! Таким образом, ЭОМ – журнал настоящего и будущего – выжил, активизирует свою деятельность и выполняет свой долг. Давайте чаще будем открывать его и вчитываться в статьи, посвященные нашей работе, жизни коллег, биографии ИПФ.

Читателю должны дать то, чего он ожидает, а ЭОМ можно сравнить с цветущим и плодоносящим садом, которым можно восхищаться.

Работы проходят через фильтр рецензентов. ЭОМ привнес и практикует юбилейные публикации и издания, в том числе: 60-летие электроэрозионного метода обработки (2003, № 2), 40-летие Института прикладной физики (2004, № 2), Всемирный год физики (2005, № 3), 90-летие (2000, № 5) и 100-летие академика Бориса Лазаренко (2010, № 1–6), 60-летие (2006, № 3), 65-летие (2011, № 4) и 70-летие (2016, № 3) академической науки в Республике Молдова, 100-летие академика Якима Гросула – первого президента Академии наук Молдовы (2012, № 5), 50-летие (2013, № 7) и 55-летие ИПФ (2019, № 1), 50-летие (2015, № 1) и 55-летие журнала ЭОМ (2020, № 1).

Мы работали, мы добросовестно выполняли свой долг. Институт и журнал вдохновляют современные исследования и разработки, создают и консолидируют сотрудничество, которое прошло испытание временем. Уже живем в другом столетии. Произошли разные и многочисленные изменения; в то же время есть воспоминания и усилия, направленные на то, чтобы соответствовать времени. И было бы хорошо оставаться противниками малых фактов и сторонниками значимых, жизненно важных событий.

Исследуем, пишем, редактируем, рецензируем, составляем выпуски журнала, в том числе юбилейные, – прекрасная традиция. Получаем и рассматриваем статьи, всегда находясь на виду научного сообщества.

ЭОМ был и остается в центре нашего внимания. И, приближаясь к 55-летию, пожелаем, чтобы авторы радовали читателей самыми интересными работами и достижениями. Приветствуем и благодарим их за профессионализм, за то, что они всегда с ЭОМ. Пишу об этом с мыслями о хороших работах, в частности обзорных, надеюсь, что будет много новых результатов, специфичных для настоящего времени, и перспектив, что будут достойные публикации и выпуски журнала.

У нас есть талантливые авторы. ЭОМ – легенда, особенно для тех, кто готовит, комплектует и продвигает каждый номер журнала, который впоследствии становится достоянием научного и инженерного сообщества. Прошлое изменить нельзя, будущего не избежать, подведем итоги 55 лет, ознаменовавшихся работами и событиями, которые дополнят череду наших успехов.

Благодаря качеству публикаций журнал знают и ценят на международном уровне, что свидетельствует о заслуженном авторитете ЭОМ. Выражаем наше уважение и удовлетворение за накопленные знания и опыт. Авторы успешно выполняют свой долг, они являются частью научного сообщества – выросли благодаря напряженной работе, а коллектив ЭОМ редакционным и издательским трудом продвигает научную жизнь и имидж страны. Заслуживают особого внимания известные авторы из разных стран. Их публикации становятся частью общего успеха, технологий и техник.

Профессиональные диалоги, конференции исследователей радуют коллективными обсуждениями, выбором лучших работ, ориентацией на перспективные области, претворением в жизнь новых идей, демонстрацией нацеленных на будущее исследований, сочетанием классических, современных и перспективных подходов. Эта ситуация мобилизует на новые исследования, результаты и оригинальные публикации, благодаря которым читатель мог бы насладиться новыми технологиями и инновациями, сотрудничеством опытных исследователей и перспективных молодых людей. Демонстрирует, что наука не знает старости, что семена, брошенные в приоритетных областях, дают богатые и качественные урожаи. И для обеспечения профессионализма необходимо копать глубоко, чтобы не ориентироваться на эфемерные моменты и успехи.

Журнал необходимо привести в соответствие с международными требованиями уровня и распространения, с выполнением строгих обязательств. ЭОМ все более настойчиво выступает в роли «подиума» международной, исследовательской и инженерной модели. Заверяем, что результаты исследований и инноваций никогда не исчезнут со страниц ЭОМ. Научная деятельность должна быть совместима с желанием и возможностью, когда делаете то, что можете и что нравится, в строгом соответствии с утвержденными программами и стратегиями. Редактирование и рецензирование – болезненные процессы, но необходимые и полезные. На протяжении многих лет нас окружают и воодушевляют добросовестные коллеги и работники, которые считают, что наука – это жизнь, благородная деятельность и выполнение обязательств по продвижению результатов в престижном журнале ЭОМ.

Прошло 55 лет, наполненных плодотворной научной деятельностью, ознаменовавшихся важными, интересными фундаментальными и прикладными результатами, современными и перспективными технологиями и техническими решениями. Удовлетворены прошедшим периодом и мобилизуем себя для решения предстоящих проблем. Необходимо оставаться сплоченным коллективом во всех делах и ожиданиях. Следует предпринимать все возможное, чтобы иметь интересные результаты и публикации.

Наука и инновации – это тандем, ожидания и активизация деятельности с любовью и доверием во имя будущего и широкой видимости ИПФ и ЭОМ. Мы гордимся вниманием и участием в нашей деятельности авторов из многих стран. С годами становится ясно, что не все из нас могут быть талантливыми, но быть на более высокой ступени, чем были вчера, мы обязаны. Кроме того, часто приходится делать не то, что желаем, а то, что диктует ситуация. Любая область деятельности должна развиваться, и мы должны быть на волне настоящего, потому что это начало будущего. Никто не знает нужды и потребности лучше нас самих. Поэтому если будем вместе, то продолжатся традиции, которые заслуживают поощрения и

развития. Имея богатый опыт, мы должны двигаться в будущее. Мы должны делать все возможное, чтобы соответствовать растущим требованиям издательской деятельности. Необходимо усвоить полезные уроки, чтобы определить ориентиры, к которым можем стремиться. В большом доме ИПФ и АНМ все еще есть место для достижений, на которые следует ориентироваться. Будущее непредсказуемо. Оценка результатов, определение основных проблем и интенсивность работы остаются основными факторами, влияющими на нашу деятельность. Чтобы достичь максимальных результатов, необходимы сотрудничество, партнерство, готовность к новым вызовам. Надеемся, что запланированные и хорошо продуманные реформы предоставят возможности для продвижения, углубления исследований и реализации их результатов.

Что касается ЭОМ. Мы должны достичь совершенства, делать то и так, что и как делают известные, признанные журналы, чтобы быть в ряду с наиболее престижными из них. Вполне ожидаемо, что в условиях сильной издательской конкуренции следствием хорошего сотрудничества является ежегодное увеличение объема журнала SEAE. Подчеркиваю, что ЭОМ полностью переиздается в предложенном нами формате, безусловно, в соответствии с договорными правилами и положениями, установленными международными отношениями, с акцентом на качество и пунктуальность. Ситуация беспокоит, иницируя желание и волю постоянно расти, становиться более интересными и эффективными. Надеемся увидеть себя в современном издательском мире, отличающемся растущими требованиями и успехами, которых нелегко достичь, постоянным ростом запросов во всех аспектах деятельности, с более высокой отдачей ЭОМ и ИПФ.

Стремимся перенимать, использовать опыт наиболее успешных и признанных специалистов, понимаем необходимость быть корректными на всех этапах продвижения работ, пунктуальными во взаимодействии с авторами, рецензентами, чтобы заслужить высокую оценку журнала. Благодаря добросовестной работе, энтузиазму, преданности коллег интересам авторов, объективности рецензентов, ЭОМ имеет заслуженное настоящее и, надеемся, станет журналом будущего.

Годы уходят, мы прогрессируем, адаптируемся к требованиям, становимся более пунктуальными и эффективными в преодолении препятствий. Было бы хорошо, если бы каждый и все вместе осознали и оценили значимость журнала, в том числе с той точки зрения, что он представляет собой нормативный критерий существования и деятельности научного учреждения. Глубокое понимание ситуации необходимо, чтобы преодолеть все неопределенности. ЭОМ – это явление, возможность выйти в мир, стать известными, наладить сотрудничество, участвовать в обмене опытом, объединять команды, иметь долгожданные и высоко оцененные проекты.

Журнал входит в историю. Эта внушительная часть нашей жизни была большим подарком судьбы с ценными уроками научного и редакционного профессионализма. На таких юбилейных мероприятиях обязаны размышлять о том, что сделали и что будем делать в будущем. Мы на границе, когда завершается один период, начатый 55 лет назад, а другой только начинается. Мы сделали наши профессии призванием, включая редакционно-издательскую работу. Направления деятельности института и журнала являются областями безграничных возможностей, обеспечивающими идеальную гармонию между фундаментальными, технологическими и инженерными науками.

Уважение традиций – черта не только научного сообщества. Великое благо находиться в волшебном, удивительном мире электричества и электротехнологий, которые имеют огромный потенциал. Наука есть и будет сокровищем будущего. Многие из нас накопили

большой жизненный опыт, институт активизирует свою деятельность, журнал регулярно издается. А развитие науки означает инвестирование в будущее. Сложно представить себе новые технологии и бурное развитие некоторых из них. ИПФ и ЭОМ были, есть и будут. В институте и журнале современность и традиции находятся в тандеме.

Научно-редакционная работа не имеет перерыва. На юбилейных перепутьях рождаются новые идеи и возможности для диверсификации и углубления исследований и достижений, которые вдохновляют и вселяют надежду на благоприятные времена и условия. Пожелаем себе удачу впредь. Никогда не поздно стать тем, кем ты всегда хотел стать. Есть проблемы, в решении которых мы не имеем права делать ошибки. Сегодня тем более, потому что наука – высшая ценность. Решения по науке и инновациям недостаточно принимать, их нужно чувствовать.

Доверие, которое было оказано нам, должно быть оправдано, и оно мобилизует. Обязаны быть вместе в нашей семье ИПФ, поддерживать фундаментальные и прикладные исследования, мосты сотрудничества, которые требуют особого внимания и отношения. В этих действиях отсутствуют второстепенные элементы, условия становятся более строгими. И если хотим, чтобы жизнь принесла профессиональные и духовные успехи, мы должны быть готовы к напряженной работе. Необходимо сосредоточиться на весомых результатах и высокой отдаче в минимальные сроки. Другими словами, если возможны ошибки, то надо их предугадывать и исправлять. А хорошие дела поведут нас в успешное и светлое будущее. Оставаясь верными профессионализму и традициям, сделаем все, чтобы, когда будут говорить об электротехнологиях, все знали, что речь идет об Институте прикладной физики и журнале «Электронная обработка материалов».

Успешного и светлого будущего!

Искренне благодарю Людмилу Николаевну Морозову – в прошлом сотрудницу редакции за редактирование статьи.

**Главный редактор
академик М. Болога**

ЛИТЕРАТУРА

1. Болога М.К. Исследования и инновации в Институте прикладной физики. Эволюция и достижения. *ЭОМ*. 2006, **42**(3), 4–91.
2. Academia de Științe a Republicii Moldova – 50 ani. Chișinău. Știința, 1996. 178 p.
3. Болога М.К. К 50-летию Института прикладной физики Академии наук Молдовы. *ЭОМ*. 2013, **49**(7), 1–314.
4. Болога М.К. Институту прикладной физики 55 лет. *ЭОМ*. 2019, **55**(1), 1–11.

Summary

The article describes 55-year activity of the international Journal “Elektronnaya obrabotka materialov” (EOM) (<http://eom.phys.asm.md>) which covers scientific areas related to electrophysical and electrochemical methods of processing and synthesis of materials; application of electric and magnetic fields and discharges to justify new and improve existing technologies; electrical processes in engineering and chemistry. Information on the republishing of EOM in English under the title “Surface Engineering and Applied Electrochemistry” (<http://link.springer.com>), its distribution by Springer, inclusion in international bibliographic databases and indexing of the Journal is presented. The aspects of editorial and reviewing activities, cooperation with authors from many countries are reflected.

Keywords: creation and main sections of the journal, electrophysical and electrochemical technologies, English version, anniversary editions, present and future of the journal

МЕСТО ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ МЕР ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

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

Электроэрозионное легирование металлорежущих инструментов способно резко повысить их износостойкость при условии, что система станок – приспособление – заготовка – инструмент находится в состоянии, обеспечивающем оптимальные технологические параметры процесса резания, а физико-механические свойства и рельеф наносимого покрытия отвечают условиям взаимодействия рабочих поверхностей инструмента с заготовкой.

Режущий клин инструмента в процессе резания испытывает переменное давление обрабатываемого металла и тепловое воздействие. При округлении режущей кромки по $\varepsilon > 0$, что реализуется в реальных условиях наиболее часто, давление достигает наибольшей величины на округлении, где наблюдается граница раздела потоков деформируемого металла. Это легко установить, построив соответствующее поле напряжений и план скоростей течения металла в очаге стружкообразования [1]. На начальной границе af очага стружкообразования (рис. 1) интенсивность пластической деформации металла получает наибольшее приращение

$$\Delta\varepsilon = 2 / \sin 2\chi.$$

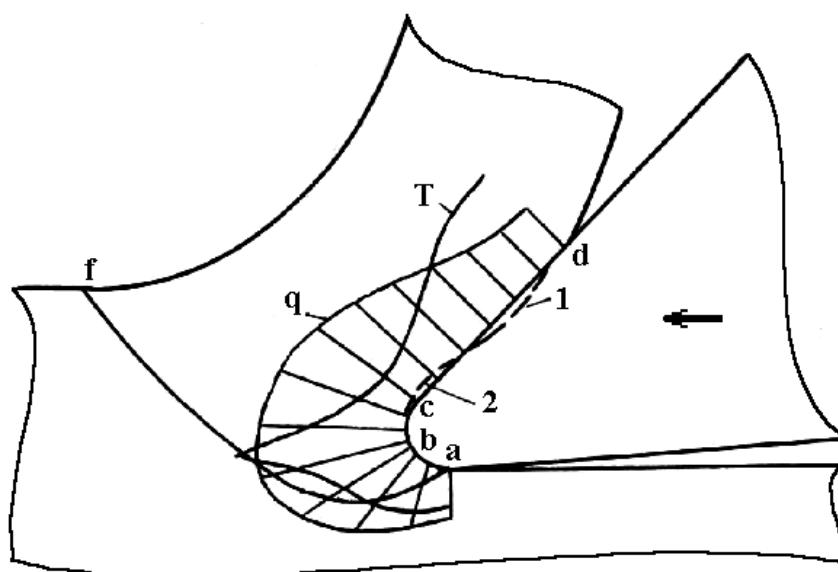


Рис. 1. Характер распределения давления q и температуры T на рабочих поверхностях режущего клина инструмента.

Следствием интенсивной пластической деформации в узкой прослойке является приращение здесь температуры, определяемое по формуле [2]

$$\Delta T = k\Delta\varepsilon / c\rho,$$

где χ – угол между касательной к начальной границе очага стружкообразования в точке a и направлением резания; k – сопротивление обрабатываемого металла сдвигу, Па; c – его удельная теплоемкость, Дж/(кгК); ρ – плотность металла, кг/м³; ΔT – приращение температуры, К.

Экспериментально установлены узкие прослойки на начальной границе очага стружкообразования (линия *af*), где при резании стали температура достигала 900–1100⁰С. Тепло отводится смежными слоями с более низкой температурой, что ведет к структурным изменениям и упрочнению металла, а затем, по мере перемещения стружки по передней грани инструмента, к некоторому выравниванию температуры в объеме стружки. На участке *bc* передней грани инструмента в результате термических превращений и диффузионных процессов формируется тонкий белый слой сложного химического состава и повышенной твердости, происходит образование нароста (2). В зоне максимальной температуры *cd* наблюдаются деформации сдвига и диффузионные процессы при высокой скорости течения металла, что приводит к формированию характерной лунки (1). Кромка инструмента (по мере затупления превращается в зону *abc*) работает в тяжелых условиях, что ведет к ее интенсивному адгезионному и абразивному изнашиванию.

Вдоль задней поверхности формируется полоска износа, по мере роста которой увеличиваются температура реза и интенсивность изнашивания.

Адгезионный износ, сопровождающийся возникновением с разрывом адгезионных связей между контактирующими металлами, определяется высокими локальными температурами. Вырыв из зоны схватывания мелких частиц, приобретающих высокую твердость вследствие фазовых превращений, ускоряет абразивный износ поверхности инструмента. Интенсивность этих процессов зависит от температуры, градиента температур, способности материалов контактирующих тел аккумулировать тепло (геометрическая форма микровыступов, теплофизические свойства материалов), от условий теплоотдачи.

Износостойкость инструмента, таким образом, зависит от сложного взаимодействия контактных поверхностей при используемых режимах обработки.

За основу повышения износостойкости металлорежущих инструментов выбрано обеспечение оптимальных технологических параметров процесса резания, формирование на рабочих поверхностях слоев с физико-механическими свойствами и рельефом, соответствующими условиям на месте контакта инструмента и заготовки, создание условий для самозатачивания главных режущих кромок. Для формирования таких слоев наиболее удобно использовать электроэрозионное легирование.

Покрытия наносили на установке Элитрон-22. Материал электродов выбирали в зависимости от химического состава, состояния и коэффициента температуропроводности материала в зоне резания. Обработывали заготовки из легированных сталей (16ХНЗМА и др.), углеродистых (стали 20, 45 и др.). Режимы легирования назначали из условия достаточной прочности поверхностного слоя и высокой режущей способности. Поскольку качество обработки определяется состоянием отдельных поверхностей клина, различных в зависимости от вида технологической операции, покрытия наносили избирательно. На рис. 2 приведены схемы работы некоторых металлорежущих инструментов, используемых в условиях Опытного завода Института прикладной физики АН Республики Молдова. В таблице указаны зоны и приведены режимы легирования, обеспечивающие достаточную прочность поверхностного слоя, условия для реализации эффекта самозатачивания режущего клина и в результате – высокую работоспособность инструмента.

Упрочняемые поверхности и параметры легирования

Инструмент и упрочняемые поверхности	Количество наносимых слоев и режимы	Толщина покрытия, мм	Шероховатость покрытия <i>Rz</i> , мкм
Отрезной резец (вязкий материал заготовки): боковые, задняя	2, IV+II <i>I</i> = 2,8; 1,3 А	0,08–0,09	15
Токарный резец: передняя	1, IV <i>I</i> = 2,8 А	0,06	25
Сверло спиральное (черновое сверление): задняя винтовой линии, передняя торцовой части	2, III+II <i>I</i> = 1,8; 1,3 А	0,06–0,07	15
Долбежный резец: передняя	2, III+II <i>I</i> = 1,8; 1,3 А	0,06–0,07	15

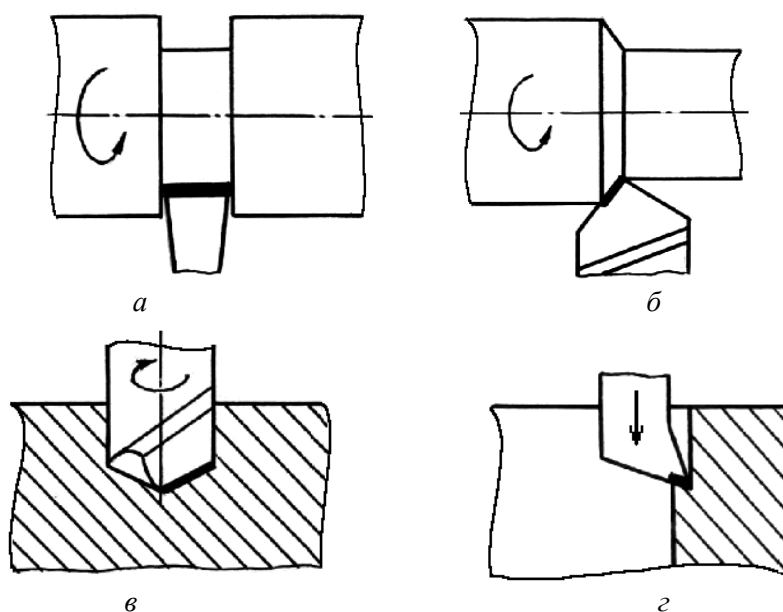


Рис. 2. Схемы работы режущих инструментов:
а – отрезной резец; *б* – токарный резец; *в* – спиральное сверло; *г* – долбежный резец.

Двухслойные покрытия наносили в следующей последовательности: при грубых режимах первый слой повышенной толщины и мягких режимах – второй слой, снижавший высоту неровностей покрытия. Одновременно при нанесении второго слоя добивались резкого отличия его теплопроводности от теплопроводности обрабатываемого металла, что вело к уменьшению адгезионного изнашивания. К примеру, комбинированное покрытие электродами из твердого сплава Т15К6, а затем хрома обеспечивало эффективную теплоизоляцию от локальных источников тепловыделения и повышение сопротивления изнашиванию поверхностного слоя инструмента. Использование таких покрытий обеспечивало устойчивое повышение сроков службы перечисленных в таблице и других режущих инструментов в два и более раз.

Выводы

1. Для повышения износостойкости металлорежущего инструмента надо привести систему станок – приспособление – заготовка – инструмент в равновесие для обеспечения оптимальных технологических параметров процесса резания.
2. На рабочие поверхности режущего клина инструмента следует нанести избирательно износостойкие покрытия, обеспечивающие формирование слоев с физико-механическими свойствами и рельефом, соответствующим условиям на месте контакта инструмента и заготовки, создание условий для самозатачивания главных режущих кромок. Этим целям наиболее полно отвечает электроэрозионное легирование.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Голдыш Е.В., Тимощенко В.А.* Повышение ресурса режущих инструментов нанесением многослойных износостойких покрытий. Кишинев, 1996. (Обзор. информ/МолдНИИТЭИ).
2. *Тимощенко В.А., Голдыш Е.В.* Влияние условий резания и локальных свойств обрабатываемого металла на вид стружки // СТИН. 1998. № 11. С. 15–17.

Поступила 17.12.99

Summary

Increase stability metalcutting of the tool electroerosive alloying ensured by reduction of a system the machine tool – adaptation – tool – bar in an equilibrium, that the optimum technological parameters of process, and plotting selectively of abrasive resistant covers with physics-mechanical properties and contour adequate (answering) conditions of interaction of working surfaces of a cutting wedge of the tool with bar were ensured.

СВОЙСТВА МАКРООДНОРОДНЫХ КЭП С МАТРИЦЕЙ ИЗ НИКЕЛЯ, ПОЛУЧЕННЫХ В РЕЖИМАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ТОКА

*Казанский государственный медицинский университет,
пр. Серова, д.4, г. Казань, 420012, Россия*

Композиционные электрохимические покрытия (КЭП) с матрицей из никеля наиболее изучены в связи с легкостью их формирования. Это объясняется хорошей адсорбируемостью ионов никеля на частицах второй фазы и высоким сродством с ним металла матрицы [1].

Однако остается нерешенным ряд вопросов: необходимость достижения однородности свойств по поверхности и объему КЭП, исключения пор и упрочнения связи металл – дисперсные частицы (ДЧ), повышение сцепляемости с основой и проблемы коррозии. Попытки решения этих вопросов сводились к использованию монодисперсных порошков [1], что экономически нецелесообразно, либо термообработке [2], что помимо усложнения техпроцесса приводит к разупрочнению металла матрицы.

Использование режимов периодического тока (ПТ) в практике гальваностегии и нанесения КЭП [3] показывает возможность управления структурой металла, ее состоянием и микротопографией, сцепляемостью с основой и другими свойствами. В конечном счете все это позволяет получать функциональные КЭП [4]. Нанесение КЭП проводилось из электролита Уоттса, в качестве частиц второй фазы использовались Al_2O_3 , ZrO_2 , ZrC , концентрация их в растворе составляла 40 г/л. Использовался ранее описанный источник ПТ [5], отношение тока максимума катодной ветви к току максимума анодной $\beta = I_m^K / I_m^A$ варьировалось от 0,5 до 5.

Повышение прочности сцепления КЭП с подложкой (рис. 1) с уменьшением β связано с образованием более устойчивых кристаллов никеля в начальной стадии электрокристаллизации и формированием мелкозернистого осадка. Эти данные согласуются с результатами роста начальных слоев никеля на соответствующем монокристаллическом электроде. Увеличение соотношения I_m^K / I_m^A приводит к уменьшению размеров областей когерентного рассеяния (возрастает протяженность межзернистых границ) [5] и увеличению предела прочности на растяжение (рис. 1).

Повышение микротвердости покрытий с увеличением амплитуды анодной составляющей объясняется мелкозернистостью осадка металла матрицы, обусловленной как режимами электролиза, так и внедрением высокодисперсных частиц (рис. 2). Выделяясь на катоде в виде самостоятельной фазы, частицы ингибируют рост кристаллов и могут привести к блокированию некоторой доли поверхности. Осадок никеля при включении ДЧ становится более мелкокристаллическим в результате увеличения центров кристаллизации за счет примесных дефектов. Повышение амплитуды анодной составляющей тока уменьшает шероховатость (рис. 2), что можно объяснить также мелкозернистостью осадка матрицы и включением высокодисперсных частиц (табл. 1).

Таким образом, из анализа физических свойств КЭП, полученных при нестационарных режимах электролиза, следует, что основным параметром, определяющим качество покрытий, является соотношение количества электричества, протекающего в катодном и анодном направлении в течение периода. Варьирование параметров ПТ при получении КЭП с матрицей из никеля позволило выявить возможность фракционного отбора и внедрения в матрицу близких по размеру ДЧ. Соответствие размеров кристаллов электрокристаллизуемого металла с размерами включаемых частиц при варьировании β наблюдалось ранее [6].

Особенности формирования КЭП с матрицей из никеля являются следствием закономерных изменений условий электрокристаллизации металла-матрицы. Электроосаждение КЭП при постоянном токе протекает с заметной агломерацией ДЧ на поверхности катода. Учитывая, что согласно данным, приводимым в [1], ионы никеля значительно адсорбируются на поверхности

частиц и являются “собственно стимуляторами” соосаждения, отмеченный эффект отражает специфику стадий удерживания и заравнивания ДЧ. В действительности количество и размеры включений частиц в объеме значительно меньше, чем на поверхности катода [6], что свидетельствует об отторжении более крупных частиц или агломератов растущим осадком никеля.

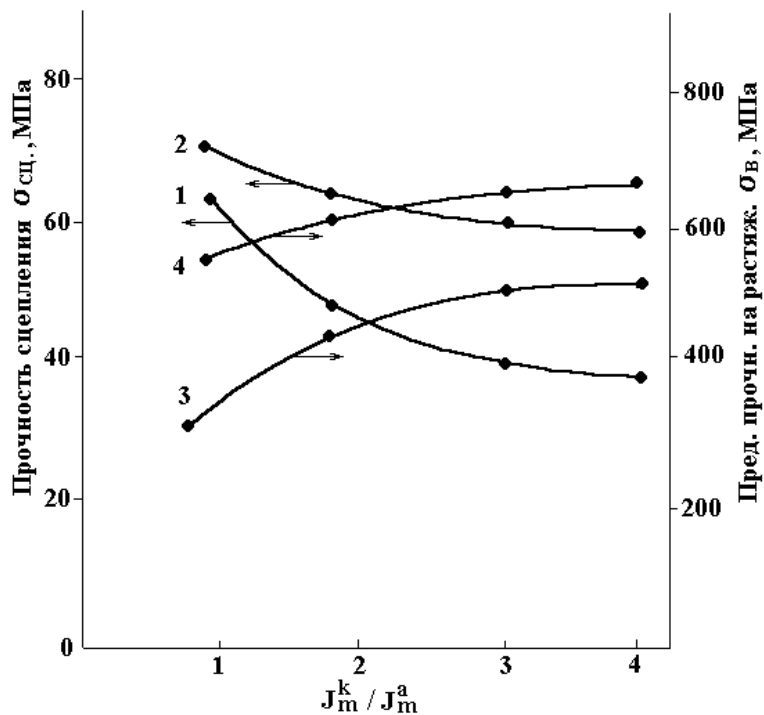


Рис. 1. Влияние параметра β на прочность сцепления с основой и предел прочности на растяжение КЭП: 1,3 – Ni-ZrC; 2,4 – Al₂O₃.

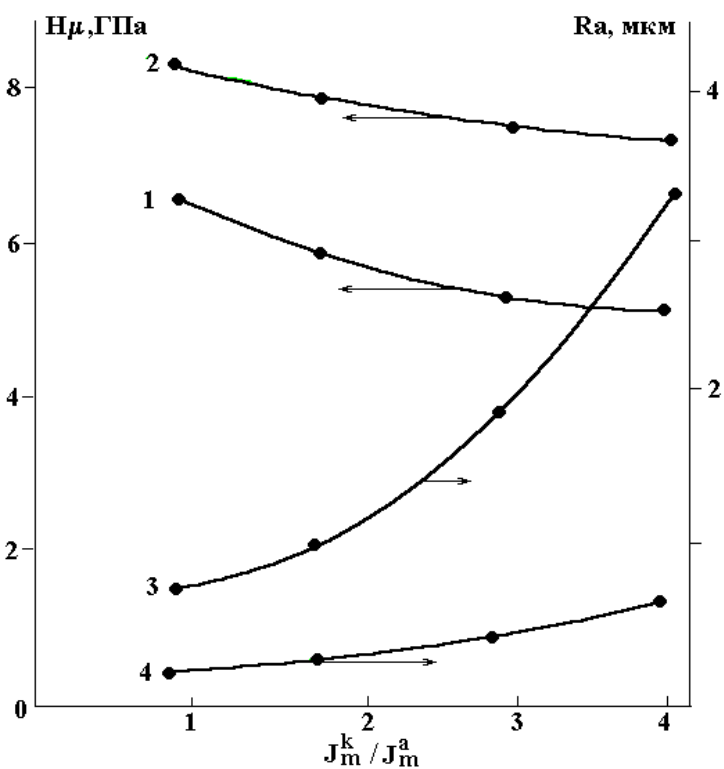


Рис. 2. Влияние параметра β на микротвердость и шероховатость КЭП: 1,3 – Ni-ZrC; 2,4 – Al₂O₃.

Таблица 1. Влияние режимов электролиза на состав и износостойкость КЭП ($i_{cp} = 4 \text{ A/дм}^2$, $h = 200 \text{ мкм}$, $c = 40 \text{ г/л}$)

№	КЭП	Начальная фракция ДЧ, мкм	Основная фракция ДЧ в КЭП, мкм			Износ, мг		
			$\beta = 1,5$	$\beta = 2,5$	$\beta = \infty$	$\beta = 1,5$	$\beta = 2,5$	$\beta = \infty$
1	Ni	–	–	–	–	19,1	20,2	24,3
2	Ni-Al ₂ O ₃	0,5–0,7	3,0–4,0	4,5–5,0	6–7	17,5	18,3	23,1
3	Ni-ZrO ₂	0,5–5,0	2,0–3,0	3,0–3,5	4,0–4,5	17,8	18,1	19,5
4	Ni-ZrC	0,5–3,0	0,5–1,5	1,5–2,0	2,0–3,0	16,5	17,2	19,0

Не исключая возможности механического захвата ДЧ, находящихся в состоянии длительного контакта с металлом за счет адсорбционно-индуцированного сдвига их заряда в сторону положительных значений, сужение размеров включений (табл. 1) указывает на тенденцию их соответствия рельефу и морфологии поверхности осадка. Увеличение анодной составляющей при постоянстве средней величины плотности тока последовательно повышает степень равномерности распределения частиц второй фазы по поверхности и объему покрытия с уменьшением размеров включаемых ДЧ. Последнее позволяет получать макрооднородные по составу КЭП, определяющие свойства покрытий. В частности, наблюдается повышение их износостойкости (табл. 1) и коррозионной стойкости (табл. 2).

Таблица 2. Влияние режимов электролиза на коррозионную стойкость покрытий никелем и его КЭП ($i_{cp} = 4 \text{ A/дм}^2$, $c = 40 \text{ г/л}$) в 10% растворе H₂SO₄, $t = 60^\circ\text{C}$

№	Покрытие	Скорость коррозии, г/м ² ·ч		
		$\beta = \infty$	$\beta = 2,5$	$\beta = 1,5$
1	Ni	8,5	7,8	6,5
2	Ni-Al ₂ O ₃	7,8	7,0	6,0
3	Ni-ZrO ₂	7,3	6,5	5,5
4	Ni-ZrC	7,0	6,0	5,7

Таблица 3. Содержание ДЧ и микротвердость КЭП с матрицей из никеля ($i_{cp} = 4 \text{ A/дм}^2$, $c = 40 \text{ г/л}$, $\tau = 1 \text{ час}$)

№	Покрытие	a_m , %		Микротвердость, ГПа	
		$\beta = \infty$	$\beta = 2,5$	$\beta = \infty$	$\beta = 2,5$
1	Ni-Al ₂ O ₃	5,0–6,0	5,0–6,0	4,0–4,5	5,0–6,0
2	Ni-ZrO ₂	5,5	5,0–6,0	6,0–6,2	6,5–7,0
3	Ni-ZrC	4,0–4,5	4,0–5,0	6,2–6,5	7,0–7,5

Повышение коррозионной стойкости, по-видимому, связано, с одной стороны, с изменением структуры никелевой матрицы в режимах ПТ, с другой, – с экранированием поверхности матрицы частицами второй фазы.

На основе поляризационных, структурных и других исследований с учетом физико-механических свойств конкретных КЭП (табл. 3) предложен режим периодического тока $\beta = 2,3–2,5$ для нанесения покрытий. Промышленные испытания изделий с КЭП никеля подтвердили обоснованность этого выбора с точки зрения эксплуатационных свойств покрытий.

Большинство КЭП с матрицей из никеля наносились на стальные изделия без подслоя меди, что требовало исключения пор в осадках и получения покрытий с однородной кристаллической структурой матрицы при равномерном объемном распределении в ней соосажденных частиц. В основном оно определялось режимами электролиза и природой ДЧ. Использование различных КЭП на основе никеля позволило в 2–3 раза повысить срок службы технологических ножей (экструдера), в 1,5–2 раза – удерживающих свойства медицинских инструментов, работоспособность зубных боров и других изделий, работающих на износ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сайфуллин Р.С. Неорганические композиционные материалы. М., 1983.

2. *Бородин И.Н.* Упрочнение деталей композиционными покрытиями. М., 1982.
3. *Озеров А.М., Кривцов А.К. и др.* Нестационарный электролиз. Волгоград, 1972.
4. *Валеев И.М., Абдуллин И.А., Горячев А.Н.* Источник питания периодического тока с обратным импульсом для гальванических ванн // Вестник машиностроения. 1981. № 5. С. 71–72.
5. *Валеев И.М., Абдуллин И.А. и др.* О структуре композиционных покрытий, полученных при нестационарных режимах электролиза // Защита металлов. 1981. Т. 17. № 5. С. 603–605.
6. *Абдуллин И.А., Головин В.А.* Особенности формирования композиционных электрохимических покрытий в режимах периодического знакопеременного тока // Защита металлов. 1987. Т. 29. № 4. С. 686–688.

Поступила 20.12.99

Summary

It is shown that the diminution of the ratio of current maximum of cathodic part of periodic current to current maximum of anodic part leads to rise of adhesion strength with CECP that is caused by formation of a close-grained precipitate. The variation of periodic current parameters allows to carry out fractional selection of electrodeposited particles, to increase uniformity of their allocation in a nickeliferous matrix and to receive macrouniform composition plating with necessary functional properties.

Ю.К. Стишков

ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ПРИ ПОМОЩИ НЕЛИНЕЙНОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

*НИИ радиофизики СПбГУ,
ул. Ульяновская д.1, 198904, г. С-Петербург, Россия*

1. Введение

Для исследования ЭГД-процессов многие исследователи использовали оптические методы, связанные с изменением оптических свойств жидкости в процессе ЭГД-течения за счет джоулева либо внешнего нагрева жидкости. Изучая оптические характеристики различных областей заряженной жидкости можно получить новую информацию о поведении жидких диэлектриков в сильных электрических полях. В отличие от метода визуализирующих включений, при использовании которого неизбежно внесение в жидкость инородных примесей, в случае использования оптических методов исследования и малых тепловых возмущениях внешнее воздействие на исследуемую среду практически неощутимо.

2. Нелинейные оптические эффекты

Настоящая работа посвящена применению оптикоэлектродинамического эффекта [1, 2] для исследования ЭГД-процессов.

Одной из основных причин нелинейного взаимодействия света со средой является изменение диэлектрической восприимчивости среды под действием проходящей световой волны. Самодефокусировка света связана с нелинейным расплыванием высокоинтенсивного светового пучка, распространяющегося в нелинейной среде, показатель преломления которой уменьшается с ростом интенсивности поля. Так, например, лазерный луч, проходя через среду, нагревает ее, что приводит к изменению свойств среды: она становится подобна тепловой отрицательной (рассеивающей) линзе, в результате чего луч лазера расфокусируется. Угол дефокусировки лазерного луча, весьма малой мощности (10 мВт), при просвечивании слоя трансформаторного масла толщиной 0,1 м достигает 10^{-3} рад. Теоретический анализ эффекта тепловой самодефокусировки, приведенный в [1], определяет выражение для максимального угла дефокусировки лазерного луча в виде

$$\beta_m = \frac{l}{n} \frac{\partial n}{\partial r} = \frac{A \rho_0 \alpha (n^2 + 2)^2 W r_0}{12 \pi n^2 \lambda}, \quad (1)$$

где W – мощность лазера; n – показатель преломления; r_0 – радиус лазерного луча; ρ_0 – плотность среды; α – коэффициент объемного расширения; λ – коэффициент теплопроводности. Считается, что распределение интенсивности света в нормальном сечении луча однородно. В реальных лазерах чаще всего имеет место гауссово распределение амплитуды. В отличие от случая, рассмотренного в [1], когда максимальное значение угла дефокусировки достигалось при $r=r_0$, в пучке с гауссовым распределением интенсивности максимальное значение угла дефокусировки β_m смещено внутрь луча и в результате этого для любого угла дефокусировки $\beta < \beta_m$ имеются два луча, интерференция которых дает кольцевую структуру нормального сечения луча в дальней зоне.

3. Исследование ЭГД-процессов при помощи нелинейного оптического эффекта

Кювета с жидкостью представляет кубический сосуд из органического стекла размерами $10 \cdot 10 \cdot 10 \text{ см}^3$ с торцевыми стенками из оптического стекла. Электрическое поле создается электродами – алюминиевым проводом над плоской медной пластиной, размещенными в кювете (рис. 1). Межэлектродное расстояние может изменяться в пределах от 1 до 18 мм. Исследования проводились в трансформаторном масле в смеси с бутанолом в соотношении 1:10 – жидкости, где ЭГД процессы изучены наиболее полно. Луч лазера ЛГ-52 (мощностью 5 мВт) пропускается через кювету параллельно цилиндрическому электроду и падает на матовый экран Э, установленный на базовом расстоянии l_1 от кюветы. Геометрические яркостные характеристики пятна на экране исследуются при помощи телекамеры и системы обработки телевизионного изображения, состыкованной с ЭВМ. Мощность лазера измеряется измерителем мощности и энергии лазерного излучения. Высокое напряжение в диапазоне (0,1–30) кВ создается при помощи ВВУ и генератора сигналов специальной формы (меандр, пила). Угол дефокусировки, а также яркостные характеристики изображения луча на экране определяются путем последующей компьютерной обработки изображения пятна на экране. Одной из основных причин снижения степени дефокусировки лазерного луча, прошедшего через слабопроводящую жидкость, подверженную воздействию электрического поля в системе неизолированных электродов, является ЭГД течение, приводящее к изменению механизма теплопроводности от молекулярного к конвективному. Как отмечалось ранее, при мощности 5–10 мВт нормальное сечение луча на экране представляет систему из двух интерференционных колец с темной сердцевинкой.

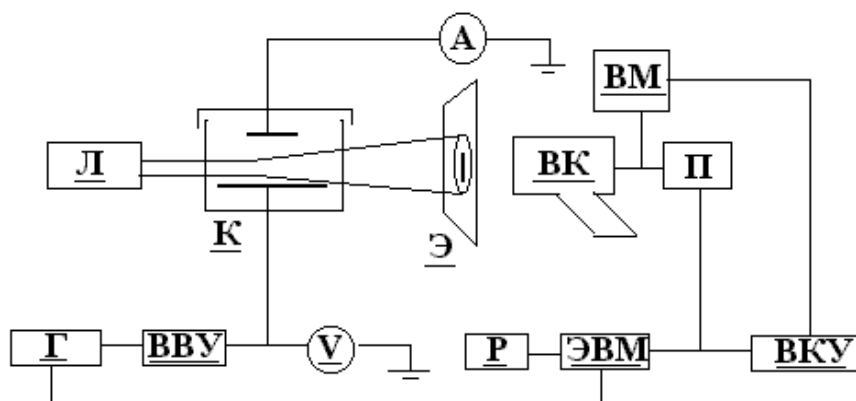


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

4. Результаты исследования при наличии ЭГД-течения

На рис. 2 (в порядке слева направо) приведены последовательные во времени стадии изменения геометрических и яркостных характеристик луча при включении электрического напряжения 2 кВ (вверху), 4 (в середине) и 8 кВ (внизу). Длительность кадра составляет 0,04 с. Как видно из фотографий и наблюдений, воздействие до пороговых напряжений не приводит к изменению размеров и структуры луча. В послепороговой области воздействие электрического поля весьма существенно и очень быстро нарастает с ростом приложенного напряжения. Следует заметить, что при помощи нелинейного оптического эффекта можно весьма точно определить пороговое напряжение. Это связано с тем, что механизм теплопроводности, определяющий угол дефокусировки луча, изменяется с молекулярного на конвективный. Непосредственно в послепороговой области (см. рис. 2, вверху) воздействие электрического поля слабо. Через 0,12 с после подачи напряжения верхняя, ближняя к электроду часть кольцевой структуры затемняется и истончается. В последующие 2–3 с этот процесс весьма ощутим, а затем происходит восстановление первоначально симметричной кольцевой структуры поперечного сечения луча. При повышении напряжения до 4 кВ время воздействия снижается и в течение 0,08 с кольцевая структура вырождается в светлое круговое овальное пятно неправильной формы. По центру пятна проходит (на кадре 3 в верхней части, на кадре 4 в нижней части пятна) темная полоса. Далее (кадры 5–9) пятно обрезано в нижней части. В установившемся режиме (кадр 10) круговая симметрия восстанавливается, однако диаметр пятна близок к диаметру луча, не прошедшего жидкость (эффект дефокусировки очень мал). При отключении напряжения (см. рис. 3) картина иная, в течение 4–10 с без изменения внутренней структуры

пятна происходит медленное плавное восстановление диаметра кольца до первоначальных размеров.

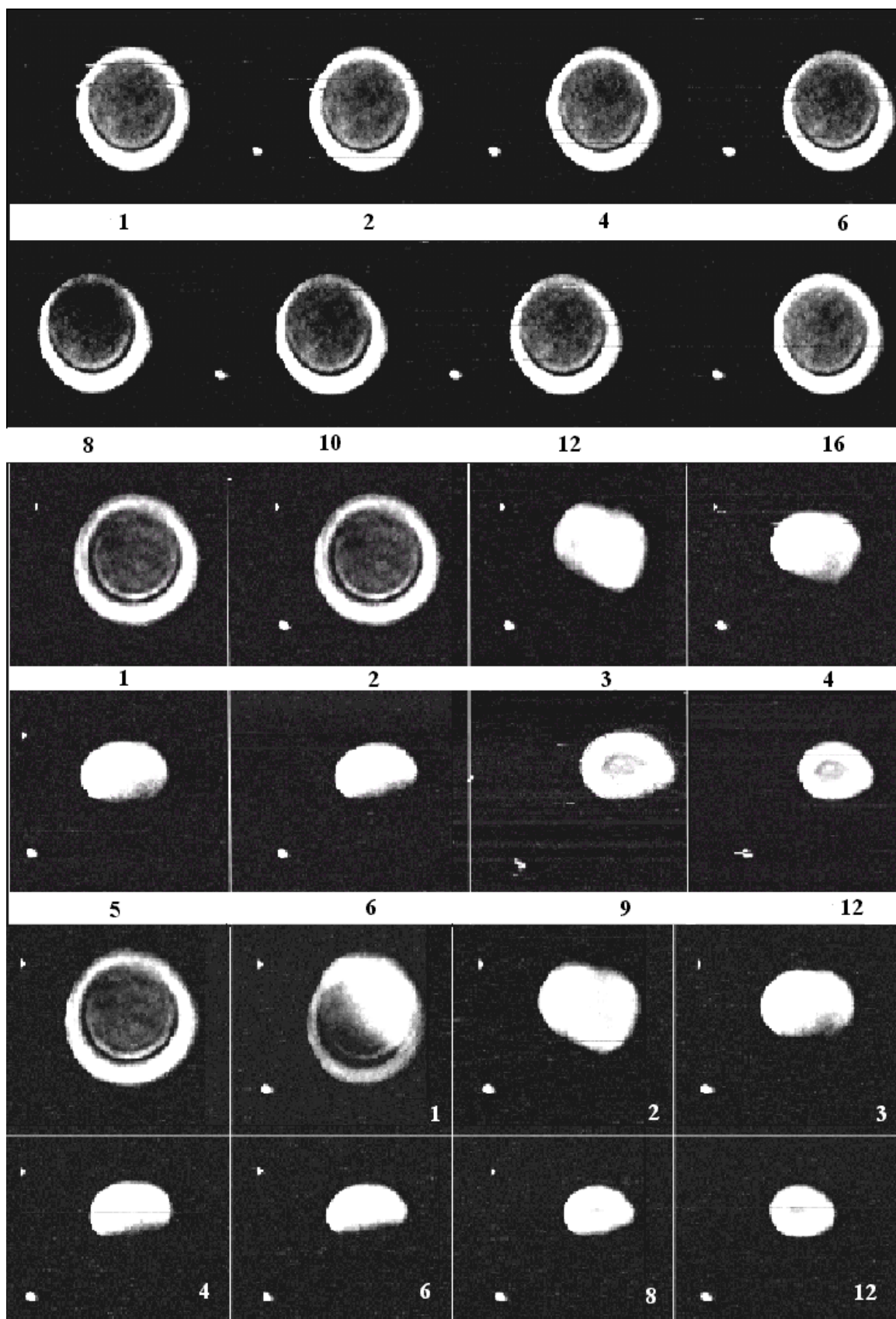


Рис. 2. Видеокдры луча в режиме ЭГД-течения (2, 4, 8 кВ).

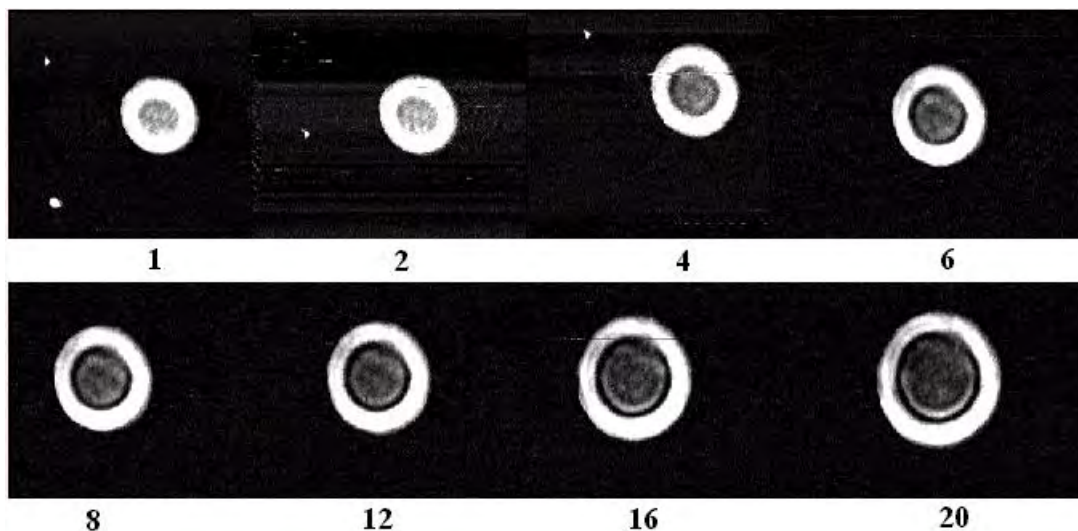


Рис. 3. Выключение напряжения.

Теория нелинейного оптического эффекта в движущейся среде [3] основана на изменении механизма теплопроводности с молекулярного на конвективный и разработана для случая одномерного бокового обдува области локализации лазерного луча. Вклад конвективного механизма теплообмена оценивается, как обычно, при помощи числа Пекле. При малых числах Пекле вклад конвективного механизма мал, а при больших вынос тепла из области, просвечиваемой лучом, становится существенным, в среде появляется оптический клин и пучок смещается на угол, обратно пропорциональный скорости обдува. Таким образом кольцевая структура пятна переходит в эллиптическую. Как видно из анализа рис. 2 и 3, в случае ЭГД-течений картина иная.

5. Структурные особенности заряженной жидкости

При помощи чисто гидродинамического фактора невозможно объяснить все особенности ОЭГД эффекта, изложенные в [2]: невозможно объяснить механизм длительной релаксации пятна при отключении напряжения, не поддается интерпретации ярко выраженная анизотропия свойств жидкости на периферийных участках ЭГД ячейки, остается непонятной природа оптической анизотропии в центре ЭГД завихрений, где скорость ЭГД течения очень мала. Единственной причиной, способной объяснить эти особенности, является возможное молекулярное структурирование жидкости электрическим объемным зарядом.

В [5–7] отмечалось, что некоторые характерные особенности электролитов и жидких диэлектриков, появляющиеся в электрическом поле, вероятно, связаны с процессами структурирования жидкости под влиянием электрического объемного заряда. Многочисленные исследования посвящены структурным особенностям электролитов, в которых подробно рассматриваются так называемые сольватные оболочки (в случае неводных растворов электролитов) и гидратационные оболочки (в водных растворах электролитов), а также различные модели описания “ионных атмосфер” [8]. В результате процесса сольватации в растворе должны присутствовать не свободные ионы, а ионы с сольватной оболочкой. Еще в 1954 году Бокрис и Конвей установили, что подобные структуры, как правило, содержат первичную и вторичную оболочки. В первую включены молекулы растворителя, прочно связанные с ионом и перемещающиеся вместе с ним. Во вторичную оболочку входят все молекулы воды, состояние которых отличается от их состояния в чистом растворителе. Для многих электрохимических процессов важно знать, сколько молекул растворителя входит во внутреннюю сольватную оболочку. Сольватные оболочки содержат весьма ограниченное количество молекул, как правило, порядка одного-двух десятков [9].

Наряду с сольватацией и гидратацией ионов большое внимание уделялось изучению “ионной атмосферы”. Основная идея построения “ионной атмосферы” принадлежит Дебаю и Гюккелю, предположившим, что в растворе сохраняется присущее кристаллам распределение ионов, при котором каждый из них окружен преимущественно ионами противоположного знака. Однако в растворах, в отличие от кристаллов, тепловое движение ионов приводит к тому, что они не сохраняют своего фиксированного положения в узлах кристаллической решетки, а

располагаются вокруг выбранного центрального иона в виде сферы, причем непрерывно обмениваясь местами друг с другом. Все ионы раствора равноправны, каждый из них окружен “ионной атмосферой” и в то же время каждый центральный ион входит в состав “ионной атмосферы” какого-либо другого иона. Размер “ионной атмосферы” ограничен радиусом Дебая.

Принято считать, что в электролитах нет пространственно распределенного заряда. Размеры сольватных оболочек малы ввиду отсутствия избыточного объемного заряда, “ионная атмосфера” ограничивает размер сольватных оболочек.

В случае обычных незаряженных изотропных жидкостей со стержневидными молекулами с помощью рентгенографического анализа Стюартом были обнаружены группировки с упорядоченным расположением молекул, названные “сиботаксическими группами” или “роями” [6]. Образование “сиботаксических групп” согласуется с теорией Френкеля, в которой жидкость по своему строению находится ближе к кристаллам, чем к газам и сохраняет так называемый “ближний порядок”, то есть вблизи каждой молекулы наблюдается некоторое упорядоченное расположение соседей. Причем для жидкостей со стержнеобразными молекулами с увеличением длины молекул упорядоченность возрастает.

Характерными особенностями слабопроводящих сред является наличие электрического объемного заряда и малая проводимость. Возможно, структуры в таких средах формируются из имеющихся в жидкости сиботаксических групп, формирующим центром которых является ион, образующий облако электрического объемного заряда и укрепляющий существующую в жидкости сиботаксическую структуру. Молекулярная теплопроводность заряженной структурированной среды, которая связана с показателем преломления, может существенно отличаться от подобной характеристики изотропной незаряженной жидкости. Поэтому в случае заряженной жидкости угол дефокусировки лазерного луча зависит от плотности электрического объемного заряда и при наличии неоднородной плотности заряда в различных направлениях может наблюдаться анизотропия нелинейных оптических свойств заряженной жидкости.

6. Результаты исследований в частично-изолированной системе электродов

Далее изложены результаты экспериментов в частично изолированной системе электродов, позволяющей устранить влияние гидродинамического фактора на эффект нелинейной дефокусировки лазерного луча, сохранив фактор структурирования жидкости электрическим объемным зарядом. Экспериментальное исследование проводилось в системе электродов: неизолированный электрод (открытый), представляющий собой алюминиевый провод – изолированный электрод (закрытый), представляющий медную проволочку, покрытую полиэтиленовой трубкой. Проводимость полиэтилена в области высоких напряжений не менее 10^{-16} (Ом·м)⁻¹, что, по крайней мере, на четыре порядка меньше, чем проводимость исследуемой смеси трансформаторного масла с бутанолом. Подобная система электродов дает возможность сохранить инжекцию электрического объемного заряда в жидкость, устранив ЭГД течения и тем самым исключив воздействие конвективного механизма теплообмена на эффект нелинейной дефокусировки лазерного луча. Частично изолированная система электродов характеризуется отсутствием сквозного тока через жидкость. Отсутствие ЭГД течения проверялось методом визуализирующих частиц с помощью пузырьков воздуха диаметром около 10 мкм. Столь маленькие пузырьки в течение длительного времени остаются практически неподвижными и позволяют судить о наличии или отсутствии гидродинамических процессов в жидкости.

В системе с изолированным высоковольтным электродом при включении напряжения электрический объемный заряд инжектируется в жидкость, причем фронт объемного заряда в неподвижной жидкости распространяется от неизолированного электрода к изолированному путем миграции. После прохождения через жидкость фронта электрического заряда облако отрицательного заряда концентрируется преимущественно вокруг изолированного электрода, а поток заряда через жидкость ослабевает. Нестационарный процесс, как показывают расчеты, может длиться достаточно долго, в течение времени, по порядку величины соответствующем характерному времени молекулярной диффузии. Переходные процессы при включении напряжения исследовались в различных областях межэлектродного промежутка (у изолированного, у неизолированного электродов, в середине межэлектродного промежутка). Основной характеристикой нелинейного оптического эффекта является изменение угла дефокусировки лазерного луча. На рис. 4 приведены последовательные стадии нелинейного электрооптического эффекта в системе частично изолированных электродов после включения напряжения. Переходной процесс в рассматриваемом случае имеет выраженные индивидуальные особенности. Это, прежде всего,

выраженный нестационарный характер, ярко выраженная анизотропия свойств жидкости, длительная релаксация (порядка 4 часов), переход на некоторых стадиях от эффекта дефокусировки лазерного луча к фокусировке. Экспериментально установлено, что эффект снижения степени дефокусировки лазерного луча в частично изолированной системе электродов носит пороговый характер. При изменении напряжения до некоторого порогового значения электрическое поле не изменяет угол дефокусировки лазерного луча, тогда как при $U > U_{\text{пор}}$ уменьшение угла дефокусировки становится ощутимым. Рассмотрим рис. 4. В данном эксперименте было подано напряжение $U = 4-5$ кВ, продолжительность процесса составила примерно 4 часа. Из рисунка видно, что в процессе релаксации изменяется форма пятна, от кольцевой к серповидной и происходит разворот серповидной структуры пятна против часовой стрелки, в ходе которого, примерно к середине процесса форма пятна, в целом серповидная, претерпевает изменения. Серп теряет симметрию, изменяется в линейных размерах, при этом сильно изменяется интенсивность светового луча в различных участках среды. Причину этого процесса следует искать в изменении теплопроводности в различных участках неоднородно заряженной жидкости, попадающей в область распространения лазерного луча. При этом согласно формуле (1) показатель преломления среды обратно пропорционален коэффициенту теплопроводности λ , который в свою очередь зависит от локальной плотности объемного заряда в жидкости. Обычно в экспериментах по ЭГД эффектам скорость ЭГД течений в 10–20 раз выше скорости миграции ионов. Как видно из рис. 2, в неизолированной системе электродов (при наличии ЭГД течений) скорость изменения угла дефокусировки была также более чем на порядок выше, чем в экспериментах в неподвижной жидкости (рис 4). Таким образом, изменение механизма теплопроводности заряда от конвективного к миграционному сопровождается уменьшением скорости изменения угла дефокусировки и появлением сильно выраженной анизотропии нелинейного показателя преломления. Из численных экспериментов с ЭГД системами известно, что для них характерна выраженная неоднородность в распределении объемного электрического заряда, особенно в приэлектродных областях, что должно привести к выраженной анизотропии угла дефокусировки лазерного луча, особенно заметной в неоднородных электрических полях и в частично изолированной системе электродов. Следует отметить, что одним из фундаментальных свойств незаряженной жидкости является изотропность ее механических, теплофизических и оптических свойств. Появление анизотропии оптических свойств в электрическом поле является свидетельством нарушения однородности заряженной среды за счет появления в ней надмолекулярных структур.

7. Компьютерная обработка экспериментальных данных

Для обработки фотографий, в среде MatCad была разработана программа, преобразующая изображение луча в матрицу значений яркости. Для анализа процесса воздействия ЭГД-течений программа проводит некоторые вычисления: из матрицы значений каждого последующего кадра вычитается матрица значений предыдущего кадра. В программе предусмотрена возможность анимации полученных данных. На рис. 5 в порядке сверху вниз представлены поверхностные графики последовательности кадров видеозаписи, изображенные на рис. 2 в середине для напряжения 4 кВ. Левая последовательность фигур представляет преобразованный ряд кадров (номера кадров указаны в подрисуночной надписи), правая последовательность фигур получена путем вычитания матриц значений яркости двух последующих кадров. Таким образом правая последовательность фигур отражает изменения поля яркости луча за время между двумя соседними кадрами (длительность кадра -0,04 с). Как видно из последовательности фигур (рис. 5) наиболее существенные изменения происходят непосредственно после включения напряжения, за время не превышающее 0,04 с, то есть происходит преобразование первоначально кольцевой структуры дефокусированного луча в овальную с одновременным уменьшением характерного размера пятна. За последующее время изменения более плавные и заключаются в постепенном восстановлении кольцевой структуры (кадр 12), при меньшем радиусе. На промежуточных стадиях, как видно из кадров правого ряда, происходят существенные блуждания центра симметрии фигуры.

На рис. 6 приведены поверхностные графики яркости луча в режиме частично-изолированных электродов. Графики в порядке сверху вниз соответствуют видеокдрам рис. 4. В левом ряду результаты прямого преобразования видеокдрам в поверхностный график яркости, в правом ряду результаты, полученные путем вычитания матриц значений яркости двух последующих кадров. Таким образом правая последовательность фигур отражает

изменения поля яркости луча за время между двумя соседними кадрами, номера которых указаны в подрисуночной подписи.

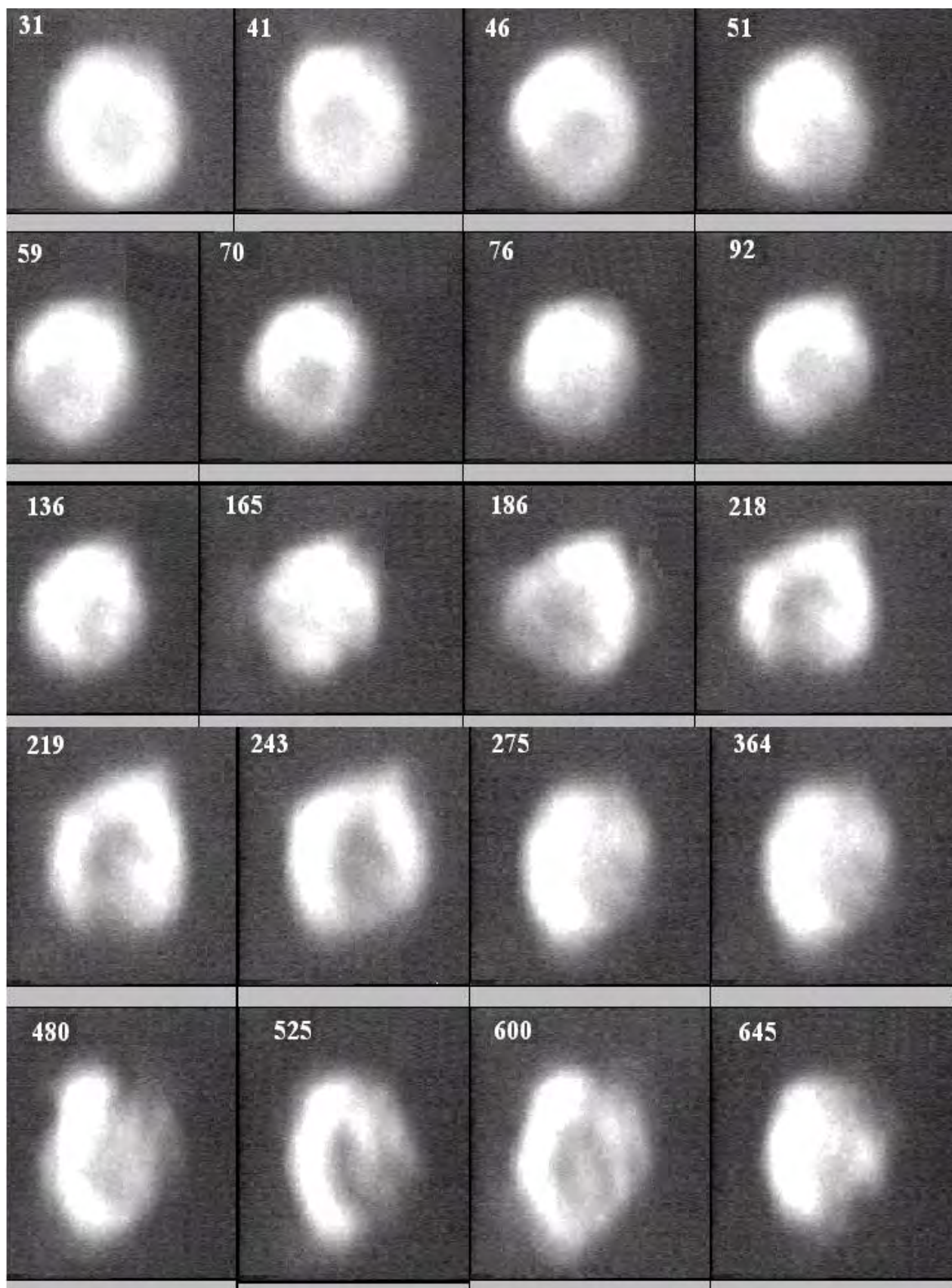
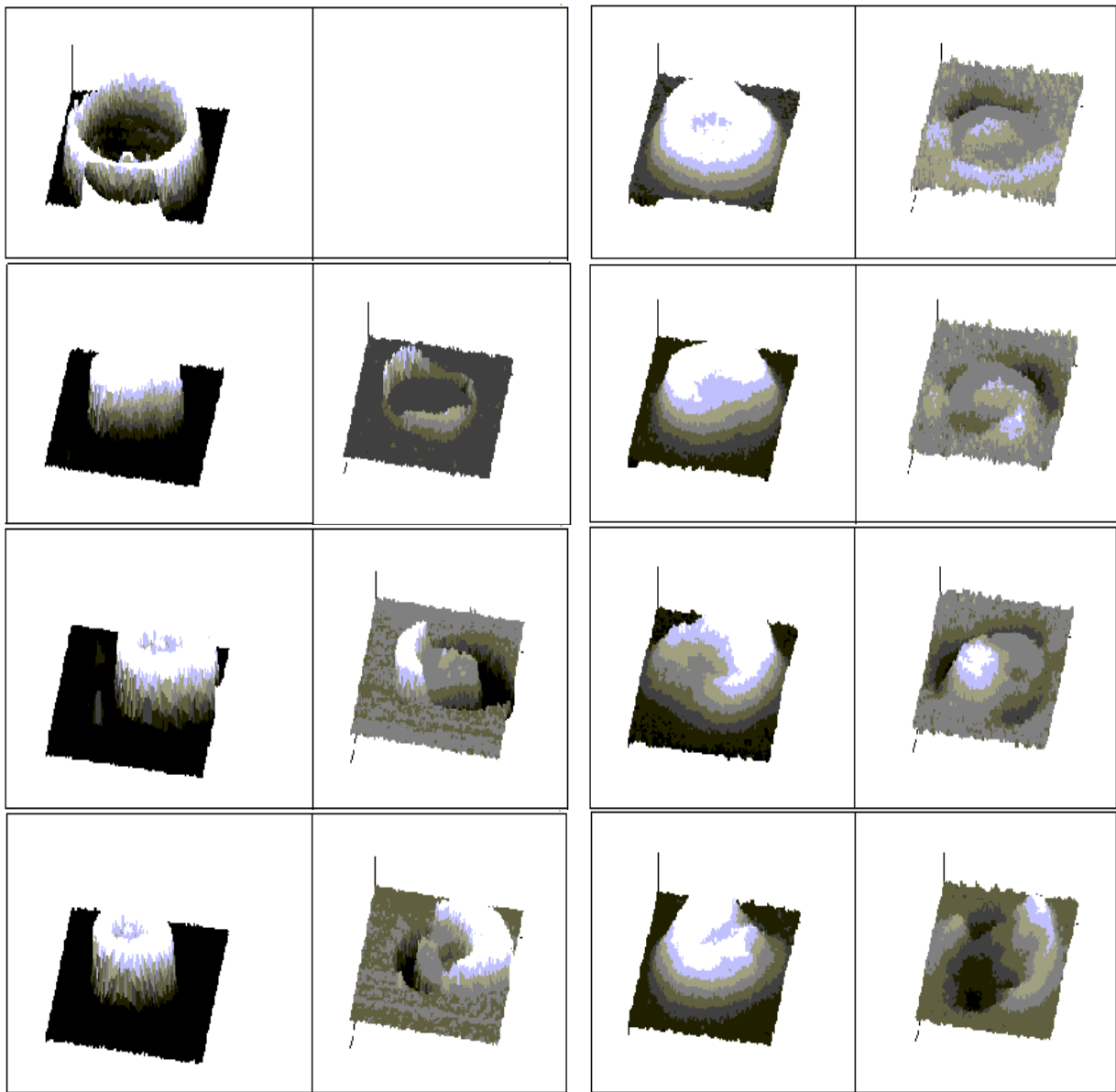


Рис. 4. Частично-изолированные электроды, включение напряжения к.30, длительность кадра 0,04 с.



*Рис. 5. Поверхностные графики яркости луча.
Кадры 2, 3, 5, 9, 12 рис 2, $U = 4$ кВ.*

*Рис. 6. Поверхностные графики яркости
луча. Кадры 31, 41, 61, 92, 186.*

Одним из фундаментальных свойств жидкости является изотропность ее физических свойств. Под воздействием сильного электрического поля жидкость становится оптически анизотропной, в жидкости появляется электрический объемный заряд и возникают ЭГД течения. Это определяет два возможных физических механизма реализации нелинейного ОЭГД эффекта: гидродинамический и структурный (образование надмолекулярных структур в поле ионов, образующих электрический объемный заряд).

Анализ экспериментальных результатов по нелинейному электрооптическому эффекту в системе частично изолированных электродов, позволившей устранить гидродинамический фактор, выявил ряд характерных особенностей: а) изменение нелинейных оптических свойств жидкости при включении напряжения включает быструю и медленную стадии; б) релаксация нелинейных оптических свойств при отключении напряжения включает также быструю и медленную стадии, время релаксации достигает нескольких часов. Сопоставительный анализ нелинейного ОЭГД эффекта в системе неизолрированных электродов с электрооптическим эффектом в частично изолированной системе электродов позволил установить взаимосвязь основных особенностей эффектов с механизмами распространения объемного электрического заряда в жидкости при включении и выключении напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Картошкин П.Б., Миротворский В.О., Стишков Ю.К. Нелинейный оптико-электрогидродинамический эффект в жидких диэлектриках // Вестник С.-Петербургского ун-та, Сер. 4. 1994. Вып. 4. С. 10–16.
2. Картошкин П.Б., Миротворский В.О., Стишков Ю.К. Нелинейный оптико-электрогидродинамический эффект в жидких диэлектриках // Электронная обработка материалов. 1995. № 2.
3. Сухоруков А.П. Дифракция световых пучков в нелинейных средах. Соросовский образовательный журнал, 1996, 5. С. 85–92.
4. Stishkov Y.K. Space charge influence on non-linear beam defocusing. 1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Atlanta, OMNIPRESS USA. Vol. I. P. 170–174.
5. Labjwski M., Skrodzaka E. Theoretical and Experimental evaluations of electric field effect on the ultrasonic wave velocity in carbon tetrachloride // Acustica. 1989. V. 68. № 1. P. 26–32.
6. Скрышевский А.Ф. Структурный анализ жидкостей и аморфных тел // М., 1980.
7. Полторак О.М. Термодинамика в физической химии. М., 1991.
8. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. М., 1969.
9. Чижик В.И. Ядерная магнитная релаксация / Уч. пособие. Л., 1991.
10. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. Л., 1975.

Поступила 20.01.2000

Summary

A new method of investigation for high voltage processes in liquid dielectrics by means of non linear optical effect is established. Non linear optical effect suggests warm defocusing of laser beam, passing through the area of liquid dielectric, which is located in strong electrical field. Two cases are described in the paper: in first case electrohydrodynamic currents are defining processes, which appear in liquid under high voltage. In the second case, the change of the defocusing level of the laser beam is a consequence of structurization-by-the-space-charge of ions. Ions are forming cloud of electrical space charge. Described method has high sensitivity and allows to identify the edge of EHD-currents formation. The paper describes results of computer processing of video raw for non linear optico electrohydrodynamic effect.

С.О. Ширяева, Ю.Б. Кузьмичев, А.С. Голованов, Д.Ф. Белоножко

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ КЕЛЬВИНА-ГЕЛЬМГОЛЬЦА ПРИ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЕ ВЕРХНЕЙ СРЕДЫ

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

Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца заряженной границы раздела двух идеальных несмешивающихся жидкостей различных плотностей, каждая из которых заполняет полубесконечное пространство, а верхняя жидкость движется с постоянной скоростью U параллельно границе раздела, представляет интерес в связи с многочисленными приложениями в технической физике и химической технологии [1–8] и в этой связи достаточно подробно

© Ширяева С.О., Кузьмичев Ю.Б., Голованов А.С., Белоножко Д.Ф., Электронная обработка материалов, 2000, № 2, С. 25–33.

исследована как экспериментально, так и теоретически. Тем не менее, некоторые вопросы, связанные с особенностями реализации такой неустойчивости, остаются пока не выясненными. Сказанное, в частности, относится к ситуации, когда в отличие от классической идеализированной схемы верхняя жидкость имеет конечную толщину, то есть к ситуации, приближенной к реальным условиям. Не понятно, как критические условия реализации неустойчивости и длина наиболее неустойчивой моды будут зависеть от толщины слоя верхней жидкости. Этой проблеме и посвящено настоящее исследование.

1. Рассмотрим простейшую модель идеальных несжимаемых жидкостей, когда верхняя диэлектрическая жидкость имеет толщину h и плотность ρ_1 , а нижняя с плотностью ρ_2 заполняет в поле сил тяжести \vec{g} ($\vec{g} \parallel -\vec{n}_z$, а \vec{n}_z есть орт декартовой оси, перпендикулярной границе раздела) полубесконечное пространство $z < 0$. Примем, что на невозмущенной капиллярным движением границе раздела имеется электрический заряд с плотностью σ .

Эволюция капиллярных волн в такой системе может быть определена как решение задачи для гармонических потенциалов поля скоростей движения в верхней ψ_1 и нижней ψ_2 жидкостях в декартовой системе координат, плоскость XOY которой совпадает с невозмущенной границей раздела верхней и нижней сред:

$$\Delta\psi_i = 0; \quad i = 1, 2. \quad (1)$$

С граничными условиями:

$$z = h: \quad \frac{\partial\psi_1}{\partial z} \approx U \frac{\partial\zeta}{\partial x} + \frac{\partial\zeta}{\partial t}; \quad (2)$$

$$\rho_1 \frac{\partial\psi_1}{\partial t} + \rho_1 g \zeta + \frac{1}{2} \rho_1 (\nabla\psi_1)^2 - \alpha_1 \frac{\partial^2\zeta}{\partial x^2} = 0; \quad (3)$$

$$z = 0: \quad \frac{\partial\psi_1}{\partial z} \approx U \frac{\partial\xi}{\partial x} + \frac{\partial\xi}{\partial t}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial\psi_2}{\partial z} \approx \frac{\partial\xi}{\partial t}; \quad (5)$$

$$\rho_1 \left[\frac{\partial\psi_1}{\partial t} + g\xi + \frac{1}{2} (\nabla\psi_1)^2 \right] = \rho_2 \left[\frac{\partial\psi_2}{\partial t} + g\xi \right] + P_\sigma - \alpha_2 \frac{\partial^2\xi}{\partial x^2}. \quad (6)$$

Здесь $\zeta(x, t)$ – возмущение свободной поверхности верхнего слоя; $\xi(x, t)$ – возмущение границы раздела сред, связанное с капиллярным волновым движением; \vec{U} – постоянная скорость движения верхней жидкости относительно нижней, направление которой определит ориентацию оси OX; α_1 и α_2 – коэффициенты поверхностного натяжения свободной поверхности и границы раздела; $P_\sigma = 4\pi\epsilon^{-1}\sigma^2 k\xi$ – электростатическое давление на границе раздела сред, происходящее из-за наличия на ней электрического заряда с равновесной поверхностной плотностью σ , ϵ – диэлектрическая проницаемость верхней жидкости [9].

Решение задачи (1)–(6) будем искать в виде:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= (A_1 \exp(kz) + A_2 \exp(-kz)) \cos(kx - \omega t) + Ux; \\ \psi_2 &= B \exp(kz) \cdot \cos(kx - \omega t); \\ \zeta &= C \sin(kx - \omega t); \\ \xi &= D \sin(kx - \omega t). \end{aligned} \quad (7)$$

Подставляя (7) в граничные условия (2)–(6), взятые на невозмущенных поверхностях $z=0$, $z=h$, в линейном по малым амплитудам A_1 , A_2 , B , C , D приближении, получим систему алгебраических уравнений:

$$A_1 k \exp(kh) - A_2 k \exp(-kh) - (Uk - \omega)C = 0; \quad (2a)$$

$$\rho_1 \exp(kh)(\omega - Uk)A_1 + \rho_1 \exp(-kh)(\omega - Uk)A_2 + (\rho_1 g + \alpha_1 k^2)C = 0; \quad (3a)$$

$$kA_1 - kA_2 - (Uk - \omega)D = 0; \quad (4a)$$

$$kB + \omega D = 0; \quad (5a)$$

$$\rho_1(\omega - Uk)A_1 + \rho_2(\omega - Uk)A_2 + [g(\rho_1 - \rho_2) + 4\pi\varepsilon^{-1}\sigma^2k - \alpha_2k^2] = 0. \quad (6a)$$

Приравнявая нулю определитель, составленный из коэффициентов при неизвестных амплитудах A_1, A_2, B, C, D в системе алгебраических уравнений (2a)-(6a), получим дисперсионные уравнения задачи:

$$\begin{aligned} & -[\rho_2 + \rho_1 \cdot th(kh)] \cdot \omega^4 + 2Uk[2\rho_1 \cdot th(kh) + \rho_2] \cdot \omega^3 - \\ & - \left\{ \rho_1 \cdot th(kh) \left[6(Uk)^2 - \frac{k\rho_2}{\rho_1}(g - D_1) \right] + k[(g - D_2)\rho_2 - D_1\rho_1] - \rho_2(Uk)^2 \right\} \cdot \\ & \cdot \omega^2 + 2k^2U[2\rho_1 \cdot kU^2 \cdot th(kh) + \rho_1D_1 + \rho_2(D_2 - g)] \cdot \omega + \\ & + k^2 \left\{ \rho_1 \cdot th(kh) \left[g(g - D_1) + U^4k^2 - \frac{\rho_1}{\rho_1}(D_1 - g)(D_2 + g) \right] + U^2k[\rho_2(g - D_2) - \rho_1] \right\} = 0; \end{aligned}$$

$$D_1 = \frac{-\alpha_1k^2}{\rho_1}; \quad D_2 = \frac{1}{\rho_2} (4\pi\varepsilon^{-1}\sigma^2k - \alpha_2k^2).$$

В безразмерных переменных, в которых $\rho_2 = \alpha_2 = g = 1$, это дисперсионное уравнение принимает вид:

$$\begin{aligned} & -[1 + \rho th(kh)]\omega^4 + 2Uk[2\rho th(kh) + 1]\omega^3 - \left[\rho th(kh) \left[6(Uk)^2 - \frac{k}{\rho}(1 - D_1) \right] + k[(1 - D_2) - D_1\rho] - (Uk)^2 \right] \omega^2 + \\ & + 2k^2U[2\rho th(kh)kU^2 + \rho D_1 + (D_2 - 1)]\omega + k^2[\rho th(kh) * [(1 - D_1) + U^4k^2 - (D_1 - 1)(D_2 + 1)] + \\ & + U^2k[(1 - D_2) - \rho]] = 0; \end{aligned} \quad (8)$$

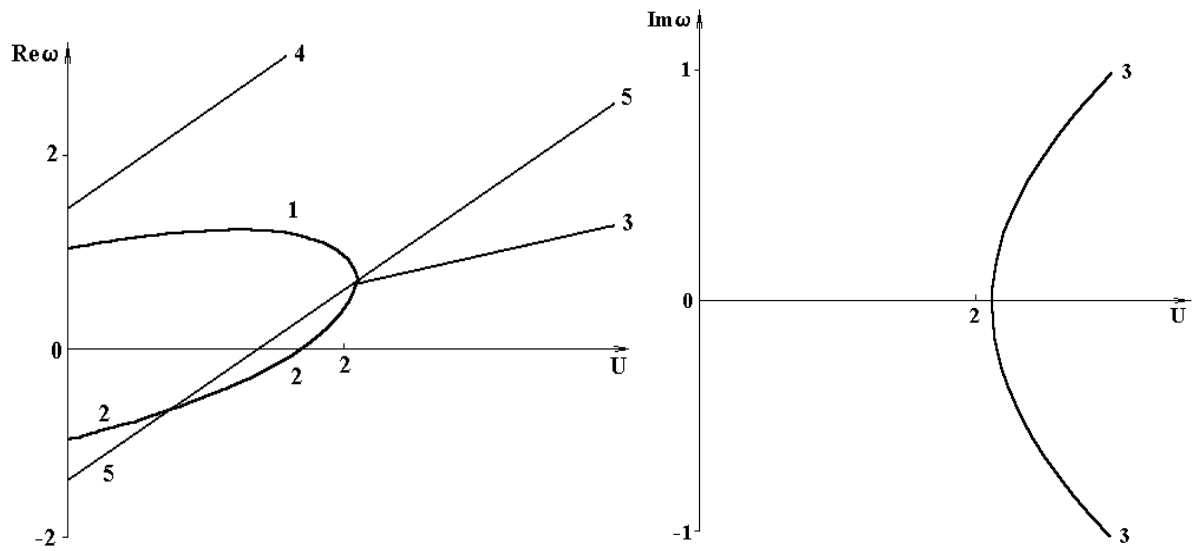
$$W = \frac{4\pi\sigma^2}{\varepsilon\alpha_2} \alpha; \quad \alpha^2 = \frac{\alpha_2}{\rho_2g}; \quad \rho = \frac{\rho_1}{\rho_2}; \quad \alpha = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}; \quad D_1 = -\frac{\alpha k^2}{\rho}; \quad D_2 = Wk - k^2.$$

Безразмерные переменные ω, k, U и h измеряются единицами своих характерных масштабов:

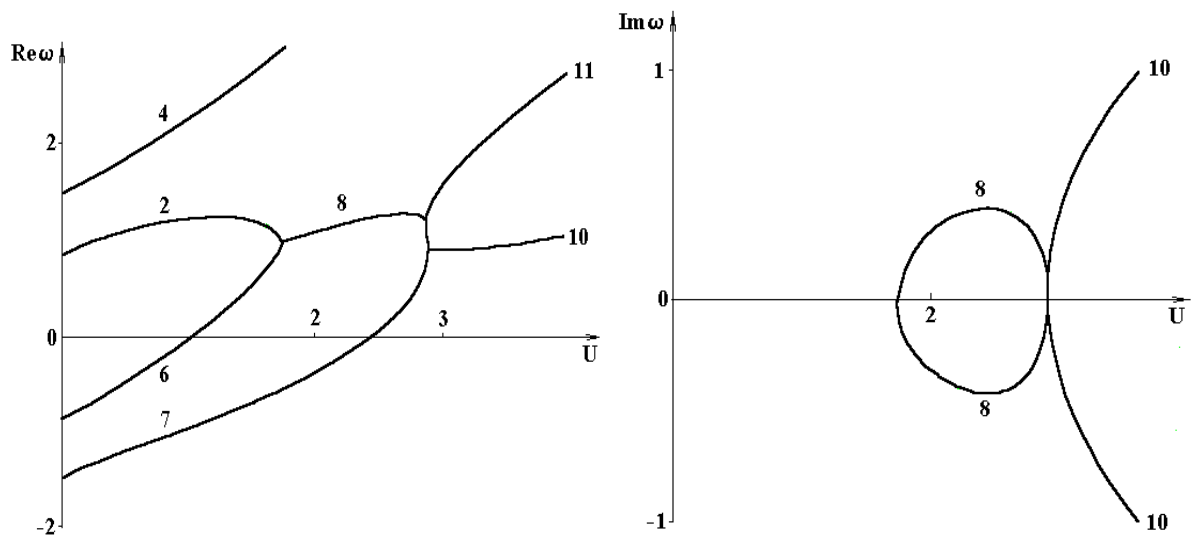
$$\omega^* = \sqrt{g/\alpha}; \quad k^* = \alpha^{-1}; \quad U^* = \sqrt{g\alpha}; \quad h^* = \alpha.$$

2. На рис. 1 приведены результаты численного исследования влияния толщины верхнего движущегося жидкого слоя на закономерности развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца по дисперсионному уравнению (8) (в отсутствие электрического заряда на границе раздела сред). На рис. 1 вещественная часть комплексной частоты определяет частоты капиллярных движений жидкости, а мнимая инкременты неустойчивости (в области $Im \omega > 0$) и декременты затухания (в области $Im \omega < 0$). Ветви дисперсионного уравнения с номерами 1, 2, 3 на рис. 1,а описывают капиллярные движения, порождаемые границей раздела сред. Ветви же дисперсионного уравнения с номерами 4 и 5 описывают капиллярные волновые движения, порождаемые свободной поверхностью верхней жидкости. На рис. 1,а эти ветви являются параллельными прямыми, ориентированными под некоторым углом к оси ОУ. Очевидно, что в системе отсчета, движущейся с верхней жидкостью ветвь 4 описывает волну, распространяющуюся по направлению \vec{U} , а ветвь 5 соответствует такой же волне, бегущей в противоположном направлении.

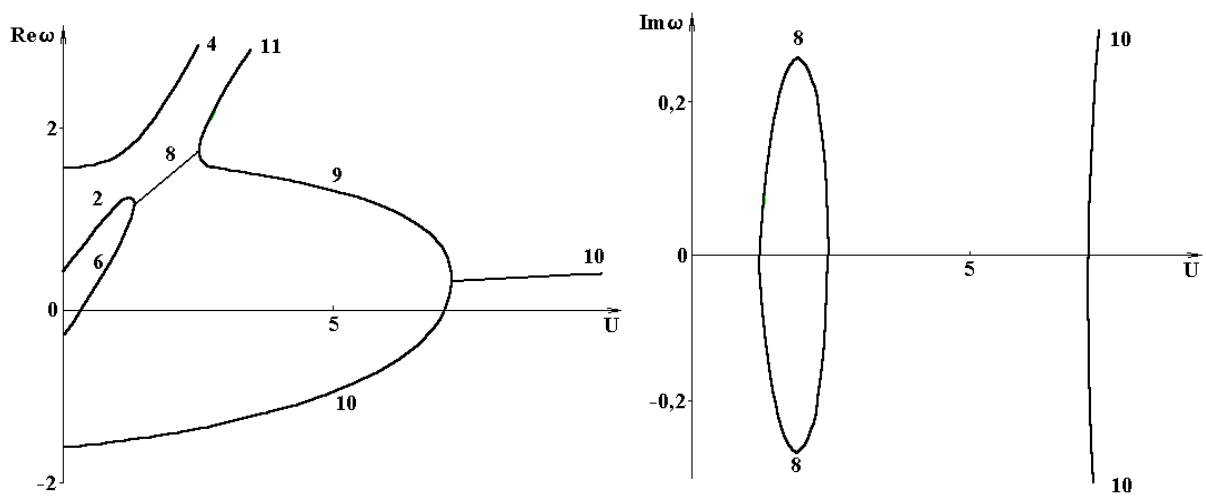
Расчеты показали, что при достаточно большой безразмерной глубине ($h > 5$) закономерности реализации неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в рассматриваемой системе не отличаются от классического варианта с бесконечной толщиной верхней жидкости: $h \rightarrow \infty$. Согласно рис. 1,а при некотором значении скорости движения верхней среды $U = U_*$ ветви волновых движений 1 и 2 сливаются, образуя два волновых движения 3, амплитуда одного из которых экспоненциально затухает со временем с декрементом, определяемым отрицательной частью мнимой компоненты ветви 3, а другого – экспоненциально нарастает с инкрементом, определяемым положительной частью мнимой компоненты ветви 3.



a)



б)



в)

Рис. 1. Зависимости действительной $Re \omega = Re \omega(U)$ и мнимой $Im \omega = Im \omega(U)$ частей комплексной частоты от скорости верхней жидкости, рассчитанные при $k = 1$; $\rho_1 = 0,5$; $\alpha_1 = 0,5$; $W_1 = 0$ и различных значениях $h = 5(a)$, $0,9(b)$, $0,1(в)$.

При уменьшении безразмерной толщины слоя верхней жидкости (см. рис. 1,б,в) до значений $h \sim 1$ ветви 1, 2, 3 начинают взаимодействовать с ветвями 4 и 5 с образованием новых составных движений 6, 7, 8, 9, 10, 11 и с деформированием ветви 4. Причем движения 4, 6, 7, 9, 11 являются волновыми незатухающими, а движения 8 и 10 содержат как периодически экспоненциально затухающие (для которых $Im \omega < 0$), так и периодически экспоненциально нарастающие (неустойчивые) ветви (для которых $Im \omega > 0$). Неустойчивое движение 10 соответствует классической неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и для него критическая скорость начала реализации неустойчивости U_* увеличивается с уменьшением толщины слоя верхней жидкости. Неустойчивое движение 8 обязано своим происхождением взаимодействию движений, порождаемых свободной поверхностью верхней жидкости, и движений, порождаемых границей раздела сред. При уменьшении безразмерной толщины слоя верхней жидкости h неустойчивое движение 8, в отличие от движения 10, реализуется при все меньших критических значениях скорости верхней жидкости U_* , величина его инкремента при этом снижается.

3. На рис. 2 приведены результаты расчета по дисперсионному уравнению (8) зависимости действительной $Re \omega = Re \omega(W)$, мнимой $Im \omega = Im \omega(W)$ компонент комплексной частоты от величины параметра W , характеризующего устойчивость заряженной поверхности жидкости в смысле устойчивости по отношению к собственному заряду (в смысле возможности реализации неустойчивости Тонкса-Френкеля), построенные для случая неподвижного верхнего слоя $U = 0$. Ветви 4 и 7 соответствуют движениям, порождаемым свободной поверхностью верхней жидкости. Ветви 2 и 6 соответствуют движениям, порождаемым заряженной границей раздела сред. Из рис. 2 видно, что при некоторой величине параметра W (при некоторой величине поверхностного заряда на границе сред) волновые движения 2 и 6 сливаются и порождают два симметричных аperiодических движения 8: положительная часть движения 8 определяет инкремент неустойчивости границы раздела сред, а отрицательная часть определяет декремент затухания виртуальных возмущений равновесной плоской границы раздела.

Если привести в движение слой верхней жидкости, то согласно рис. 3 и 4 картина реализующихся в системе капиллярных движений жидкости усложнится. Если не менять значений параметров, при которых получен рис. 2, но лишь добавить движение верхней среды, то картина расположения ветвей дисперсионного уравнения деформируется в сторону асимметрии (что видно из сравнения рис. 2 и 3), а реализующаяся неустойчивость заряженной границы раздела из аperiодической станет периодической. Утоньшение слоя верхней жидкости приведет к разделению неустойчивого движения на два независимых неустойчивых движения 8 и 10 (см., рис. 4,а и 4,б). Ветвь 8 соответствует неустойчивости, происходящей из-за взаимодействия движений, порождаемых свободной поверхностью верхней жидкости и заряженной границы раздела сред. Ветвь 10 соответствует комбинации неустойчивостей Тонкса-Френкеля и Кельвина-Гельмгольца, рассмотренной в [7].

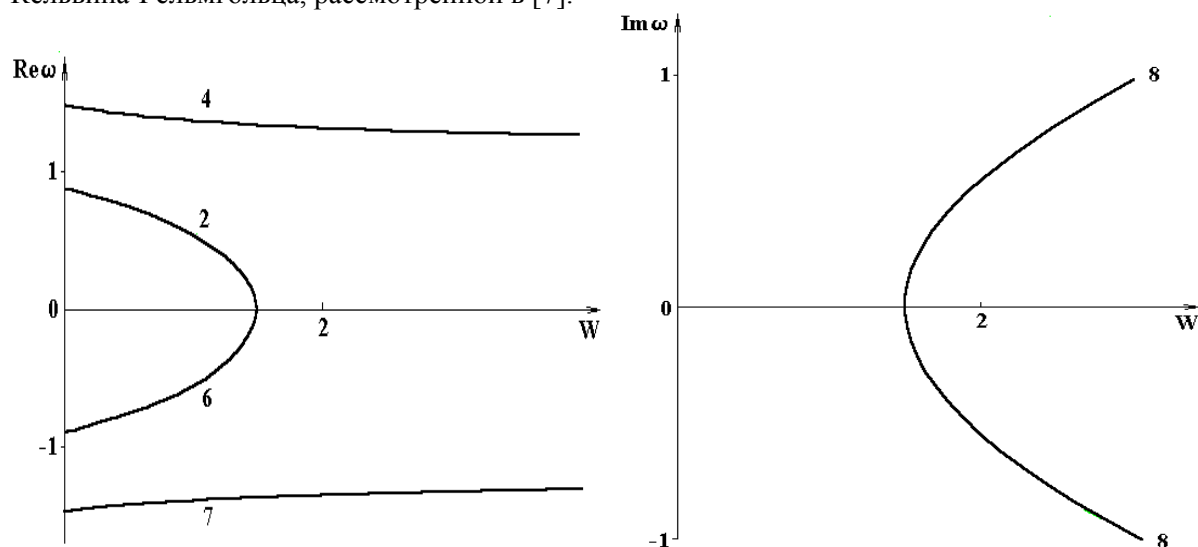


Рис. 2. Зависимости действительной $Re \omega = Re \omega(W)$ и мнимой $Im \omega = Im \omega(W)$ компонент комплексной частоты от величины заряда на границе раздела жидкостей, рассчитанные при $k = 1$; $\rho_1 = 0,5$; $\alpha_1 = 0,5$; $h = 1$, для случая неподвижного верхнего слоя $U = 0$.

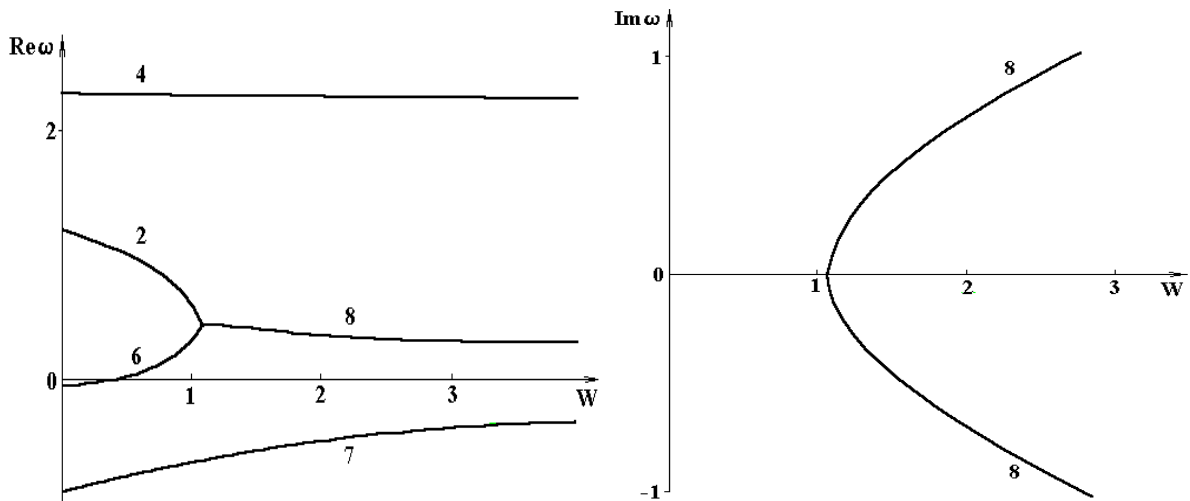


Рис. 3. Зависимости действительной $Re \omega = Re \omega(W)$ и мнимой $Im \omega = Im \omega(W)$ компонент комплексной частоты от величины заряда на границе раздела жидкостей, рассчитанные при $k = 1$; $\rho_1 = 0,5$; $\alpha_1 = 0,5$; $h = 1$, для случая неподвижного верхнего слоя $U = 1$.

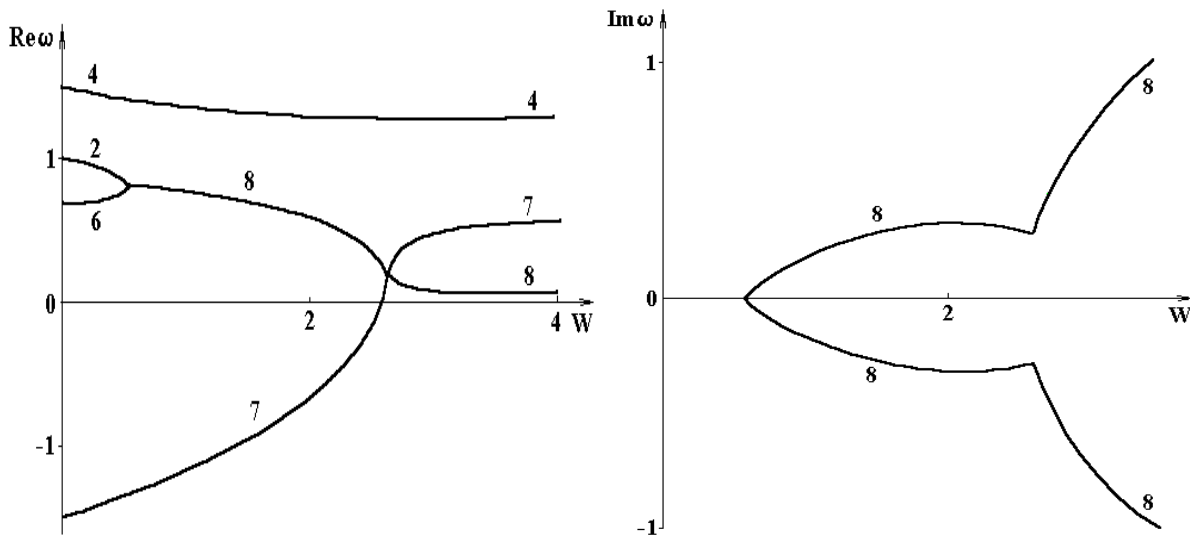
4. Чтобы получить аналитические зависимости, немного упростим решаемую задачу. Из рис. 1–4 видно, что источниками волновых движений жидкости являются свободная поверхность верхнего слоя и граница раздела жидкостей. Если верхнюю жидкость ограничить сверху жесткой плоскостью, то исчезнет свободная поверхность, а вместе с ней исчезнут и движения жидкости, порождаемые ею. Граничное условие на верхней границе слоя конечной толщины вместо (2)–(3) примет вид:

$$z=h: \frac{\partial \psi_1}{\partial z} = 0.$$

Дисперсионное уравнение задачи по сравнению с (8) упростится и примет вид:

$$\begin{aligned} & [\rho_1 \cdot th(-kh) + \rho_2] \cdot \omega^2 - 2\rho_1 kU \cdot th(-kh) \cdot \omega + k \{ \alpha_2 k^2 + \\ & + k [4\pi \varepsilon^{-1} \sigma^2 - \rho_1 U^2 \cdot th(-kh)] + g(\rho_1 - \rho_2) \} = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Из требования вещественности частоты для любых значений волновых чисел, найдем, что дискриминант уравнения (9) должен быть положителен:



a)

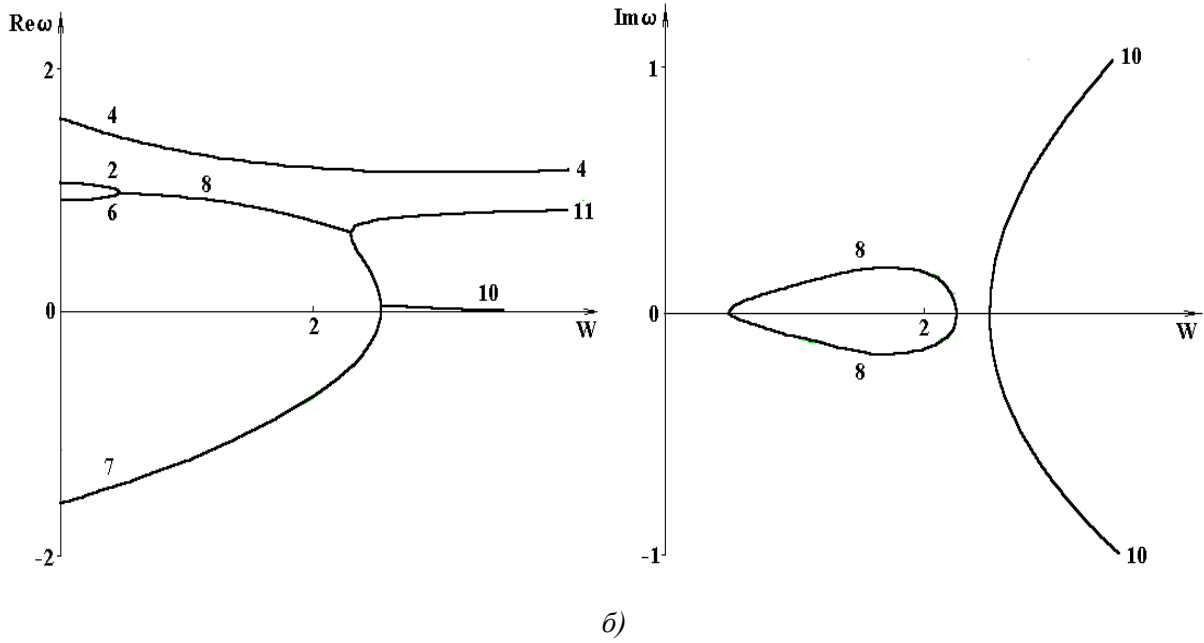


Рис. 4. Зависимости, действительной $Re \omega = Re \omega(W)$ и мнимой $Im \omega = Im \omega(W)$ компонент комплексной частоты от величины заряда на границе раздела жидкостей, рассчитанные при $k = 1$; $\rho_1 = 0,5$; $\alpha_1 = 0,5$; $h = 0,05(a)$, $h = 0,01(b)$, для случая неподвижного верхнего слоя $U = 1$.

$$D_W = -\alpha_2[-\rho_1 \cdot th(-kh) + \rho_2] \cdot k^2 + \left\{ 4\pi\epsilon^{-1}\sigma^2[-\rho_1 \cdot th(-kh) + \rho_2] + \rho_1\rho_2U^2 \cdot th(-kh) \right\} \cdot k - g(\rho_1 - \rho_2)[- \rho_1 \cdot th(-kh) + \rho_2] \geq 0.$$

В случае знака равенства в этом соотношении для границы устойчивости получим:

$$\alpha_2 k^2 - 4\pi\epsilon^{-1}\sigma^2 k + g(\rho_2 - \rho_1) = -\frac{\rho_1\rho_2U^2 k \cdot th(-kh)}{\rho_2 - \rho_1 \cdot th(-kh)}.$$

Перепишем это соотношение в безразмерном виде:

$$\chi^2 - W\chi + (\eta^{-1} - 1) = \frac{V^2 th(-\chi l)}{\eta[th(-\chi l) - 1]} \chi; \quad (10)$$

$$\eta = \frac{\rho_1}{\rho_2}; \quad V = U \left[\frac{\rho_2}{\alpha_2 g} \right]^{\frac{1}{4}}; \quad \alpha^2 \equiv \frac{\alpha_2}{\rho_2 g};$$

$$l = \frac{h}{\alpha}; \quad z^2 = \omega^2 \frac{\alpha}{g}; \quad \chi = ka.$$

Разобьем выражение (10) на сумму двух слагаемых $y_1 + y_2 = 0$.

$$y_1(\chi) = \chi - W + \frac{\eta^{-1} - 1}{\chi}; \quad (11)$$

$$y_2(\chi_2) = \frac{V^2 th(-\chi l)}{\eta[1 - th(-\chi l)]}. \quad (12)$$

Численный анализ показывает, что точка пересечения функций $y_1(\chi)$ и $y_2(\chi)$, то есть решение уравнения (10) будет мало отличаться от точки минимума функции $y_1(\chi)$, приравнявая нулю первую производную по χ от выражения (11), найдем

$$\chi_{\min} = \sqrt{\eta - 1}.$$

Подставляя в (12) $\chi = \chi_{\min} + \mu$, где μ – малое отклонение от χ_{\min} , соответствующее истинному значению корня, найдем критическое минимальное значение скорости верхней жидкости V_* , при которой исчезают устойчивые состояния системы, как функцию η и ε :

$$V_*^2 = \frac{th \left[-l \left(\sqrt{\eta^{-1} - 1} + \mu \right) \right] - \eta^{-1}}{\eta^{-1} th \left[-l \left(\sqrt{\eta^{-1} - 1} + \mu \right) \right]} - \left[\sqrt{\eta^{-1} - 1} + \mu - W + \frac{\eta^{-1} - 1}{(\eta^{-1} - 1) + \mu} \right]. \quad (13)$$

Несложно видеть, что с увеличением высоты слоя жидкости критическая для реализации неустойчивости заряженного тангенциального разрыва величина скорости V_* снижается. Результаты численного расчета по (13) приведены на рис. 5.

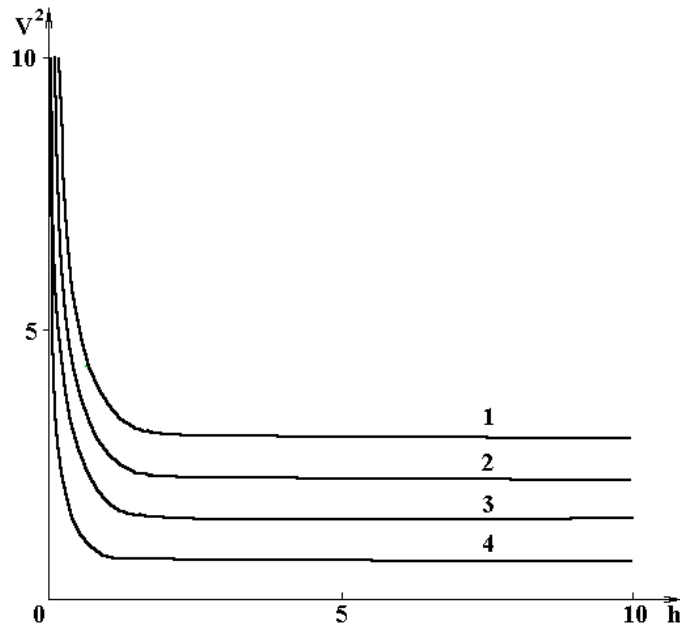


Рис. 5. Зависимости квадрата критического значения скорости верхнего слоя жидкости $U_*^2 = U_*^2(h)$ от толщины этого слоя h , рассчитанные при $\mu=0$; $\eta=2$ и различных значениях W : 1 – 0; 2 – 0,5; 3 – 1; 4 – 1,5.

Выражение (13) можно записать так, чтобы было видно, как влияет высота слоя жидкости на критические условия реализации неустойчивости Тонкса-Френкеля:

$$W = - \frac{V_*^2 \eta^{-1} th \left[-l \left(\sqrt{\eta^{-1} - 1} + \mu \right) \right]}{th \left[-l \left(\sqrt{\eta^{-1} - 1} + \mu \right) \right] - \eta^{-1}} + \left[\sqrt{\eta^{-1} - 1} + \mu \right] + \frac{\eta^{-1} - 1}{\eta^{-1} - 1 + \mu}. \quad (14)$$

Результаты численного расчета по (14) приведены на рис. 6. Из (14) и рис. 6 видно, что с увеличением толщины слоя верхней жидкости критическое для начала неустойчивости значение параметра W снижается и это снижение тем более существенно, чем больше скорость движения верхнего слоя жидкости.

Численные расчеты по формулам (13) и (14) показывают, что расчетные значения параметров V_*^2 и W весьма слабо зависят от μ , и следовательно, соотношениями (13) и (14) вполне можно пользоваться в качественном анализе.

5. Конечность толщины слоя верхней жидкости сказывается на критических условиях реализации неустойчивостей Кельвина-Гельмгольца и Тонкса-Френкеля лишь при весьма малых толщинах верхнего слоя, сравнимых с капиллярной постоянной нижней жидкости. При малых толщинах слоя верхней жидкости имеет место взаимодействие капиллярных

движений, порождаемых свободной поверхностью верхней жидкости и границей раздела сред, приводящее к появлению дополнительной колебательной неустойчивости.

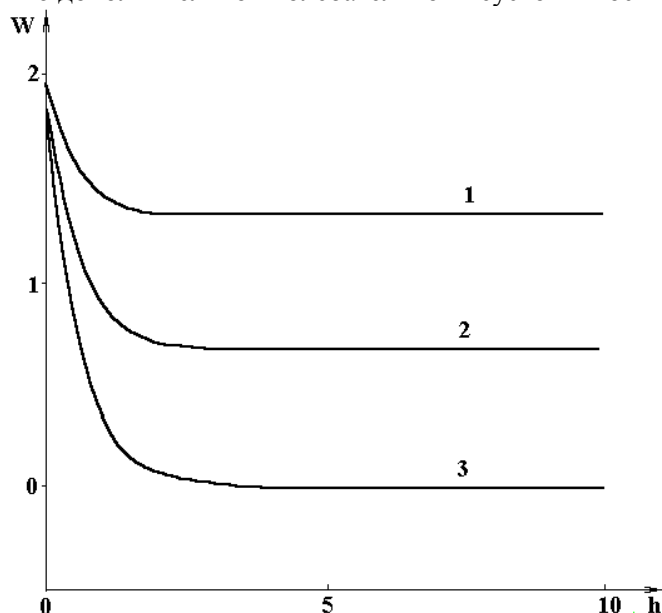


Рис. 6. Зависимости критического значения поверхностной плотности заряда $W = W(h)$ от толщины движущегося жидкого слоя при различных значениях квадрата его скорости и $\mu = 0$; $\eta = 2$; U^2 : 1 – 0; 2 – 1; 3 – 2; 4 – 3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Miles J.W. The generation of surface waves by wind // Appl. Mech. Rev. 1962. V.15. № 9. P. 685–687.
2. Hinch E.J. A note on the mechanism of the instability at the interface between two shearing fluids // J. Fluid Mech. 1984. V. 144. P. 463–465.
3. Hooper A.P., Boyd G.C. Shear-flow instability at the interface between viscous fluids // J. Fluid Mech. 1983. V. 128. P. 507–528.
4. Sneyd A.D. Stability of fluid layers carrying a normal electric current // J. Fluid Mech. 1985. V. 156. P. 223–236.
5. Sydora R.D. et al. Electrostatic Kelvin-Helmholtz instability in a radially injected plasma cloud // Phys. Fluids. 1983. V. 26. № 10. P. 2986–2991.
6. Кузнецов В.М., Лушников П.М. Нелинейная теория возбуждения волн ветром за счет неустойчивости Кельвина-Гельмгольца // ЖЭТФ. 1995. Т. 108. № 2. С. 6144–630.
7. Григорьев О.А., Ширяева С.О. Неустойчивость заряженной плоской поверхности тангенциального разрыва двух несмешивающихся жидкостей различных плотностей // ЖТФ. 1996. Т. 66. № 2. С. 23–34.
8. Григорьев А.И., Коромыслов В.А., Ширяева С.О., Григорьев О.А. Неустойчивость заряженной сферической поверхности в обтекающем потоке идеальной жидкости // ЭОМ. 1998. № 1–2. С. 48–50.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М., 1982.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М., 1986.

Поступила 10.11.99

Summary

The dispersion equation for capillary motions for inviscid twolayer fluid acted by gravity is derived and investigated both analytically and numerically when there is a charge on the interface of the layers and when upper layer move along the interface. It was supposed that an upper layer thickness is finite but uderlayer has an infinite depth. The characteristic property of the Tonks-Frenkel instability and the Kelvin-Helmholtz instability are investigated.

ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ТЕЧЕНИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ДИСПЕРГИРОВАНИЕ СЛАБОПРОВОДЯЩИХ ДИСПЕРСИОННЫХ СРЕД

*Институт теплофизики экстремальных состояний РАН,
ул. Ижорская, 13/19, г. Москва, 127412, Россия*

Разработана электрохимическая теоретическая модель ионообразования для описания электрогидродинамических течений слабопроводящих дисперсионных сред от тонких высоковольтных электродов. Теория дополнена моделированием микропробоев, наблюдаемых в окрестностях этих электродов. Теоретически моделируется также влияние рассматриваемых течений на диспергирование с целью применения для разработки конструкций электрогидродинамических диспергаторов (эмульгаторов). Выведено условие нормальной работы этих устройств, являющееся условием малостизоновых радиусов микропробоев. По предложенной теории максимальные радиусы зон пробоев пропорциональны приложенным напряжениям. Получены также теоретически формулы для расчетов радиусов измельчения капель в зависимости от приложенного напряжения, которые сопоставлены с измерениями этих радиусов при испытании опытного образца диспергатора, конструкция которого описана. Результаты сопоставления свидетельствуют о возможности применения предложенной теории для разработки конструкций электрогидродинамических диспергаторов.

Исследуется электрохимическое взаимодействие тонких высоковольтных электродов, близких к точечным, с слабодиссоциирующим дисперсионными средами и его влияние на гидродинамику и диспергирование этих сред: образование ионов в таких средах у электродов, появление избыточной концентрации ионов одного знака и кулоновских сил, а также течений, обусловленных такими силами и влияющих на диспергирование [1]. Рассматриваемые электроды типа иглы или сферы малого по сравнению с межэлектродным расстоянием радиуса (рис. 1) будем называть активными, когда и размеры противоиэлектрода велики по сравнению с их размерами. Форму активного электрода малых размеров можно при этом считать близкой к сферической с характерным радиусом r_0 (рис. 1). Ниже будет показано, что в таких условиях результаты расчетов характеристик электрогидродинамических явлений, обусловленных электрохимическим взаимодействием рассматриваемых сред с высоковольтными электродами, при предельном переходе к точечному электроду не зависят ни от r_0 , ни от формы противоиэлектрода.

При этом такие противоиэлектроды можно считать отнесенными на бесконечные расстояния. Расчет энергии, выделяемой для возможности осуществления микропробоя, препятствующего работе электрогидродинамического устройства с рассматриваемым активным электродом, при известных из экспериментов величинах напряжения $U = [\varphi_w]$, где φ_w – потенциал активного электрода, проводится в настоящей работе для последующего расчета максимальной длины l_{\max} микропробоя в окрестности иглы.

Для нормальной работы диспергатора, а также других ЭГД устройств такого типа требуется, чтобы l_{\max} была очень маленькой. Наряду с методикой расчета l_{\max} изложим здесь методику расчета скоростей \vec{V} , наблюдаемых при малых l_{\max} течениях от высоковольтной иглы и их влияния на процесс ЭГД-диспергирования. Расчет проводится с учетом влияния сильного электрического поля на скорость ионизации нейтральной и примесной компонент среды по Френкелю [2].

В отсутствие приложенного электрического поля слабую, по сравнению с сильными электролитами или сильно ионизованной плазмой, проводимость такой среды

$$\sigma_0 = n_0(b_+ + b_-)e \quad (1)$$

считаем обусловленной, как и в этих более ионизованных средах, наличием макроскопических концентраций n_{\pm} зарядов разных знаков с соблюдением плазменного условия квазинейтральности

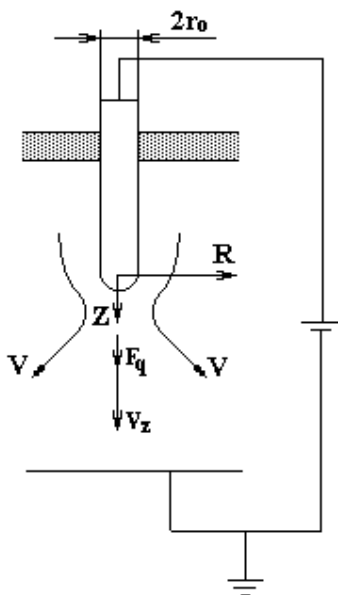


Рис. 1. Простейшая схема течений слабопроводящих сред от тонких высоковольтных осесимметричных электродов (R и Z – радиальная и осевая координаты цилиндрической системы координат, связанной с активным электродом); F_q – интегральная кулоновская сила, вызывающая такие течения в сильном неоднородном электрическом поле со скоростью V .

$$n_{+0} \approx n_{-0} = n_0. \quad (2)$$

Ниже будет показано, что в сильных полях это условие выполняется не всегда, а также, что n_{\pm} отличается от низковольтных концентраций зарядов $n_{\pm 0}$, в формуле (1) b_{\pm} макроскопические эффективные подвижности в средах этих зарядов, предполагаемые константами и в предпробойных полях, e – величина элементарного заряда, равного для одновалентных ионов и свободных электронов заряду протона, а для ионов большей валентности произведению этого заряда на валентность. Коэффициент рекомбинации зарядов K_r , скорость которой $W_r = K_r \cdot n_+ \cdot n_-$, считаем зависящей от b_{\pm} по Ланжевону-Онзагеру [3]:

$$K_r = \frac{(b_+ + b_-) \cdot e}{\varepsilon}. \quad (3)$$

В такой модели свободные электроны считаются составляющей отрицательно заряженной компоненты, а их наличие учитывается в величинах b_{\pm} , становящихся различными в присутствии свободных электронов. В (3) ε – диэлектрическая проницаемость среды, растущая с ростом σ_0 . Таким образом, до пробоя исследуемая среда теоретически моделируется четырехкомпонентной смесью, в которой наряду с заряженными и нейтральной компонентами, как правило, имеется и примесная, причем влияющая на проводимость σ , а также на σ_0 . По аналогии с (1) $\sigma = (n_+ \cdot b_+ + n_- \cdot b_-) \cdot e$; $\sigma \neq \sigma_0$. Отметим, что в настоящей работе ввиду того, что наряду с предпробойными явлениями исследуется и пробой, теоретическая модель ионизации, описанная в предыдущих работах первого автора

* В [3] предполагается, что ионизация слабопроводящих сред осуществляется только ввиду диссоциации примесей. В других работах предполагается, что ионизация слабопроводящей среды обусловлена ионизацией только нейтральной компоненты. Здесь считается, что σ_0 может быть обусловлено как ионизацией примесей, так и нейтралов среды-носителя и для осуществления диспергирования выполняются условия (4).

Кроме того, в рассматриваемых конденсированных дисперсионных средах степень прилипания электронов достаточно высока, в связи с чем и не вводится дополнительной электронной компоненты при описываемом теоретическом моделировании.

этой статьи, усложнена введением примесной компоненты. Возможно и дальнейшее усложнение моделей введением отдельной электронной компоненты, как это нередко делается при моделировании плазмы. Но здесь для расчета энергии электровзрыва по приложенному напряжению U этого не делается, как и для расчета других величин. Для определения макроскопической концентрации примесей n_p нередко в литературе используют уравнения типа уравнений конвективной диффузии. В настоящей работе до пробоя и диспергирования будем предполагать n_p , как и концентрацию нейтралов n_{a0} , постоянными и удовлетворяющими неравенствам:*

$$n_{\pm} \ll n_p \ll n_{a0}. \quad (4)$$

Здесь предполагается, что происходит пробой нейтральной компоненты, а не малых примесных добавок, причем именно нейтралами определяется плотность $\rho_0 \approx n_{a0} \cdot m_a$ слабопроводящей среды до пробоя в соответствии с (4). При этом m_a – масса элементарной частицы нейтрала (молекулы или атома).

Неравенство (4), которое нельзя применять в сильных электролитах и сильно ионизированной плазме, можно считать условием слабой проводимости среды, скорость ионизации которой $W_I(n_a, n_p, T, \vec{E})$, как термодинамическую функцию состояния от температуры T , плотности $\rho \approx n_a \cdot m_a$, а также других термодинамических переменных n_p и напряженности макроскопического электрического поля \vec{E} , предполагаем линейной по n_a .

Коэффициент пропорциональности K_I такой нередко применяемой в литературе линейной зависимости от n_a :

$$W_I(T, \vec{E}, n_p, n_a) = K_I(T, \vec{E}, n_p) n_a, \quad (5)$$

определяется эмпирически по Аррениусу [4–7]

$$K_I(T, \vec{E}, n_p) = C_{exp} \left\{ -\frac{U_i(\vec{E})}{kT} \right\}. \quad (6)$$

Теоретически помимо наших работ соотношение Аррениуса (6) в какой-то мере обосновано в [4, 5], где K_I , как и в [3], а также во многих других литературных источниках называется константой ионизации. Влияние примесей в [5] на скорость ионизации и σ_0 , в отличие от наших публикаций, не учитывается. В [5] считается, что K_I , как функция состояния, удовлетворяет уравнению классической статистики Больцмана-Гиббса:

$$\frac{\partial K_I(T, \vec{E}, n_p)}{K_I \partial T} = \frac{U_i}{kT^2}. \quad (7)$$

В (6) аналогичное соотношение выписывается для W_I , которую, по нашему мнению, более целесообразно использовать для теоретического обоснования уравнения Аррениуса (6). При условии (5) уравнение для W_I по [5] также переходит в (7), откуда [6] получается обычным интегрированием по T . Константа такого интегрирования C в (6) зависит от n_a и n_p и не зависит от \vec{E} , как показано нами в [6]. Более сложные уравнения аррениусовского типа теоретически получены методами микрокинетики в [7]. Здесь для W_I будем ограничиваться уравнением Аррениуса (6) и будем определять, как и в [6], C по низковольтной проводимости среды σ_0 (в [6] влияние примесей на σ_0 не учитывается). В слабых полях σ_0 определяют в ячейке с плоскопараллельными электродами, предполагая, что соблюдается классический закон Ома, по измеряемой вольт-амперной характеристике. При этом пренебрегают приэлектродными падениями потенциалов в ионизационно-неравновесных пограничных (строго говоря, здесь речь идет о равенстве или балансе макроскопических скоростей ионизации и рекомбинации или химическом равновесии). В то же время в [7], где выражения для K_I получены при исследовании микропроцессов, понятие равновесия имеет несколько другой смысл. В условиях макроскопического химического равновесия, выведенных, в частности, нами в [8], K_I для слабых полей можно считать равной K_I в отсутствие электрического поля:

$$K_I(O, T_0, n_p) = \frac{K_r n_0^2}{n_{a0}} = \frac{\sigma_0^2 m_a}{\varphi_0 (b_+ + b_-) e}. \quad (8)$$

При получении (8) из условия

$$W_I = W_r, \quad (9)$$

где W_r определяется из (2) использовалось также соотношение Ланжевена-Онзагера (3), а также

равенство T и комнатной температуры T_0 среды в условиях изотермичности, которые применимы до пробоя рассматриваемых сред, а из (8) и (6)

$$C = \frac{\sigma_0^2 m_a \exp\left\{\frac{V_i(0)}{kT_0}\right\}}{e\epsilon\rho_0(b_+ + b_-)}. \quad (10)$$

Потенциал ионизации $U_i(0)$ в (10) при отсутствии макроскопического электрического поля, напряженность которого

$$\vec{E} = -\nabla\varphi, \quad (11)$$

наиболее просто рассчитывается как

$$U_i(0) = \int_{r_a}^{\infty} \frac{e^2 dr}{4\pi\epsilon r^2} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon r_a}. \quad (12)$$

В (11) и (12) φ – потенциал электрического поля; r_a – радиус элементарной частицы ионизирующей среды (молекулы или атома в зависимости от структурного состава); эффект снижения U_i при наложении сильного макроскопического электрического поля количественно оценен в [1, 4]. Для элементарной пары связанных зарядов $A^+ B^-$ (рис. 2), величина r_M , называемая максимумом потенциального барьера B^- относительно A^+ определяется из уравнения

$$e^2 / 4\pi\epsilon r_M^2 = e|\vec{E}|, \quad (13)$$

где $r_M = OC$ (рис. 2), откуда

$$V_i(\vec{E}) = V_i(0) - \frac{e^{3/2} |\vec{E}|^{1/2}}{(\pi\epsilon)^{1/2}}. \quad (14)$$

Искомое уменьшение ΔV_i при этом определяется как сумма

$$\int_{r_M}^{\infty} \frac{e^2 dr}{4\pi\epsilon r^2} + e|\vec{E}|r_M. \quad (15)$$

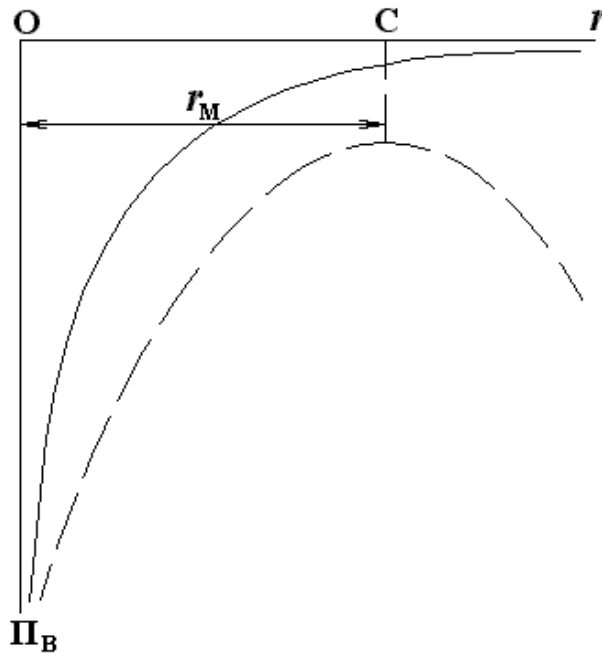


Рис. 2. График потенциальной энергии Π электрона B^- относительно атома (ядра) A^+ слабопроводящей среды с центром O с учетом только кулоновского взаимодействия: сплошная линия – в отсутствие макроскопического электрического поля, пунктирная – в сильном поле (то же самое для молекулы AB с ионной химической связью).

Первое слагаемое в (15) описывает снижение Π_{B^-} потенциальной энергии V^- относительно A^+ , ибо в отсутствие \vec{E} (рис. 2)

$$\Pi_{B^-} = \int_{r_a}^{\infty} \frac{e^2 dr}{4\pi\epsilon r^2},$$

в соответствии с (12).

Второе слагаемое является дополнительным вкладом в Π_{B^-} при $\vec{E} \neq 0$ энергии приложенного электрического поля. Близкий к френкелевскому результат для зависимости $K_I(\vec{E})$ получен Онзагером [3] методами классической микрокинетики в виде аналитической и при $\vec{E} = 0$ функции Бесселя мнимого аргумента. В сильных полях эта функция аппроксимируется френкелевской экспонентой с поправочным множителем, выведенным нами в предыдущих публикациях. Применяемое нами ранее условие изотермичности [8] можно использовать при малых длинах волн пробоя l , ибо эксперименты показывают, что микропробой в окрестности игольчатого электрода нередко наблюдается и до появления электрогидродинамических течений, то есть при напряжениях более низких, чем пороговое напряжение U_* , при котором наблюдаются, в частности, течения от острия (рис. 1). Для расчета энергии, необходимой микропробоем, будем использовать ионизационную теорию наших предыдущих работ [6, 8–10] в бездиффузионном приближении с учетом влияния электрического поля на K_I по (6), (13), а также, не учитывая это влияние на W_r , согласно Онзагеру [3].

Будем использовать макроскопическую систему уравнений бездиффузионного приближения для n_{\pm} без учета газодинамического конвективного переноса зарядов течениями, обусловленными полем высоковольтного активного электрода (рис. 1). Тогда эти уравнения можно решать независимо от газодинамических уравнений. Влиянием индуцированных магнитных полей до пробоя будем пренебрегать. Тогда вместе с уравнениями электрического поля, сводящимися к уравнению Пуассона для ϕ , дифференциальные уравнения для n_{\pm} образуют математически замкнутую систему уравнений с учетом изменений по времени t :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial n_{\pm}}{\partial t} \pm \text{div}(n_{\pm} b_{\pm} \vec{E}) &= K_I(0) \exp\left(\beta |\vec{E}|^{1/2}\right) - K_r n_{\pm} n_{\mp}; \vec{E} = -\nabla \phi \\ \text{div}(\epsilon \vec{E}) &= g \cdot \beta = \frac{e^{3/2}}{(\pi\epsilon)^{1/2} kT_0} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

В (16) $g = (n_+ - n_-) e$ – плотность образующегося в среде объемного заряда [10]. Переходя от n_{\pm} к переменным g и σ и используя соотношение Ланжевена-Онзагера (2), получаем из (16) для случая сферической симметрии и установления:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dE}{dr} + \frac{2E}{r} &= \frac{g}{\epsilon} = -\frac{E}{\sigma} \cdot \frac{d\sigma}{dr}, \\ \epsilon b_+ b_- E \frac{dg}{dr} &= \sigma_0^2 \exp\left(\beta |E|^{1/2}\right) - \sigma^2 + (b_+ - b_-) g \sigma, \\ \beta &= \frac{e^{3/2}}{(\pi\epsilon)^{1/2} kT_0} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

В векторной форме уравнения типа (17) выглядят аналогично [8] с добавлением последнего из уравнений (16), которое для одномерного случая вообще и для случая сферической симметрии, в частности, выполняется автоматически. Граничными условиями для уравнений (17) на бесконечности являются условия $g = 0$ и $\sigma = \sigma_0$. Этих условий достаточно для единственности только асимптотических решений уравнений (17) и то только потому, что порядок системы (17) можно понизить с учетом ее первого интеграла:

$$\sigma E = \frac{I \cdot \text{sign} \phi_w}{4\pi r^2}. \quad (18)$$

В (18) константа первого интеграла выражена через электрический ток I , который наряду с V может быть определен из измерений. Для продолжения асимптотических и равновесных решений, удовлетворяющих условию (9) до границы диффузионного погранслоя, а также для получения

неравновесных решений уравнений (17) недостающее граничное условие на поверхности активного электрода (рис. 1) можно задавать в виде зависимости одной из плотностей тока на электрод от пары электрод – слабопроводящая среда [8].

В настоящей работе рассмотрим только такие наблюдаемые в некоторых экспериментах условия, когда длина l пробойного промежутка в среде, являющейся окрестностью активного электрода, близкого к точечному, или волны пробоя не зависит от материала электрода и знака его заряда. Как показано в предыдущих работах первого автора [8-10], таким условиям соответствуют случаи ионизационного макроскопического равновесия (9). Основным безразмерным критерием такого равновесия в бездиффузионном приближении является неравенство:

$$\sigma = \frac{2b_* \varepsilon E_*}{\sigma_0 L \exp(\beta E_*^{1/2} / 2)} \ll 1, \quad (19)$$

получаемое из последнего уравнения системы (17).

В (19) L – характерный размер задачи, а для электродов, близких к точечным $L = r_0$ – малому размеру активного электрода, $E_* = V/L = V/r_0$. Для сред, удовлетворяющих соотношению Ланжевена-Онзагера (3), неравенство (19) одновременно является и плазменным условием квазинейтральности слабопроводящих сред в сильных электрических полях. При этом второе из уравнений (17) упрощается и выглядит следующим образом вне неравновесных погранслоев

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sigma_0 \exp\left(\frac{\beta}{2}|E|^{1/2}\right) \\ \beta &= \frac{e^{3/2}}{(\pi\varepsilon)^{1/2} kT_0} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Формула (20) впервые была получена Френкелем [2], который постулировал условия ионизационного равновесия, не выписывая неравновесных уравнений (16), как и Онзагер в [3], получивший близкую к (20) в сильных полях формулу для зависимости $\sigma(\vec{E})$. Формула (20) известна в литературе как закон Френкеля. Обобщение этого закона для нестационарных эффектов, наблюдаемых, во всяком случае, сразу после наложения электрического поля, получено первым автором в [9] как аналитическое решение получаемых из (16) при выполнении (3) нестационарных уравнений в переменных g и σ , соответствующих (17) при $\delta \ll 1$ и лапласовском электрическом поле. Для френкелевской модели влияние электрического поля на скорость ионизации среды (рис. 2) и для случая сферической симметрии это обобщение выглядит так:

$$\frac{\sigma(r,t) - \sigma_0 \exp\left(\frac{\beta}{2}|E|^{1/2}\right)}{\sigma(r,t) + \sigma_0 \exp\left(\frac{\beta}{2}|E|^{1/2}\right)} = \frac{\left[1 - \exp\left(\frac{\beta}{2}|E|^{1/2}\right) \exp\left(-\frac{2t}{\tau}\right)\right]}{1 + \exp\left(\frac{\beta}{2}|E|^{1/2}\right)}, \quad (21)$$

$$E = V_{r_0} / r^2; \quad \beta = e^{3/2} / (\pi\varepsilon)^{1/2} kT_0.$$

При получении (21) использовалось также стандартное начальное условие $\sigma = \sigma_0$ при $t = 0$.

Кроме того, в (21) $\tau = \varepsilon / \sigma_0 \exp\left(\frac{\beta}{2} \frac{V_{r_0}}{r^2}\right)$ – время релаксации зарядов, которое мало и для слабопроводящих сред в сильных полях. Расчет энергии, необходимой для осуществления пробоя среды в окрестности активного электрода, будем проводить при $t \gg \tau$, считая, что распространение волны пробоя происходит при таких t , что подтверждается в некоторых экспериментах. Из (18) и (20) получается аналитическое решение для E выписываемых уравнений в виде трансцендентного уравнения:

$$E_{\exp}\left(\frac{\beta}{2}|E|^{1/2}\right) = \frac{I \text{sign} \varphi_w}{4\pi\sigma_0 r^2}. \quad (22)$$

Из (22) следует знакоопределенность E в зависимости от знака заряда или потенциала электрода, причем $\text{sign} E = \text{sign} \varphi_w$, как и для обычного лапласовского поля сферической симметрии в незаряженных средах. Кроме того, из (22) можно получить более строго условие отличия самосогласованного электрического поля от внешнего, совпадающее с условием слабого влияния поля на

ионизацию рассматриваемых сред [10]. Такое же решение можно получить, непосредственно интегрируя уравнения (17) без учета неравновесных членов во втором из этих уравнений. Потенциал электрического поля φ по (22) с граничным условием $\varphi(\infty)=0$ определяется из (17) непосредственно аналитическим интегрированием неявно заданной функции (22)

$$\varphi(r) = \int_r^{\infty} E dr = \left(\frac{I}{\pi\sigma_0} \right)^{1/2} \left\{ \frac{4}{\beta} \left[1 - \exp\left(-\frac{\beta}{4} |E|^{1/2} \right) \right] - |E|^{1/2} \exp\left(-\frac{\beta}{4} |E|^{1/2} \right) / 2 \right\} \text{sign} \varphi_w. \quad (23)$$

При этом напряжение U зависит в сильных полях нелинейно* от тока I и наоборот:

$$V = \left| \int_{r_0}^{\infty} E dr \right| = \left(\frac{I}{\pi\sigma_0} \right)^{1/2} \left\{ \frac{4}{\beta} \left[1 - \exp\left(-\frac{\beta}{4} E_0^{1/2} \right) \right] - E_0^{1/2} \exp\left(-\frac{\beta}{4} E_0^{1/2} \right) / 2 \right\},$$

$$E_0 = E(r_0). \quad (24)$$

В предельном случае

$$\beta |\vec{E}_0|^{1/2} \gg 1 \quad (25)$$

получается квадратичная зависимость $I(V)$. Промежуточный случай может быть использован для описания аналогов тлеющего разряда. В слабых полях, а также вплоть до полей, удовлетворяющих условию [10]

$$\beta E_0^{1/2} \ll 1, \quad (26)$$

при котором поле образующегося объемного заряда не влияет на приложенное внешнее (безиндукционное приближение), теоретическая вольт-амперная характеристика линейна. Неразвитые течения, обусловленные кулоновскими силами, в некоторых средах наблюдаются и при такой зависимости $I(V)$, как и микропробой в слабопроводящих средах. Расчет скоростей таких неразвитых течений проводится нами в [9]. В противоположном предельном случае (25) наблюдаются развитые течения вплоть до пробоя всего межэлектродного промежутка. Расчет таких течений также проводился первым автором настоящей публикации [8]. Линейность $I(V)$, полученная нами теоретически из (24) в предельном случае (26) и ее квадратичность в предельном случае (25) согласуется с соответствующими участками эмпирических вольт-амперных характеристик, представленных в [12].

Плотность объемного заряда, образующегося в среде, определяется при этом теоретически дифференцированием неявно заданной функции (22). При этом для определения пространственного распределения g получается следующее выражение

$$\left. \begin{aligned} g &= \frac{\varepsilon\beta E |E|^{1/2}}{2r \left(1 + \beta |E|^{1/2} / 4 \right)}; \\ E_{\text{exp}} \left\{ \left(\frac{\beta}{2} |E|^{1/2} \right) \right\} &= \frac{I \text{sign} \varphi_w}{4\pi\sigma_0 r^2}; \\ \beta &= \frac{e^{3/2}}{(\pi\varepsilon)^{1/2} kT_0}. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Из (27) видно, что $\text{sign} g = \text{sign} \varphi_w$, а также можно показать, что g монотонно убывает с ростом r , как и E , по (22). Графики таких монотонно убывающих функций приведем здесь для E по (22).

На рис. 3 распределение E представлено в безразмерных переменных $\vec{E} = E / E_0$ и $\vec{r} = r / r_0$.

*Отметим, что аналогичная задача для случая цилиндрической симметрии аналитически не решается. В то же время в случае униполярного коронного разряда [9] при $\delta \gg 1$ задача расчета вольт-амперной характеристики аналитически решается для поля в межэлектродном промежутке цилиндрического конденсатора и приводится к неинтегрируемой в элементарных функциях для сферического. Подробно на это обстоятельство обращается внимание в работах Тиходеева (см. [11]), в которых, как и во многих других публикациях по теории коронного разряда в газах, образование объемного заряда в слабопроводящих средах при наложении электрических полей стимулируется, в отличие от публикаций первого автора настоящей статьи, а также рассматривается только случай униполярной внешней зоны разряда.

Пунктирной линией изображена кривая внешнего поля сферической симметрии $1/\bar{r}^2$; из графика видно, что определяемая по (25) g с ростом I или V влияет на E . Монотонность E при этом сохраняется. Отметим, что аналогичное решение для согласованного электрического поля в продуктах горения заряженной сферической частицы, полученное нами в [6], не является монотонно убывающей функцией r в отличие от (23)*. Вне неравновесных погранслоев интегральный объемный заряд с g , определяемой по (27), можно также получить аналитически, интегрируя это выражение (27) в сферических координатах с учетом соответствующего Якобиана преобразования декартовых координат к сферическим.

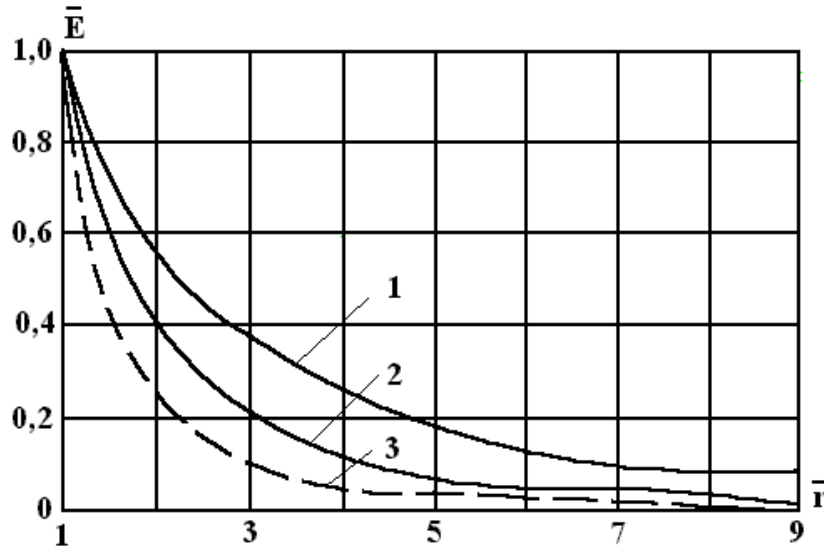


Рис. 3. Пространственное распределение напряженности самосогласованного электрического поля в электролитической ячейке со сферическим высоковольтным конденсатором и слабым электролитом с малыми добавками конденсированной дисперсной фазы: 1 — $BE_0^{1/2}/2 = 3$; 2 — $BE_0^{1/2}/2 = t$; 3 — $1/r^2$.

Полученное выражение для $Q = \int_V g dV$, где dV — элемент объема, выглядит следующим образом:

$$Q = \frac{\varepsilon}{\sigma_0} I \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\beta}{2}|E_0|^{1/2}\right) \right\} \text{sign} \varphi_w,$$

$$E_0 \exp\left(\frac{\beta}{2}|E_0|^{1/2}\right) = \frac{I \text{sign} \varphi_w}{4\pi\sigma_0 r_0^2},$$

$$\beta = \frac{e^{3/2}}{(\pi\varepsilon)^{1/2} kT_0}.$$

В общем случае можно считать, что пробой обусловлен точечным источником, если выполняется критерий точечности по энергии. Ранее [13] нами уже выписывался критерий точечности кулоновской силы $\bar{F}_g = \int_V g \bar{E} dV$ (рис. 1). Аналогичный критерий точечности энергии источника электрического поля выглядит следующим образом:

$$\int_V g \varphi dV < \frac{A}{r^3 + \gamma_0}; \quad \gamma_0 > 0. \quad (29)$$

*Такая немонотонность подтверждается экспериментально, как и монотонность неявно заданных функций (22) и (23), наряду с отличием от лапласовости. Такое пренебрежение обосновано только при условии сохранения слабой поляризуемости и проводимости рассматриваемых сред в предпробойных полях. Рост же квазиинтеральной концентрации зарядов электролитического типа в таких средах [2–4], хоть и достаточно интенсивен, как и электроконвекция, но дает вклад в Q по (17) только своим градиентом.

При получении (29), как и при расчете энергии электровзрыва, не учитывается, влияние джоулева нагрева и поляризации на величину этой энергии. То есть, следуя терминологии, принятой в [12], здесь нами пока рассматривается только теория ионизационного пробоя без учета теплового и других типов пробоя при расчете энергии точечного электровзрыва*, но не при расчете длин волн пробоя.

Непосредственной проверкой нетрудно убедиться, что в условиях ионизационного равновесия, когда g определяется по (27), а φ по (23), условие (29) выполняется. В описанном в [9] наряду с равновесным случаем сильно неравновесной ионизации в отличие от равновесного полученные неравновесные решения для распределений g и φ убывают по r гораздо менее резко и условию (29) не удовлетворяют. Из (24), (26) для W получается:

$$\left. \begin{aligned} W = |Q|V = \frac{\varepsilon}{\pi} \left(\frac{I}{\sigma_0} \right)^{3/2} & \left\{ \frac{4}{\beta} \left[1 - \exp \left(-\frac{\beta}{4} |E_0|^{1/2} \right) \right] - \right. \\ & \left. - E_0^{1/2} \exp \left(-\frac{\beta}{4} |E_0|^{1/2} \right) / 2 \right\} \left\{ 1 - \exp \left(-\beta |E_0|^{1/2} \right) \right\}, \\ E_0 \exp \left[\frac{\beta}{2} (|E_0|^{1/2}) \right] &= \frac{I}{4\pi\sigma_0 r_0^2}, \\ \beta &= \frac{e^{3/2}}{(\pi\varepsilon)^{1/2} kT_0}. \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Аналогично можно выписать выражение для зависимости $W(V)$. Из (23), (28) видно, что безиндукционным приближением можно пользоваться для расчета W , как и ранее для расчета F_g [8] только при условии (26). Рассматриваемые конденсированные среды будем предполагать несжимаемыми ($\rho \approx \rho_0$).

Кроме того, будем предполагать, что до пробоя электрическое поле слабо влияет и на давление, так что в среде $p = p_0$ (31) – давлению при нормальных условиях (за исключением малой окрестности иглы).

Для несжимаемых конденсированных сред в условиях неавтономности решение гидродинамических уравнений без учета вязкости может быть, в отличие от газодинамических уравнений, получено аналитически [14]. При этом для наибольшего радиуса l_{\max} внутренней полости зависимость получается следующей:

$$l_{\max} = \sqrt[3]{\frac{3}{25\pi} \cdot \frac{W}{p_0}}. \quad (32)$$

Подставляя в (32) выражение (30) для W в предельном случае (25):

$$\frac{\beta}{2} E_0^{1/2} \gg 1, \quad W = \frac{4\varepsilon}{\pi\beta} \left(\frac{I}{\sigma_0} \right)^{3/2}, \quad (33)$$

при котором микропробой в окрестности острия в экспериментах со слабопроводящими жидкостями, наблюдается более отчетливо, получаем достаточно простую формулу для l_{\max}

$$l_{\max} = \sqrt[3]{3eU} / \sqrt[3]{400\pi k^2 p_0 T_0^2}, \quad (34)$$

в которой максимальный радиус зоны микропробоя линейно зависит от приложенного напряжения. Это напряжение для нормальной работы электрогидродинамических диспергаторов и других устройств, в которых используются течения слабопроводящих сред, обусловленные внешним электрическим полем, должно удовлетворять неравенству, получаемому из условия $l_{\max} \ll d$ (межэлектродное расстояние) и формулы (34):

$$\frac{\sqrt[3]{3eU}}{\sqrt[3]{400\pi k^2 P_0 T_0^2 d}} \ll 1. \quad (35)$$

Критерий (35) является также критерием сохранения плазменной идеальности [15] рассматриваемой слабопроводящей несжимаемой среды ($r_0 \ll d$, рис. 1), ибо в противном случае зона пробоя, в которой среда становится неидеальной плазмой, получается достаточно большой. В этой зоне уже не выполняется условие (4) слабой проводимости таких сред. Расчет течений от тонких высоковольтных электродов, проводимый нами в [8, 9], корректен при условии (34), а также при уже упоминаемом критерии точности F_g . В этих случаях вычисленная в [8, 9] $F_g(U)$ при условии (25) выглядит следующим образом

$$F_g = \frac{\varepsilon U^2}{8}. \quad (36)$$

Формула (36) получена интегрированием gE , определяемой (27) по полупространству. В наших более ранних работах при получении этой формулы условий слабого пробоя типа (35) не выводилось (эти условия постулировались). Из полученных ранее формул для скоростей струйных течений приведем здесь формулу из [8] для электрогидродинамической струи Шлихтинга (приближение пограничного слоя):

$$\begin{aligned} v_z &= \frac{3\varepsilon U^2}{64\pi\nu z} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\xi^2}{4}\right)^2}, \\ V_R &= \frac{U}{8Z} \sqrt{\frac{3\varepsilon}{2\pi}} \cdot \frac{\xi - \xi^3/4}{\left(1 + \frac{\xi^2}{4}\right)^2}, \\ \xi &= \frac{U}{8} \sqrt{\frac{3\varepsilon}{2\pi}} \cdot \frac{R}{z}. \end{aligned} \quad (37)$$

Здесь ν – вязкость для ламинарной струи (или кажущаяся вязкость турбулентной).

При этом осевая скорость, как и F_g , квадратично зависит от U , что согласуется с результатами экспериментов [12]. Перейдем теперь к описанию экспериментов по электродиспергированию, методика которых наряду с разработкой установки являются уточнением опубликованных в [1]. Эксперимент проводился на лабораторном эмульгаторе, который представляет собой стеклянную круглую емкость (1), поверх которой одето кольцо из медной фольги (внешний электрод (2)), а внутри помещена латунная трубка с четырьмя иглами на нижнем конце, через которые поступает вода (внутренний электрод (3)). Расстояние от конца игл до внешнего электрода 7 мм (рис. 4,а).

При перемене полярности изменений в процессе диспергации замечено не было, что позволяет применить изложенную теорию. Опыты проводились с дизельным топливом, в который добавлен химический стабилизатор (1%) эмульсии. Процесс образования эмульсии наблюдался только при подводимом напряжении более 30 кВ. Опыт проводился для каждого напряжения отдельно, длился 1 мин, после чего под микроскопом с помощью микрометра определялась величина самых крупных капель ($r_{0\max}$), средних ($r_{0\text{ср}}$) и самых малых ($r_{0\min}$). Измерение капель диаметром менее 5 мкм затруднялось тем, что шкала микрометра проградуирована в десятках микрон, но прослеживается явное уменьшение размеров дисперсной фазы с ростом прилагаемого напряжения U и, как следствие скорости струйных предпробойных течений от игл. Проводилось несколько опытов, но результаты неизменно сводились к одной зависимости. Черточки на графике (рис. 4,б) вместо точек – разброс значений в различных опытах. Начиная с 39 кВ начинается интенсификация образования мелкодисперсной фазы – количество мелких капель растет быстрее, чем до этого.

*При таком условии и условиях точности действия электрического поля (29) справедливо неравенство $L_V \gg L_E$, где L_V – протяженность энергетического влияния электроконвекции, а L_E – электрического поля. При этом можно пренебречь электродинамической энергией, затрачиваемой на диспергирование капель по сравнению с электрогидродинамикой.

Теоретическое обоснование эмпирических зависимостей рис. 4,б будем проводить как на основе изложенной выше теории предпробойной электрогидродинамики и микропробоев слабопроводящих сред в поле игольчатых высоковольтных электродов, так и из следующих соображений. Будем предполагать каплю мишенью, по которой бьет струя движущейся среды на расстоянии $z_0 \gg r_0$ от источника*. Так как размеры капли малы по сравнению с областью натекающей струи жидкости, то достаточно задать расход γ , напор P и время прохождения t_0 струи через каплю (или время изменения r_K при подаче U). Тогда энергия струи

$$P\gamma t_0 = 4\pi\alpha(r_{k\max}^2 - r_K^2), \quad (38)$$

где α – коэффициент поверхностного натяжения капли; $r_{k\max}$ – ее радиус до дробления с разбрызгиванием; r_K – радиус при заданном напряжении U . По Шлихтингу [16] напор в струе $P=p_0$, расход на расстоянии z_0 от источника

$$\gamma = 0,404\sqrt{F_g} \cdot z_0. \quad (39)$$

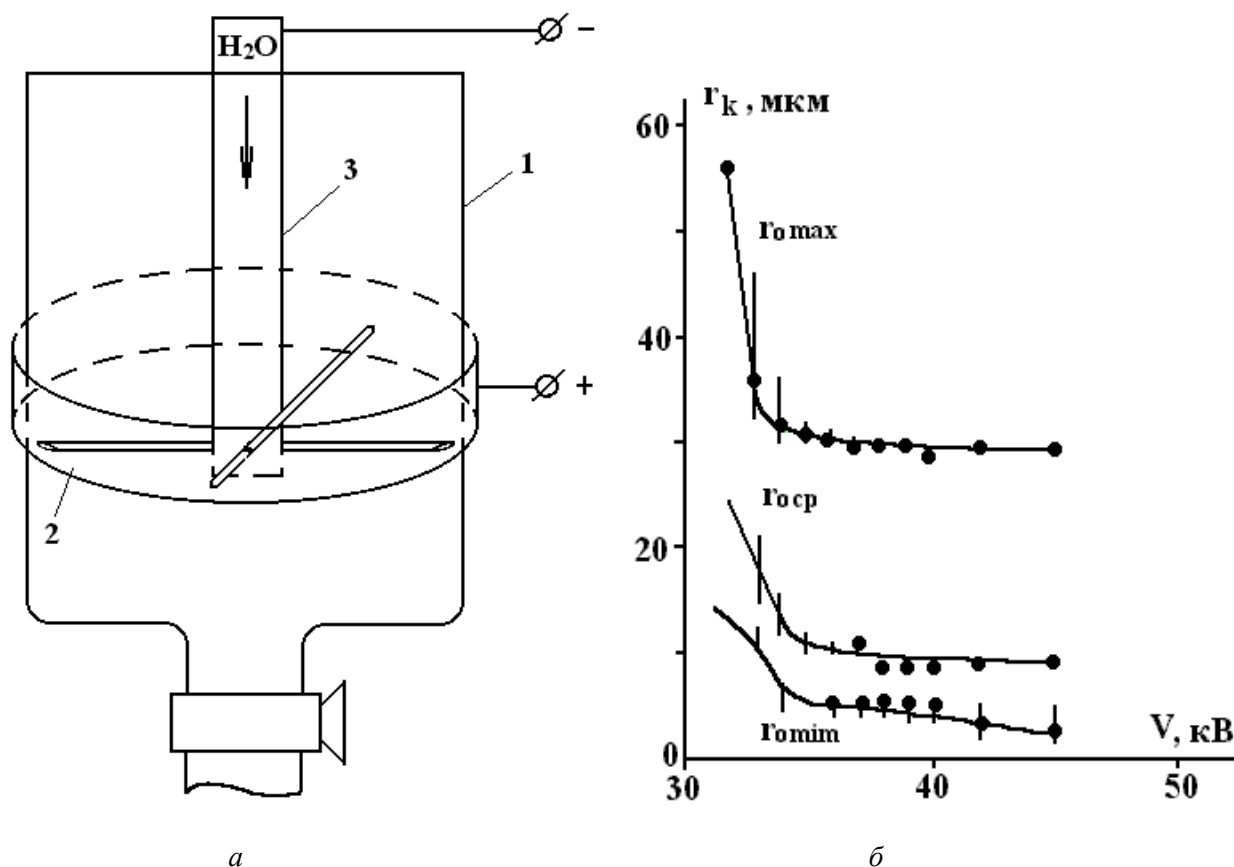


Рис. 4. Результаты обработки испытаний опытного образца электрогидродинамического диспергатора и их сопоставления с теорией: а) схема разработанной конструкции, б) график эмпирических (точки) и теоретических (сплошные кривые) по (40) зависимостей радиусов измельчения дисперсных капель от приложенного напряжения.

Время измельчения t_0 определялось из вышеописанных опытов. Из (38) и (39):

$$r_K = \sqrt{r_{K\max}^2 - \frac{0,05p_0z_0t_0U\varepsilon^{1/2}}{2^{1/2}\pi\alpha}}. \quad (40)$$

Зависимость типа квадратного корня (40), теоретически более удовлетворительно согласуется с результатами проведенных нами экспериментов для более мелких капель. Для оценки влияния на диспергирование более крупных следует учитывать и взаимодействие всех струй от каждой иглы в описанном эксперименте. При этом аналог зависимости (40) будет, видимо, отличаться от корневой, что и наблюдается в экспериментах. Для строгой количественной проверки (40), которая имеет смысл только для эмпирических кривых 1 и 2 (мелкие капли), следует теоретически определить t_0 , при заданном V . Отметим, что разработанная методика применима только в условиях точности с

возможной аналогией гидродинамических затопленных струй и электрогидродинамических от тонких высоковольтных электродов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Апфельбаум М.С., Друтов Л.А., Матюгов П.В. и др.* Электрогидродинамические течения и их влияние на процесс диспергирования // Тезисы докладов 7-й международной школы “Физика импульсных разрядов в конденсированных средах”. Николаев, 1995, С. 115–116.
2. Френкель Я.И. К теории электрического пробоя в диэлектриках и электронных полупроводниках // ЖЭТФ, 1938, Т. 8. Вып. 12. С. 1293–1301.
3. *Onsager L.* Deviation from ohm’s law in weak electrolytes // Journal of Chem. Phys., 1934. V. 2. № 9. P. 599–615.
4. *Stiller W.* Arrhenius equation and nonequilibrium kinetics. Seipzig, Feubmen, 1989.
5. *Plumley H.J.* Conduction of electricity by dielectric liquid at high field strengths // Phys. Rev. 1941. V. 59. № 2. P. 200–207.
6. *Апфельбаум М.С.* Уравнения равновесной ионизации продуктов горения в электрическом поле // Физика горения и взрыва, 1988. Т. 24, № 2. С. 60–65.
7. *Полак Л.С., Хачоян А.В.* Соотношения между сечением прямой и обратной бинарных химических реакций // Химия высоких энергий. 1983. Т. 17. № 4. С. 387–344.
8. *Апфельбаум М.С.* Об одной расчетной схеме электрогидродинамических течений // Электрохимия. 1986. Т. 22. № 11. С. 1473–1480.
9. *Апфельбаум М.С.* Ионизация и течение слабопроводящей жидкости в неоднородном электрическом поле // Электронная обработка материалов, 1988. N. 24. № 1. С. 60–65.
10. *Апфельбаум М.С., Полянский В.А.* Об образовании объемного заряда в слабопроводящих средах // Магнитная гидродинамика, 1982. N. 18. № 1. С. 51–56.
11. *Тиходеев Н.Н.* Дифференциальное уравнение униполярной короны и его интегрирование в простейших случаях // ЖТФ. 1995. Т. 25. Вып. 10. С. 1449–1457.
12. *Остроумов Г.А.* Взаимодействие электрических и гидродинамических полей / Физические основы электрогидродинамики. М., 1979.
13. *Апфельбаум М.С., Козыренко В.Е.* Физическое моделирование и расчет электрогидродинамических течений // Электрохимия. 1991. Т. 27. № 11. С. 855–863.
14. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. М., 1987.
15. *Фортов В.Е., Якубов И.Т.* Физика неидеальной плазмы. Черноголовка. 1984.
16. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М., 1972.

Поступила 29.12.99

Summary

Electrohydrodynamics flows at high nonuniform electric field strength are considered. The influence of this flows on the mixture dispergetion is studied. The experimental results and high-voltage constrictions are described. The mathematical modeling for the theoretical explanation by experimental results is carried out.

Н.Н. Кудрявцев*, М.Е. Кузьменко, О.В. Митичкин, А.И. Безлепкин,
С.В. Костюченко, В.Я. Печеркин**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ И СПОСОБА ЗАЖИГАНИЯ АМАЛЬГАМНОЙ ЛАМПЫ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ РАЗРЯДА

**Московский физико-технический институт,
Институтский пер., 9, Долгопрудный МО, г. Москва, 141700, Россия
**НПО "ЛИТ",
ул. Краснобогатырская, 44, г. Москва, 107076, Россия*

Разряд низкого давления в смеси паров ртути и инертных газов широко используется в технике. Обусловлено это высокой (до 80%), эффективностью преобразования электрической энергии в излучение двух резонансных линий атома ртути 253,7 и 184,9 нм (переходы $6^3P_1-6^1S_0$ и $6^1P_1-6^1S_0$) [1, 2]. Источники излучения с таким жестким УФ излучением применяются для воздействия на различные среды: для обеззараживания [3], так как излучение линии с длиной волны 253,7 нм является губительным для микроорганизмов, для активации поверхности, для инициирования фотохимических реакций, литографии и т.п.

Увеличение удельной мощности ламп с ртутным разрядом низкого давления позволит применять такие лампы там, где необходима высокая мощность излучения при сохранении таких свойств ртутных ламп низкого давления, как высокий КПД и длительный срок службы. Разработка ламп повышенной мощности встречает много трудностей, одна из которых – отсутствие стандартных пускорегулирующих аппаратов (ПРА) для ртутных ламп низкого давления с мощностью свыше 100 Вт. Для питания подобных ламп можно применять электронные ПРА, которые обеспечивают поджиг и работу лампы. Их стоимость значительно превышает стоимость широко применяемого индуктивного балласта. Применение индуктивного балласта, работающего на частоте питающей сети, также может быть выгодным с точки зрения простоты конструкции и надежности в работе. Для поджига лампы в таком случае можно использовать стандартную стартерную схему со стартером тлеющего разряда [1].

Нами проведены экспериментальные исследования с целью увеличить мощность лампы при сохранении высокого КПД преобразования электрической энергии в УФ излучение. Кроме того, исследован вопрос о применимости стартерной схемы зажигания такой лампы со стартером тлеющего разряда.

Интенсивность резонансного излучения имеет максимум при определенной концентрации атомов ртути в разряде $\sim 10^{14}$ см⁻³ [2]. В связи с этим ртутные лампы низкого давления разрабатываются так, чтобы давление насыщенных паров ртути при температуре самой холодной точки лампы было близко к оптимальному, равному 5–10 мторр, что достигается при температуре холодной точки 40–50⁰С. При повышении мощности разряда лампа перегревается, и концентрация насыщенных паров ртути превышает оптимальную. Поэтому, для ламп, температура холодной точки которых во время работы превышает оптимальную, более целесообразно использовать амальгаму, равновесное давление ртути над которой гораздо ниже, чем над чистой ртутью [4].

При повышении мощности лампы с длиной разрядного промежутка 1115 мм до 160–200 Вт температура ее поверхности превышает 100⁰С. Для поддержания давления ртути на оптимальном уровне нами был подобран состав индиевой амальгамы, которая характеризуется малым влиянием паров металла на разряд [5], что выгодно отличает индиевую амальгаму от, например, кадмиевой амальгамы, предложенной в [4]. Предварительный состав амальгамы определялся по результатам

расчета на основе данных [6] (рис. 1), а затем он уточнялся на основе экспериментальных данных по зависимостям излучения из разряда от температуры амальгамы.

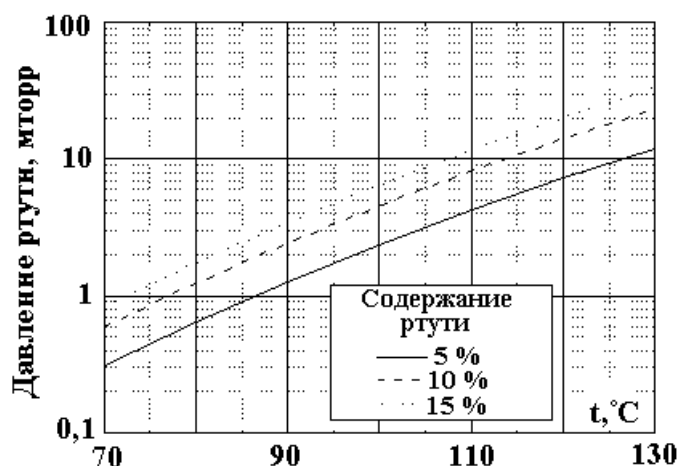


Рис. 1. Зависимость давления паров ртути над индиевой амальгамой от ее температуры.

Увеличение разрядного тока приводит к уменьшению электронной температуры, что отрицательно сказывается на возбуждении атомов ртути, приводит к уменьшению выхода УФ излучения из разряда и уменьшению КПД лампы. Есть несколько путей для увеличения электронной температуры до оптимального уровня [7], например, уменьшение диаметра разрядной трубки или применение смеси инертных газов, в которой диффузия ионов к стенкам проходит более быстро [2].

В качестве наполнителя была выбрана смесь аргона с добавкой более легкого газа неона. Диаметр разрядной трубки был уменьшен по сравнению с лампами такого типа от 38–26 до 19 мм. Уменьшение диаметра лампы приводит дополнительно к уменьшению пленения резонансного излучения в объеме и увеличению его выхода.

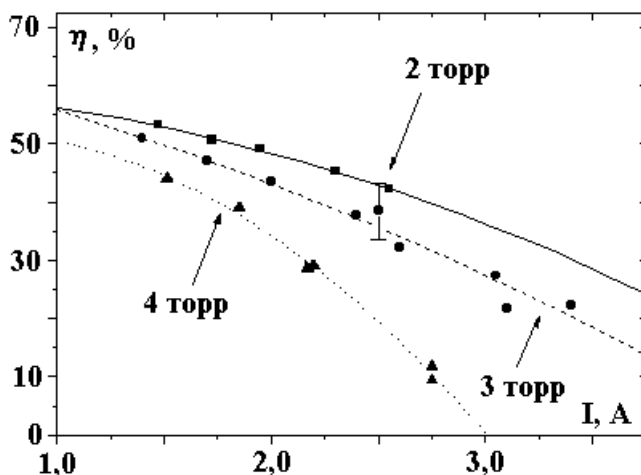


Рис. 2. КПД разряда от давления наполняющего инертного газа.

В результате экспериментов была получена сильная зависимость КПД разряда от давления инертного газа (рис. 2). Однако понижение давления в лампе отрицательно сказывается на сроке службы катода лампы [8]. Поэтому, варьируя давление смеси инертных газов в лампе, можно получить источник, оптимизированный для конкретных применений – с максимальным КПД или с продолжительным сроком службы.

Применение амальгамы и подбор состава газа позволили достигнуть КПД более 50% преобразования электрической энергии в положительном столбе разряда в излучение линии 253,7 нм. При этом электрическая мощность на единицу длины разряда составила 1,3 Вт/см. Интересно отметить, что полученная эффективность преобразования электрической энергии в УФ излучение близка к значению, полученному по аппроксимационной формуле, приведенной в [2], которая выведена на основе экспериментальных данных для ртутного разряда с небольшими плотностями тока.

Излучение лампы с подобранным составом амальгамы и наполнением измерялось в зависимости от температуры окружающей среды. Для этого лампа помещалась в кварцевый чехол, который омывался водой заданной температуры. В такой конфигурации, как показывают оценки, имеет место механизм теплопередачи с помощью теплопроводности, что обеспечивает, при постоянной мощности разряда, постоянную разность между температурой стенки колбы и температурой воды, омывающей чехол. На рис. 3 приведена зависимость УФ излучения лампы от температуры, омывающей чехол воды. УФ излучение колеблется в пределах 10% при изменении температуры колбы лампы на 70°C, что позволяет применять данный тип ламп в широком диапазоне температур окружающей среды в отличие от обычных ртутных ламп.

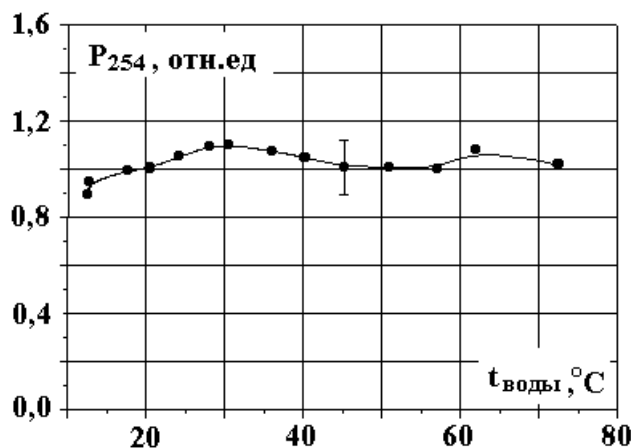


Рис. 3. Зависимость мощности УФ излучения от температуры омывающей чехол воды.

Для испытания стартеров была собрана модель установки для обеззараживания воды, в которой лампа находится в условиях, близких к условиям эксплуатации. Для автоматизации процесса испытания создан программно-аппаратный комплекс на основе персонального компьютера с установленной платой ввода-вывода. Блок-схема и принципиальная электрическая схема установки приведены на рис. 4.

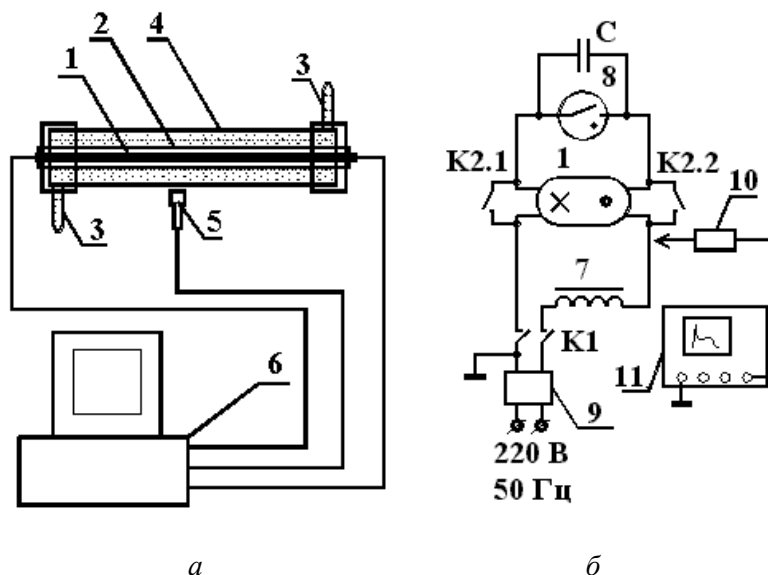


Рис. 4. а) Блок-схема экспериментальной установки для проверки стартеров.

1 – лампа; 2 – кварцевый чехол; 3 – патрубки для ввода воды; 4 – кварцевая оболочка; 5 – УФ датчик; 6 – система автоматизации. б) Принципиальная схема включения лампы. 7 – дроссель Tridonik OMB 250; 8 – испытываемый стартер; 9 – стабилизатор напряжения; 10 – высоковольтный пробник; 11 – осциллограф.

Лампа 1 помещается в кварцевый чехол 2, который омывается проточной водой, поступающей через патрубки 3. Внешняя оболочка 4 также изготовлена из кварца и пропускает УФ

излучение. Для регистрации вышедшего УФ излучения снаружи установлен датчик 5. Управление питанием лампы, регистрация сигнала датчика 5 и вывод результатов осуществляются системой автоматики 6 на базе персонального компьютера. Питание лампы осуществляется от сети 220 В, 50 Гц. В качестве балласта использован дроссель 7 Tridonic OMB 250, применяемый для питания натриевых ламп мощностью 250 Вт. Для поджига лампы служит испытуемый стартер 8 с параллельно подключенным конденсатором С. Система автоматизации управляет электромагнитными реле К1 и К2, снимает показания с датчика 5 и записывает результаты экспериментов в файл. Реле К1 подает сетевое напряжение в схему питания лампы. Реле К2 позволяет замыкать попарно выводы спиральных электродов лампы (рис. 4,6). При этом стартер подключается последовательно с дросселем к сети через стабилизатор напряжения 9 Statron. Для регистрации формы поджигающих импульсов использовался осциллограф 10 Tektronix TDS 640 А с высоковольтным пробником 11 P6015 А (полоса пропускания 75 МГц).

Для испытаний задается время, в течение которого стартер пытается поджечь лампу t_0 , а также время цикла $T > t_0$. По показаниям датчика 5 фиксируется момент поджига лампы t и лампа отключается. Если за время t_0 лампа не загорается, то программа фиксирует неудачную попытку зажечь лампу. Время T выбирается таким образом, чтобы лампа успевала остыть до первоначальной температуры. Тем самым моделируется поджиг холодной лампы.

Попытки применить для зажигания лампы стартеры для люминесцентных ламп не дали удовлетворительных результатов, так как пусковой ток, который должен коммутировать стартер, превышает 3 А. Например, стартер СК-220 выходит из строя после нескольких циклов. Стартер Philips S12, рассчитанный для зажигания ламп мощностью 115 и 140 Вт, зажигает лампу, однако время зажигания велико, а надежность – низка. Есть случаи "отказа" стартера, когда контактные пластины стартера замыкаются и остаются в таком положении до момента выключения питающего напряжения. В таком режиме электрод сильно раскален и происходит интенсивное испарение его оксидного покрытия, что приводит к выходу лампы из строя.

Дальнейшие эксперименты проводились со стартерами СНД-2 (по ТУ 3.395.001), которые применяются для зажигания неоновой лампы ДНЕСГ-500-1. Стартеры СНД-2 рассчитаны на пусковой ток 7,2–7,5 А, и их применение в нашем случае достаточно оправдано. Применение рекомендуемого для этого стартера конденсатора 0,25 мкФ приводит к повышенному искрению в стартере в пусковой период и значительному изменению формы напряжения на лампе при ее работе. Поэтому емкость подключаемого параллельно стартеру конденсатора была уменьшена до 5 нФ. Эта емкость близка к емкости конденсаторов, применяемых в стартерах для люминесцентных ламп. Подключение конденсатора с меньшим значением емкости (1–2 нФ) не оказывает влияния на пусковой режим лампы. На рис. 5 приведена типичная осциллограмма напряжения на лампе при ее зажигании в схеме со стартером СНД-2. Амплитуда импульса, который возникает при размыкании контактов стартера, достигает 1,5 кВ, что достаточно для уверенного зажигания лампы. На рис. 6 представлена зависимость времени поджига лампы от порядкового номера включения стартера.

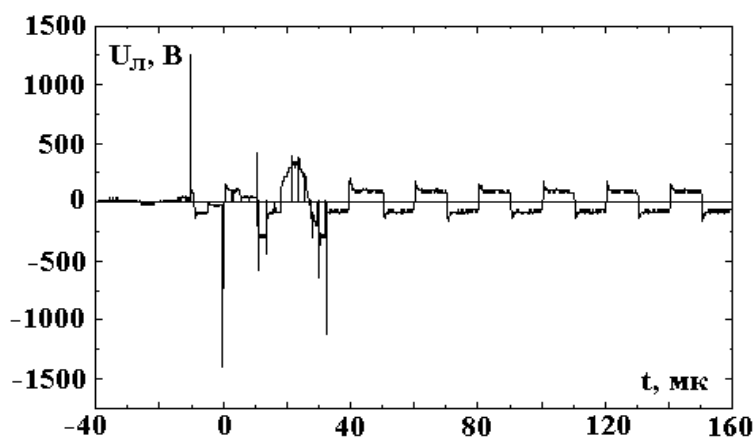


Рис. 5. Осциллограмма напряжения на лампе во время ее зажигания.



Рис. 6. Зависимость времени зажигания лампы стартером СНД-2 от порядкового номера включения.

Некоторые стартеры переставали работать через 5–15 циклов включения лампы. Возможная причина – недоочищенный материал арматуры и биметаллической пластины стартера. При зажигании в стартере тлеющего разряда металлические части подвергаются нагреву и бомбардировке электронами и ионами. Происходит очистка поверхности металла и изменение состава газового наполнения стартера, что препятствует его нормальной работе.

Тестирование каждого стартера, при котором он будет включаться несколько десятков или сотен раз, неприемлемо, так как это требует больших временных затрат, и во время такого тестирования происходит старение стартера. Поэтому для отбора пригодных к употреблению стартеров была разработана следующая методика. Сначала замыкаются контакты реле К2 и при помощи реле К1 подается питающее напряжение в течение 3 минут. При этом происходит начальное старение стартера. Затем контакты К2 размыкаются и происходит проверка способности стартера надежно зажечь лампу. Если лампа зажигается 5 раз, и время каждого зажигания менее 30 с, то стартер считается пригодным для использования. В противном случае он отбраковывается. Время между двумя попытками поджига лампы составляет 3 мин. Кроме того, визуально проверяется отсутствие тлеющего разряда в стартере при работающей лампе. Стартер СНД-2 рассчитан на 1000 включений с лампой ДНЕСГ-500-1. Экспериментально получено, что он может зажигать амальгамную лампу более 500 раз. Данная методика позволяет отбирать стартеры СНД-2 для работы с амальгамной лампой низкого давления. Она может служить как для выборочного контроля партии стартеров, так и для проверки всей партии при количестве несколько десятков штук.

Таким образом, использование индиевой амальгамы и подбор состава инертной смеси позволили существенно поднять мощность ртутного разряда низкого давления без спада КПД. Примененная амальгама позволила получить стабильный поток УФ излучения в широком диапазоне температур разрядной трубки.

Для мощности лампы 180 Вт показана возможность применения стартера СНД-2 для зажигания такой амальгамной лампы. При этом ресурс работы стартера превышает 500 включений. Предложена методика для предварительного отбора стартеров и создана установка для проведения испытаний, в которой лампа работает в условиях, близких к работе лампы в установке по обеззараживанию воды. Применяемая система автоматизации может быть также использована для оценки срока службы электродов лампы по количеству включений, которые они выдерживают.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. М., 1991.
2. Миленин В.М., Тимофеев Н.А. Плазма газоразрядных источников света низкого давления. Л., 1991.
3. Якименко А.В., Костюченко С.В., Васильев С.А. и др. Опыт эксплуатации систем УФ обеззараживания сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 1998. № 11. С. 17–20.
4. Патент ФРГ. № 1 086 804. 21 f 82/01.

5. Патент Великобритании. №1042183. Кл. H1 D
6. *Козин Л.Ф., Нигметова Р.Ш., Дергачова М.Б.* Термодинамика бинарных амальгамных систем Алма-Ата, 1977.
7. *Уэймаус Д.* Газоразрядные лампы. М., 1977.
8. *Федоренко А.С.* Экспериментальные исследования, расчетное моделирование плазмы положительного столба и создание перспективных конструкторских и технологических решений в области люминесцентных ламп низкого давления: Дис. докт. техн. наук. Саранск, Всесоюзн. научно-иссл., проектно-констр. и технологич. инст. им. А.Н. Лодыгина, 1990.

Поступила 25.01.2000

Summary

The usage of Indium amalgam and special mixture of noble gases makes possible to increase the power of the low-pressure mercury discharge up to 200 watts with high efficiency. The dependence of the efficiency of the lamp with such discharge is weak in the wide range of the lamp wall temperatures. It's shown the possibility to ignite 180-watt amalgam lamp in starter scheme with glow discharge starter.

C. Dochitoiu, N. Jula

A STATISTICAL WAY TO FIND CAUSAL FACTORS

*Technical Military Academy,
Bd. George Cosbuc, 83–85, sector 5, Bucharest, Romania*

Introduction

There are many cases, the influence of one or more factors on a certain process is obviously perceptible but this influence can't be found out on a deductive basis. The statistical tool provides various types of experimental data processing, which not only notice such influences but also even evaluate them.

Such an approach is very successful in many areas, for example the military, economy, sociology, health, ecology, etc.

The statistical tool used in this article is the correlation coefficient applied to empirical data considered as random sample variables. The elaborated method allows pointing out the cumulative influence of more factors and their weight using some correlation matrix properties.

Correlation coefficient

For every random variable X we note (as in [1], [3]) $M(X)$ and $\sigma(X)$ their mean value and standard deviation of X and Y respectively.

For the variables X, Y the number $\rho(X, Y) = \frac{M[(X - M(X))(Y - M(Y))]}{\sigma(X) \cdot \sigma(Y)}$ is the correlation coefficient of X and Y . It has the property: $-1 \leq \rho(X, Y) \leq 1$ and $\rho(X, Y) = \pm 1$ if and only if the relation $Y - M(Y) = \pm \frac{\sigma(Y)}{\sigma(X)}(X - M(X))$ is a sure event. Generally we think every relation between random variables as a sure event.

In other words, if $\rho(X, Y)$ reaches values ± 1 it may be concluded the linear dependence of "factors" X and Y and moreover it is provided the factor $\pm \frac{\sigma(Y)}{\sigma(X)}$ of this dependence.

Generally the experimental data are not in the case $\rho(X, Y) = \pm 1$ but rather $\rho(X, Y)$ have values more or less close to ± 1 . For summary conclusions on the linear dependence of factors one considers the following three cases: a) $|\rho(X, Y)| \geq 0,66$. In this case X and Y are considered strong correlated; b) $0,33 < |\rho(X, Y)| < 0,66$. The X and Y are said correlated; c) $|\rho(X, Y)| \leq 0,33$. In this case X and Y are considered weakly correlated or rather uncorrelated.

Correlation matrix

Let X_1, X_2, \dots, X_n be random variables, $\rho_{ij} = \rho(X_i, X_j)$ and $A = (\rho_{ij})$ their correlation matrix. It is a symmetric matrix consisting of number in $[-1, 1]$.

Using the correlation coefficient properties, [2] is shown that if all numbers in A are close to 1 the deviation of the variables are proportional. As a result, fixing one of them, namely X_k , all the other variables have the deviations proportional to deviations of X_k :

$$X_i - M(X_i) = \frac{\sigma(X_i)}{\sigma(X_k)} (X_k - M(X_k)). \quad (3)$$

Statistically every variable may be taken as X_k , i. e. may be considered as representing the causal factor for the others. It is to discern which is the true causal factor.

In this case the correlation matrix rank is one and it is concluded that a single factor, the X_k , is the causal, all the other being determined by X_k , with the weights $\frac{\sigma(X_i)}{\sigma(X_k)}$.

The investigation is extended, further, to the case the matrix A have the rank equal to $r \leq n$. As a result, r among the n factor will be find as statistically independent and causal for the other. The deviation of all the other variables may be written as linear combinations of causal factor's deviations. As well as in the case $r = 1$, from statistical point of view, there are many sets of r causal factors, the especially knowledge is necessary to find the true.

Linear dependence of random variables

For every other random variable Y we note $\rho_i = \rho(Y, X_i)$ and $\sigma_i = \sigma(X_i)$. Obviously,

$$M[(X_i - M(X_i))(X_j - M(X_j))] = \sigma_i \sigma_j \rho_{ij}. \quad (4)$$

The following proposition shows the conditions that Y to be written as a linear combination of X_1, X_2, \dots, X_n .

Proportion. If $Y - M(Y) = \sum_{i=1}^n \alpha_i (X_i - M(X_i))$ then the numbers $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ defined by:

$$\beta_j = \frac{\alpha_j \sigma_j}{\sigma(Y)} \text{ fulfil the conditions: } \rho_i = \sum_{j=1}^n \beta_j \rho_{ij} \text{ and } \sum_{i,j=1}^n \beta_i \beta_j \rho_{ij} = 1. \text{ For all } i = 1, 2, \dots, n.$$

Conversely, if there are the numbers $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ satisfying the relations: $\rho_i = \sum_{j=1}^n \beta_j \rho_{ij}$ for all i and

$$\sum_{i,j=1}^n \beta_i \beta_j \rho_{ij} = 1 \text{ then: } Y - M(Y) = \sum_{i=1}^n \alpha_i (X_i - M(X_i)) \text{ where } \alpha_i = \frac{\sigma(Y) \beta_i}{\sigma_i}.$$

Proof. Let $Y - M(Y) = \sum_{i=1}^n \alpha_i (X_i - M(X_i))$ be a sure event. Then:

$$\begin{aligned}\rho_i = \rho(Y, X_i) &= \frac{1}{\sigma(Y)\sigma(X_i)} M[(Y - M(Y))(X_i - M(X_i))] = \\ &= \frac{1}{\sigma(Y)\sigma(X_i)} M\left[\left(\sum_{j=1}^n \alpha_j (X_j - M(X_j))\right)(X_i - M(X_i))\right] = \\ &= \frac{1}{\sigma(Y)\sigma_i} \sum_{j=1}^n \alpha_j M[(X_j - M(X_j))(X_i - M(X_i))] = \frac{1}{\sigma(Y)\sigma_i} \sum_{j=1}^n \alpha_j \sigma_i \sigma_j \rho_{ij} = \sum_{j=1}^n \frac{\alpha_j \sigma_j}{\sigma(Y)} \rho_{ij}.\end{aligned}$$

Taking $\beta_j = \frac{\alpha_j \sigma_j}{\sigma(Y)}$ we have: $\rho_i = \sum_{j=1}^n \beta_j \rho_{ij}$.

On the other hand,

$$\begin{aligned}1 = \rho(Y, Y) &= \frac{1}{\sigma^2(Y)} M[(Y - M(Y))(Y - M(Y))] = \\ &= \frac{1}{\sigma^2(Y)} M\left[\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i (X_i - M(X_i))\right)\left(\sum_{j=1}^n \alpha_j (X_j - M(X_j))\right)\right] = \\ &= \frac{1}{\sigma^2(Y)} \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j M[(X_i - M(X_i))(X_j - M(X_j))] = \sum_{i,j=1}^n \frac{\alpha_i \alpha_j}{\sigma^2(Y)} \sigma_i \sigma_j \rho_{ij} = \sum_{i,j=1}^n \beta_i \beta_j \rho_{ij}\end{aligned}$$

Conversely, let $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ be some real numbers so that:

$$\sum_{i,j=1}^n \beta_i \beta_j \rho_{ij} = 1 \text{ and } \rho_i = \sum_{j=1}^n \beta_j \rho_{ij} \text{ for all } i = 1, 2, \dots, n$$

and denote $\alpha_i = \frac{\sigma(Y)\beta_i}{\sigma_i}$. Then

$$\begin{aligned}\sigma^2\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i X_i\right) &= M\left[\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i (X_i - M(X_i))\right)^2\right] = M\left[\sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j (X_i - M(X_i))(X_j - M(X_j))\right] = \\ &= \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j M[(X_i - M(X_i))(X_j - M(X_j))] = \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j \sigma_i \sigma_j \rho_{ij} = \\ &= \sum_{i,j=1}^n \frac{\sigma(Y)\beta_i}{\sigma_i} \frac{\sigma(Y)\beta_j}{\sigma_j} \sigma_i \sigma_j \rho_{ij} = \sigma^2(Y) \sum_{i,j=1}^n \beta_i \beta_j \rho_{ij} = \sigma^2(Y),\end{aligned}$$

so that $\sigma\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i X_i\right) = \sigma(Y)$.

Furthermore

$$\begin{aligned}\rho\left(Y, \sum_{i=1}^n \alpha_i X_i\right) &= \frac{1}{\sigma(Y)\sigma\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i X_i\right)} M\left[(Y - M(Y))\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i (X_i - M(X_i))\right)\right] = \\ &= \frac{1}{\sigma^2(Y)} \sum_{i=1}^n \alpha_i M[(Y - M(Y))(X_i - M(X_i))] = \frac{1}{\sigma^2(Y)} \sum_{i=1}^n \frac{\sigma(Y)\beta_i}{\sigma_i} \rho_i \sigma(Y) \sigma(X_i) = \\ &= \sum_{i=1}^n \beta_i \rho_i = \sum_{i=1}^n \beta_i \sum_{j=1}^n \beta_j \rho_{ij} = \sum_{i,j=1}^n \beta_i \beta_j \rho_{ij} = 1.\end{aligned}$$

The correlation coefficient property for two random variables leads us to:

$$Y - M(Y) = \frac{\sigma(Y)}{\sigma\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i X_i\right)} \sum_{i=1}^n \alpha_i (X_i - M(X_i)) = \sum_{i=1}^n \alpha_i (X_i - M(X_i)). \text{ Q.E.D.}$$

The rank of the correlation matrix

Let $A = (\rho_{ij})$ be the correlation matrix of random variables X_1, X_2, \dots, X_n , i. e. $\rho(X_i, X_j) = \rho_{ij}$ and $r = \text{rank}A$. Renumbering eventually the variables we can suppose the first r lines in A are independent.

Theorem. For every $k > r$ the variable $X_k - M(X_k)$ can be written as a linear combination of $X_i - M(X_i)$; $i = 1, 2, \dots, n$.

Proof. There are real numbers $\beta_1, \beta_2, \beta_r$ so that $\rho_{ki} = \sum_{j=1}^r \beta_j \rho_{ji}$ for every $i = 1, 2, \dots, n$. The linear independence of the first r lines in A allows us to say that the β_i are determined. Also the sum can be extended to n taking $\beta_{r+1} = 0, \beta_{r+2} = 0, \dots, \beta_n = 0$.

Obviously, $\rho(X_k, X_k) = 1$. On the other hand, $\rho(X_k, X_k) = \sum_{j=1}^n \beta_j \rho_{jk} = \sum \beta_j \rho_{kj} = \sum_{j=1}^r \beta_j \sum_{h=1}^r \beta_h \rho_{hj} = \sum_{i,j=1}^r \beta_j \beta_h \rho_{hj} = \sum_{i,j=1}^n \beta_j \beta_h \rho_{hj}$ so that $\sum_{i,j=1}^n \beta_j \beta_h \rho_{hj} = 1$.

The preceding proposition can be applied by taking $Y = X_k$ and we get:

$$X_k - M(X_k) = \sum_{i=1}^n \alpha_i (X_i - M(X_i)); \text{ where } \alpha_i = \frac{\sigma(Y)\beta_i}{\sigma_i} = \frac{\sigma(X_k)\beta_i}{\sigma_i} = \frac{\sigma_k \beta_i}{\sigma_i}.$$

Because $\beta_i = 0$ for $i > r$ we obtain $X_k - M(X_k) = \sum_{i=1}^r \alpha_i (X_i - M(X_i))$. Q.E.D.

Example

Consider five factors each represented by a set of 50 numerical data in Table 1. The number sets A, B, C are taken at random using the function RAND in Excel. The number sets D and E are taken so that:

$$D_i = 2A_i + 3B_i - 4C_i, E_i = 4A_i - 3B_i + 2C_i. \tag{15}$$

The coefficients in (15) expressing linear dependence between the data sets (considered as representing factors which suitable causal dependencies) will be found using the method elaborated before. This proves the consistency of the

Owing to the linearity in (15), the same relations are valid for the suitable deviations (3).

The standard deviations $\sigma_A, \sigma_B, \sigma_C, \sigma_D, \sigma_E$ are provided by the function STDEV from Excel and the correlation matrix by the function CORREL. These values are in the Tables 1 and 2.

Table 1. Experimental data

NR.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
A	17	10	97	96	51	13	54	74	62	99	83	14	82	0	63	41	0	69	20	30	60	12	69	31	75
B	82	63	71	78	71	47	17	42	63	53	47	18	3	77	48	7	88	91	7	18	13	49	53	30	13
C	25	62	92	77	76	71	49	27	31	12	69	17	5	15	39	88	13	63	81	32	84	8	1	92	21
D	182	-40	38	117	11	-116	-38	166	189	311	31	13	154	173	114	-249	210	161	-266	-15	-180	136	294	-216	108
E	-129	-24	359	305	142	51	265	223	120	259	329	35	328	-201	187	316	-236	131	222	130	369	-80	117	218	304

NR.	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
A	72	100	51	38	20	71	6	52	38	40	7	23	75	88	73	78	83	78	57	9	39	74	23	32	11
B	34	78	45	74	63	34	66	35	19	7	91	14	0	12	1	68	70	82	68	38	49	61	24	63	21
C	48	24	3	52	7	27	39	61	45	73	3	83	84	63	8	33	32	10	91	9	99	14	42	81	9
D	56	337	225	91	203	136	53	-35	-47	-192	274	-245	-184	-41	117	231	246	363	-49	93	-174	272	-50	-71	49
E	283	212	77	32	-98	239	-98	224	186	284	-239	216	467	444	307	173	185	86	205	-57	209	142	104	101	-1

Table 2. Standard deviations

A	B	C	D	E
30,0444	27,3844	30,7896	166,0148	167,6445

Table 3. Correlation matrix

	A	B	C	D	E
A	1	-0,01994	0,07261	0,298214	0,753305
B	-0,01994	1	-0,16331	0,608788	-0,564328
C	0,07261	-0,16331	1	-0,79639	0,4994005
D	0,298214	0,608788	-0,79639	1	-0,377084
E	0,753305	-0,56433	0,4994	-0,37708	1

One can verify that the rank of the correlation matrix is three and the first three lines are independent. The fourth and fifth lines, a_{4*} and a_{5*} , can be written as linear combinations of a_{1*}, a_{2*}, a_{3*} :

$$a_{4*} = \beta_1 a_{1*} + \beta_2 a_{2*} + \beta_3 a_{3*}; \quad a_{5*} = \bar{\beta}_1 a_{1*} + \bar{\beta}_2 a_{2*} + \bar{\beta}_3 a_{3*}. \quad (16)$$

After solving the systems (16) one obtained:

$$\beta_1 = 0,3619; \beta_2 = 0,4948; \beta_3 = -0,7418 \text{ and: } \bar{\beta}_1 = 0,7168; \bar{\beta}_2 = -0,4900; \bar{\beta}_3 = 0,3673$$

Proceeding from the theorem,

$$D_i = \alpha_1 A_i + \alpha_2 B_i + \alpha_3 C_i; \quad E_i = \bar{\alpha}_1 A_i + \bar{\alpha}_2 B_i + \bar{\alpha}_3 C_i$$

where: $\alpha_1 = \sigma_D \beta_1 / \sigma_A = 2$; $\alpha_2 = \sigma_D \beta_2 / \sigma_B = 3$; $\alpha_3 = \sigma_D \beta_3 / \sigma_C = -4$ and: $\bar{\alpha}_1 = \sigma_E \bar{\beta}_1 / \sigma_A = 4$, $\bar{\alpha}_2 = \sigma_E \bar{\beta}_2 / \sigma_B = -3$; $\bar{\alpha}_3 = \sigma_E \bar{\beta}_3 / \sigma_C = 2$ which are exactly the coefficients (15).

The solutions of systems (16) have led to linear dependence of D and E of A , B and C , so that the last can be taken as causal factors.

If the (16) haven't any solution, (for example if the rank of correlation matrix is five) possibly for other number sets, one deduces the independence of suitable factors. This information may be also important.

In the above exempla are considered five factors, each represented by 50 numerical data. Practically there is no limit for the number of factors and the numerical data volume. The example is however notices the consistency of the method.

Conclusions

This method, based on the rank of correlation matrix is an efficient proceeding to find causal links.

The method is easy to apply, using functions in the program *Excel*.

The example contains in itself the abstraction, i. e. it is no restriction about the nature of the factors A, B .

The results obtained using the method, and the knowledge of researcher in the studied area may be important information in order to elaborate suitable strategies.

REFERENCES

1. Iosifescu M., Mihoc Gh., Theodorescu R. Teoria probabilităților și statistica matematică. București, 1966.
2. Arnold O. Allen. Probability, Statistics, and Queuing theory, Academic Press, New York, 1978.
3. Chris Spatz, James O. Johnston, Basic Statistics, Pittsburgh, U.S.A., 1990.

Received 17.12.99

Summary

In this paper we present a statistical method for the identification of causal factors in a complex process. The method is based on the use of the correlation coefficient and of the correlation matrix rank, in the goal to determine linear relations between huge volume data sets. The above mentioned relations can drive to the verification of some hypothesis or to determine new connections or links between different phenomenon. The paper also presents an example for the method. The interested domains, from this method point of view, are diverse and important: military, social, medical, economic, etc.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

С.Н. Маслоброд

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ОРГАНИЗМА.

3. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ РЕГУЛЯЦИИ РАСТИТЕЛЬНОГО ОРГАНИЗМА

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

К системам электрофизиологической регуляции растительного организма, определяющим механизм пространственно-временной организации биопотенциалов объекта, относятся стационарные, медленно изменяющиеся биоэлектрические потенциалы (БЭП), а также местные и распространяющиеся потенциалы действия (ПД) и вариационные потенциалы (ВП) [1], условные обозначения см. в [2, 3].

1. Идентификация квазистационарного биоэлектрического поля объекта

Основные опыты проведены на группах семян и проростков кукурузы (гибриды ВИР42 и М291). В группе из 3-х набухающих семян коэффициент вариации (КВ) БЭП был существенно ниже контроля (КВ одиночных семян [4], рис. 1). С помощью экранирования семян фильтрами удалось показать, что система электромагнитного взаимодействия объектов является довольно стабильной. Система из неживых семян (поврежденных молью или убитых кипячением) имеет КВ на уровне контроля (одиночных семян). Таким образом, синхронизация БЭП компонентов фитоценоза – это свойство живой системы.

На уровне пары 4-5-дневных проростков, которые выросли из семян, разделенных электрическим изолятором (рис. 2, П), КВ длин колеоптиля и корешка были существенно ниже, чем у контрольных одиночных проростков (КВ длины а) колеоптиля и б) корешка в опыте и контроле составили соответственно, в %: а) $20,4 \pm 4,3$ и $62,9 \pm 6,5$ и б) $8,2 \pm 0,9$ и $15,8 \pm 3,3$). При использовании фильтров, отсекающих разные участки электромагнитного поля, было показано, что роль УФ, ИК и видимого диапазона во взаимодействии проростков не существенна, а функциональными являются, по-видимому, СВЧ и радиодиапазон [5, 6]. При увеличении расстояния между семенами эффект взаимодействия постепенно исчезает (в частности, КВ длины колеоптиля при расстоянии между двумя семенами 0, 5 и 25 мм составили соответственно, в %: $7,35 \pm 4,4$; $7,38 \pm 3,2$; $47,3 \pm 10,6$). В смешанных парах проростков (из семян разных генотипов) КВ их длин превышают КВ длин проростков чистых пар [5]. По-видимому, у последних создаются более благоприятные условия для резонансных эффектов вследствие большего подобия спектров электромагнитного излучения объектов.

2. Идентификация потенциала действия и вариационного потенциала, временная структура сигнала

В прежних опытах выделить электрический сигнал в чистом виде [6–9] не удавалось, так как полностью не отключался водно-ионный канал связи между объектами. В литературе до настоящего

времени продолжает дискутироваться вопрос о приоритетности электрофизиологической сигнализации у растений перед гидродинамической сигнализацией [10, 11]. Нами была использована оригинальная методика, позволяющая резко усилить электрический сигнал растения, передаваемый на другое растение ценоза, и полностью исключить химический и гидродинамический каналы связи между растениями [12].

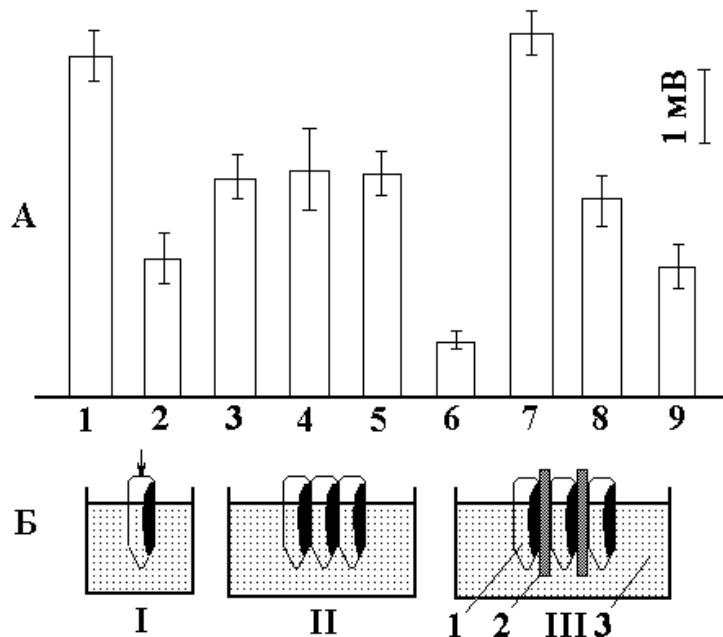


Рис. 1. Коэффициенты вариации (KV) стационарных потенциалов семян кукурузы (гибрид ВИР42), набухающих в группе и поодиночке.

А – KV у одиночных семян: нормальных (1) и вареных (9) и групп семян: соприкасающихся (2); разделенных пластинками – фторопластовой (3), парафиновой (4), графитовой (5), агаровой на 3М KCl (6); соприкасающихся, зародыши повреждены молью (7); соприкасающихся, вареных (8). Б – схема опыта: I – одиночные семена; II – группа соприкасающихся семян; III – группа семян, разделенных пластинками; 1 – семя; 2 – пластинка; 3 – ванна с водопроводной водой. Стрелка – точка измерения потенциала. Референтный электрод – в ванне с водой.

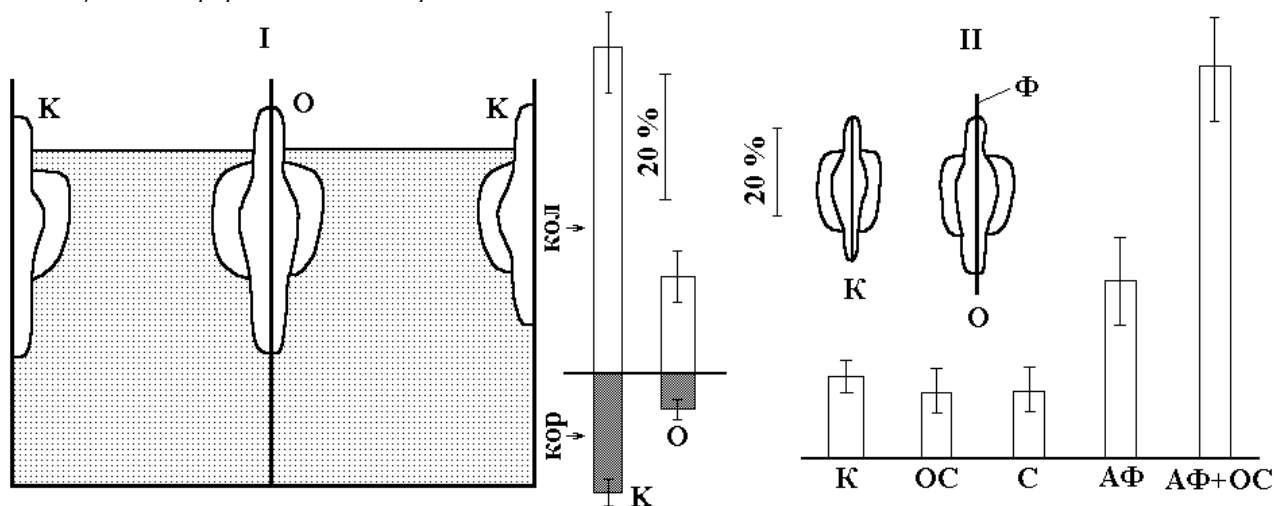


Рис. 2. Оценка электромагнитного взаимодействия пары прорастающих семян кукурузы (гибрид М291) по критерию синхронизации роста проростков.

I – схема опыта и коэффициенты вариации (KV) длины coleoptilia (кол) и корешка (кор) в опыте (О – два проростка разделены пластмассовой стенкой толщиной 1 мм) и контроле (К – одиночные проростки прислонены к стенке); II – схема опыта и KV длины coleoptilia: К – контроль (семена, соприкасающиеся зародышами); О – опыт (семена разделены фильтрами – Ф): ОС – оргстекло; С – стекло; АФ – алюминиевая фольга.

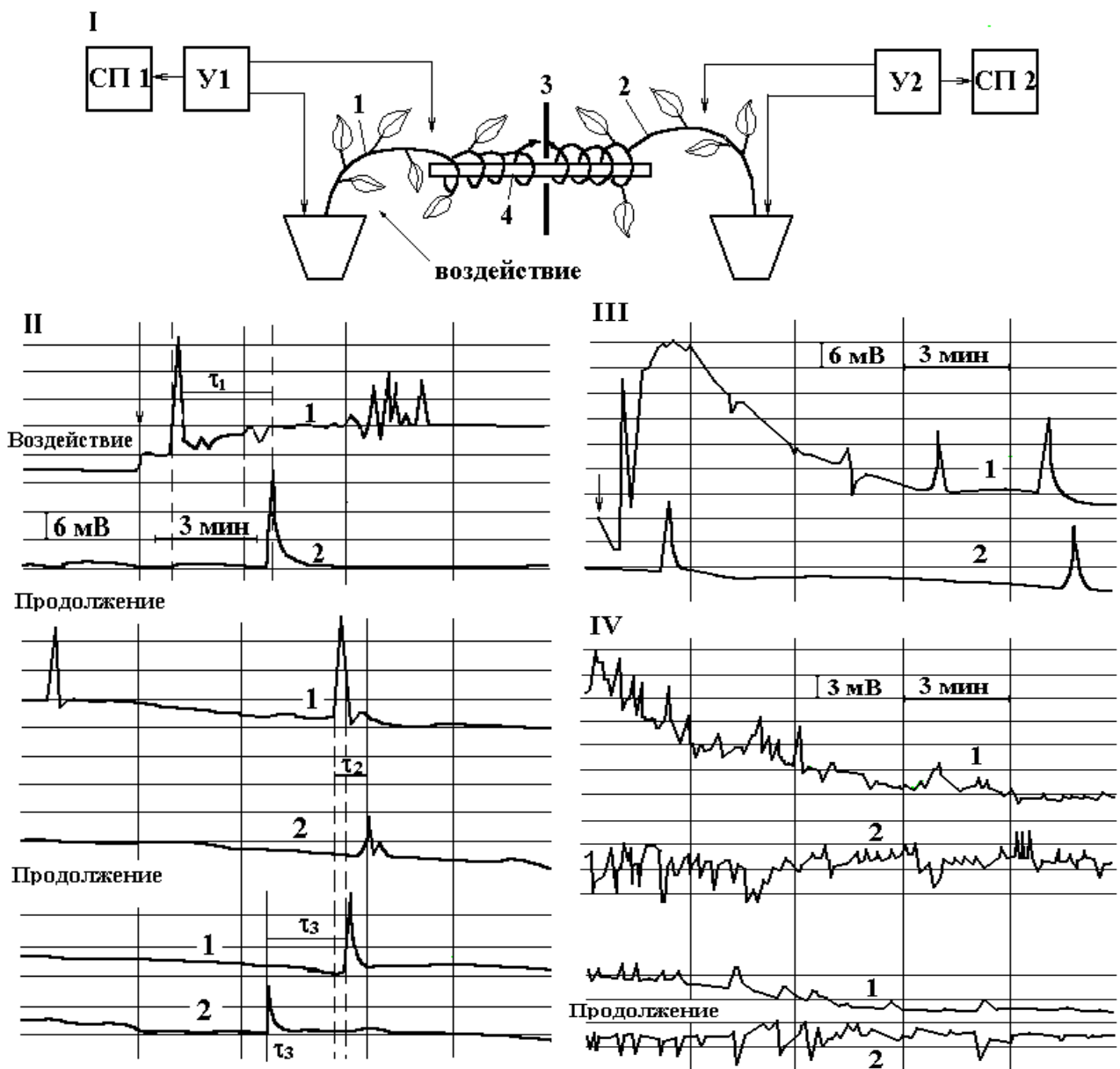


Рис. 3. Передача потенциалов действия (ПА) от одного растения вьюнка к другому через ферритовый сердечник ("биотрансформатор").

I – схема эксперимента: 1 – растение-индуктор ПА; 2 – растение-приемник ПА; 3 – электрический изолятор; 4 – ферритовый сердечник; У1, У2 – усилители потенциалов; СП1, СП2 – самопишущие потенциометры; II – ПА от термического раздражения (ожог листа); III – ПА от механического раздражения (частичная дефолиация); IV – эффект синхронизации ПА у двух растений сразу после их объединения через ферритовый сердечник.

Усики лазающих растений или верхушечные части стеблей вьющихся растений нависали на ферритовый сердечник с двух его концов (рис. 3, I). При локальном воздействии (температурном, химическом и механическом) на одно из растений в нем возникали ПА, которые передавались на соседнее растение по механизму электромагнитной индукции. Передача осуществлялась и в обратном направлении (рис. 3, II, III). В некоторых опытах удалось получить переброску ПА через воздушный зазор в 1,0–1,5 мм [13]. Скорость передачи сигнала – 12–35 см/мин, что соответствует данным литературы [14, 15]. В ходе опыта эта скорость имеет тенденцию к увеличению (эффект проторения).

Полученные результаты полностью укладываются в концепцию фиточеноза как ансамбля осцилляторов. Электромагнитный канал осуществляет взаимную подстройку и синхронизацию этих осцилляторов: у двух растений обнаружена синхронизация ритмик БЭП, вызванных механической деформацией тканей (рис. 3, IV).

Временная структура сигнала показана на примере светоиндуцированного сигнала. Результирующую кривую его амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) можно представить в виде совместно работающих трех электрогенных систем с модами 0,0035, 0,004 и 0,07 рад/с [16, 17].

3. Передача стереоструктуры сигнала (электромагнитного поля), сигнал как энергоинформационный “образ” объекта

3.1. Электрофизиологическая индукция эффекта зеркальной симметризации ценотической пары проростков, динамика эффекта у разновозрастных компонентов ценоза

Генезис зеркальной биосимметрии до настоящего времени на ценотическом уровне не изучался [18, 19]. При проращивании пары семян, соприкасающихся зародышами, обнаружен эффект зеркальной симметризации (ЭС) проростков (пара состоит из *l*- и *d*-проростков) [6, 20] (рис. 4, А, III).

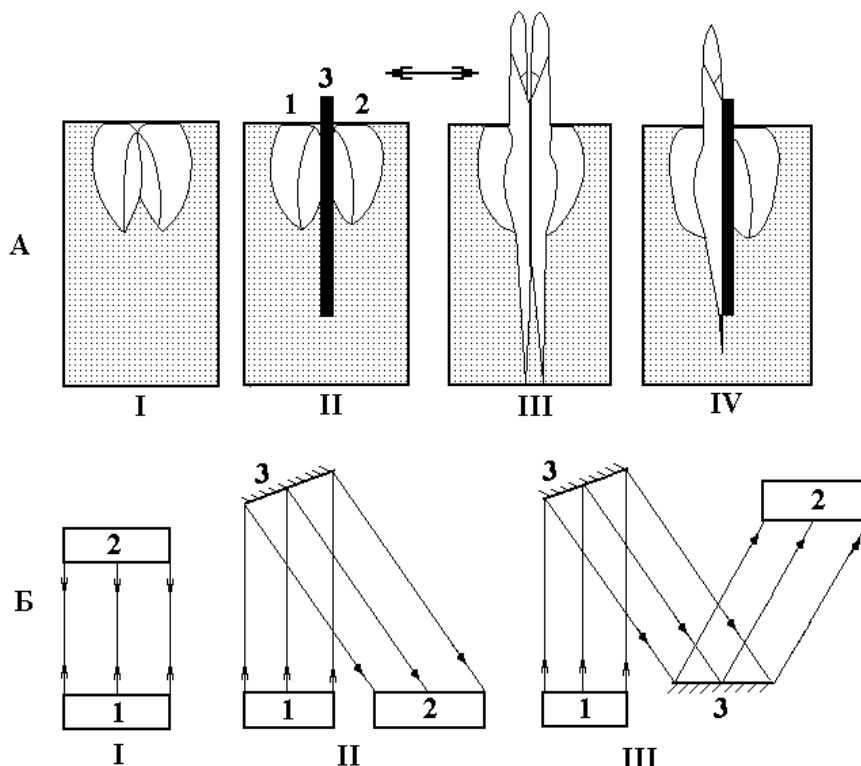


Рис. 4. Схема опытов по электромагнитному морфогенетически значимому взаимодействию растительных объектов в двух полярных направлениях.

А – по горизонтали (на примере семян и проростков кукурузы): I – пара соприкасающихся зародышами семян; II – то же с электромагнитным фильтром; III – пара, состоящая из левого (*l*) и правого (*d*) проростков (индукция зеркальной симметрии проростков); IV – пара разновозрастных объектов с фильтром, 1, 2 – семена; 3 – фильтр; Б – по вертикали (индукция биоизометрии в группе проростков): I – прямая индукция; II, III – отраженная индукция (однократно и дважды); 1 – индуктор; 2 – приемник; 3 – зеркало.

Число зеркально симметричных пар (ЗСП) составляет более 50%. В контроле (при касании семян эндоспермами или при случайном объединении семян) ЗСП меньше 50%. Эффект существенно значим для разных видов растений с разным филлотаксисом – супротивным (кукуруза, пшеница, тритикале, рожь) и винтовым (соя, подсолнечник). Так, число ЗСП в опыте и контроле для 1) подсолнечника (сорт МПС-15), 2) сои (сорт Букурия), 3) пшеницы (сорт Одесская 51), 4) тритикале (сорт КС-4), 5) ячменя (сорт Эльгина), 6) кукурузы (гибрид М291) составило соответственно, в % – 1) 66 ± 7 и 30 ± 3 ; 2) 72 ± 7 и 39 ± 4 ; 3) 71 ± 7 и 43 ± 4 ; 4) 52 ± 5 и 43 ± 4 ; 5) 69 ± 7 и 45 ± 5 . На эффект влияет абиотическая среда: при низкой температуре он отсутствует [20]. ЭС у гибридов выше, чем у линий. ЭС материнской формы выше, чем у отцовской. Механизм индукции ЭС – электромагнитный, как в [5, 6]. При удалении семян друг от друга ЭС исчезал. Опыт свидетельствует о стереоспецифичности биоэлектрических полей у прорастающих семян: у одного из семян и проростков пары поле левоспиральное, у другого – правоспиральное. По-видимому, с помощью этого поля или электрофизиологической стереополярности (ЭСП) растительный организм создает и переносит на расстояние (в том

числе на соседний организм) свой энергоинформационный “образ”. Следовательно, идею электромагнитного поля как матрицы формы организма [21, 22] можно конкретизировать, придав ей функцию переносчика не только вещества [23], энергии [24] и информации [23], энергии [24] и информации [23], но и стереоспецифической структуры.

При посадке к сухому семени второго семени, предварительно замачиваемого в течение суток, было обнаружено усиление ЭЗС [20]. Следовательно, ЭЗС был спровоцирован вторым семенем с более высокой физиологической активностью и, по-видимому, с уже сформировавшимся биоизомерией будущего проростка. Опыт был продолжен с индукцией ЭЗС не семенем, а проростком с четко видимой биоизомерией (l или d) [25] (рис. 4, А, IV). Посадка сухого семени к проростку приурочивалась к моменту появления у проростка очередного листа. Объект-индуктор оставался один и тот же, а объект-приемник каждый раз был новым. Спустя 1–2 суток последний отсаживался и проращивался до проростка. Между индуктором и приемником находилась пластинка из оргстекла (толщиной 1 мм). Этим обеспечивалось только электромагнитное взаимодействие между компонентами пары. Обнаружено усиление ЭЗС с возрастом проростка-индуктора. Лучшей способностью к формированию ЗСП обладали d -проростки индуктора. Коэффициент зеркальной симметризации (отношение числа ЗСП к не ЗСП) с d -индуктором составил 1,0–1,68; с l -индуктором – 0,54–1,0. Таким образом, у d -проростка более мощное биоэлектрическое поле, причем оно проявляется волнообразно (по-видимому, за счет наложения полей очередных вырастающих листьев).

3.2. Эффекты дистантной электрофизиологической индукции однотипной и зеркальной биоизомерии у проростков двух ценозов в вертикальном направлении

Объект-индуктор и объект-приемник – группа или фитоценоз (по 50–100 семян или проростков). Системы “индуктор-приемник” двух типов – “семена-семена” и “проростки-семена” – чистые (одного генотипа) и смешанные (двух разных генотипов). Генотипы: кукуруза (гибриды М424 и Дебют), ячмень (сорт Одесский 86) и тритикале (сорт КС-4). Индуктор располагался под приемником (“прямая индукция”) или на одной горизонтальной плоскости с приемником (электромагнитное взаимодействие посредством зеркала, расположенного над системой – “отраженная индукция”) (рис. 4, Б). В системе “проростки-семена” использовались только l - или только d -проростки-индукторы. Продолжительность индукции – 1–2 суток. После индукции семена отсаживались, проращивались и подсчитывалось отношение (K) числа l -проростков к числу d -проростков (при $K > 1$ преобладали l -проростки, при $K > 1-d$ -проростки).

В чистых и смешанных системах “семена-семена” при прямой индукции K между компонентами было однотипным по характеру (одновременно у обоих компонентов преобладали либо l -либо d -проростки). При отраженной индукции наблюдался эффект зеркальности K между компонентами, то есть если у одного из компонентов системы преобладали l -проростки, то у другого – d -проростки. Обобщенно эффекты можно продемонстрировать следующим образом: различия между K двух компонентов для всех вариантов при прямой индукции ($2,2 \pm 0,5$ ед.) существенно ниже, чем при отраженной индукции ($6,2 \pm 0,9$ ед. для объектов в чашках Петри и $4,4 \pm 0,7$ ед. для объектов в вегетационных сосудах). При использовании двух зеркал (взаимодействие по схеме “индуктор-зеркало I-зеркало II-приемник”) получен эффект индукции однотипной биоизомерии (в системах “ячмень-ячмень”, “ячмень-тритикале”, “тритикале-тритикале” K I и II компонентов соответственно равны $0,65-0,67$; $0,54-0,56$; $1,08-1,31$).

В системе “проростки-семена” при прямой индукции у приемника преобладают биоизомеры, совпадающие по типу с биоизомерией индуктора, а при отраженной индукции – преобладают зеркальные биоизомеры, то есть качественно картина – как в системе “семена-семена”. Общее среднее K приемника при прямой индукции l -индуктором составило $1,16 \pm 0,7$ ед, d -индуктором – $0,57 \pm 0,08$ ед; при отраженной индукции – $0,71 \pm 0,27$ и $1,25 \pm 0,01$ ед. Ошибка большая средней обусловлена разной степенью выраженности эффекта по вариантам. Обращает на себя внимание дальное действие эффекта индукции биоизомерии в вертикальном направлении (в нашем опыте оно было не менее 50 см) по сравнению с горизонтальным (ЭЗС пар проростков работал на расстоянии только до 20 мм) [6, 20]. Лучшее дальнее действие по вертикали может быть объяснено эффектом группы [26], геоэлектрическим эффектом (электрической поляризации между верхней и нижней поверхностями плоского объекта) [27] и направленным электромагнитным излучением с верхушек проростка [28].

Результаты этих экспериментов могут быть использованы для получения определенных биоизомеров, тем более у растений, у которых этот биоизомер в естественной среде обитания отсутствует [19, 29]. В опыте с отраженной индукцией в качестве объекта-индуктора выступает, по-видимому, не сам объект-оригинал, а его зеркальный энергоинформационный двойник или образ, сопоставимый с оригиналом по степени влияния на приемник.

4. Электрофизиологический механизм связи между надземной и подземной частями растений при световых воздействиях

До 70-х годов в физиологии растений общепринятой считалась точка зрения о безальтернативном фотосинтетическом механизме поступления в растения минеральных элементов [30], где индуктором восходящего потока элементов минерального питания в растении являются метаболиты – продукты фотосинтеза, возникающие в листьях на свету и доходящие до корней. Нами в серии работ, начиная с 1973 года [4, 31–36], было показано, что в растении существует не только фотосинтетический, но и электрофизиологический механизм, который функционирует при резких свето-темновых переходах.

Было обнаружено, что возникающая в листьях зеленого растения фотоиндуцированная электрическая реакция (ФЭР) распространяется по растению вплоть до корней [32] и вызывает приток в растение элементов минерального питания из почвы или питательного раствора задолго до возможного прихода к корням ассимилятов – продуктов фотосинтеза. В специальных опытах показано, что включение света у разных видов растений вызывает эффект стимуляции поступления элементов минерального питания – фосфора, кальция [33], калия, нитратов и выделения протонов [35]. Выключение света снимает эффект (рис. 5). Время наступления эффекта совпадало со временем прихода от листьев к корням электрического сигнала (со скоростью порядка 1 см/с). Скорость передачи ассимилятов и элементов минерального питания была на порядок ниже, что было зафиксировано приборами с прямым контролем ФЭР и встречных потоков ассимилятов и фосфора с помощью радиометки ^{14}C и ^{32}P [34]. Спустя 5 минут после светового воздействия радиометка изотопа ^{14}C была зафиксирована только в листьях проростка, а радиометка ^{32}P – не только в корнях, но и в стебле. С помощью радиоавтоматической графики эта картина была визуализирована. После светового стресса из-за перекрытия встречных потоков ^{14}C и ^{32}P была получена засветка всего растения (рис. 5, VII, 1). Через 60 дней, когда в этом растении ^{32}P полностью распался, засветка была обнаружена только в листьях за счет ^{14}C (рис. 5, VII, 2). Следовательно, радиофосфор успел дойти до листьев раньше, чем радиоуглерод (химический сигнал) дошел до корней.

Устранение канала электрической сигнализации приводило к исчезновению эффекта подкачки а) у альбиносных растений (у них отсутствует рецептор электрического возбуждения), б) при блокировании сигнала хлороформом (рис. 5, IV), в) при медленном нарастании освещенности (сигнал возникает только при резких свето-темновых переходах (рис. 5, V, VI). В последнем случае с помощью радиометрической аппаратуры удалось показать работу второго, постулируемого в литературе, инерционного фотосинтетического механизма (эффект подкачки наступал только через 1,5–2,0 ч), чем еще раз была показана независимость быстрого механизма непосредственно от процесса фотосинтеза (но не фотосинтетических пигментов). Данный механизм работал и при отключении гидродинамического канала у объектов 1) со 100% влажностью воздуха (движение водного потока в растении отсутствует); 2) с листьями, замазанными вазелином (дополнительно отключался фотосинтез); 3) связанных через корневые системы (в районе корневых контактов разрывалась водно-ионная нить [4, 34].

В отношении конкретного (мембранного) механизма наблюдаемого эффекта можно сказать, что этот механизм, по-видимому, связан с активацией АТФаз клеток поверхности корня, главным образом H^+ – АТФаз под влиянием прихода к корням волны электрического возбуждения [37]. В результате происходит выброс протона и поглощение в антипорте с ним калия и других элементов [35, 37]. Для индукции эффекта поглощения ^{32}P корнями растения Опритов [37] использовал несветовые (химические и температурные) раздражители. Нами показано, что и при световом воздействии происходит выброс протона из корней растений (рис. 3, II) и поглощение калия и нитратов [35]. Мы полагаем, что электрофизиологический механизм регуляции минерального питания у растений с помощью фотоиндуцированных ПД играет важную роль в жизнедеятельности растений. Этот механизм функционирует и в нормальных условиях, когда происходят резкие световые перепады – из-за фотопериода, переменной облачности, движения листьев на ветру и т.д. [34].

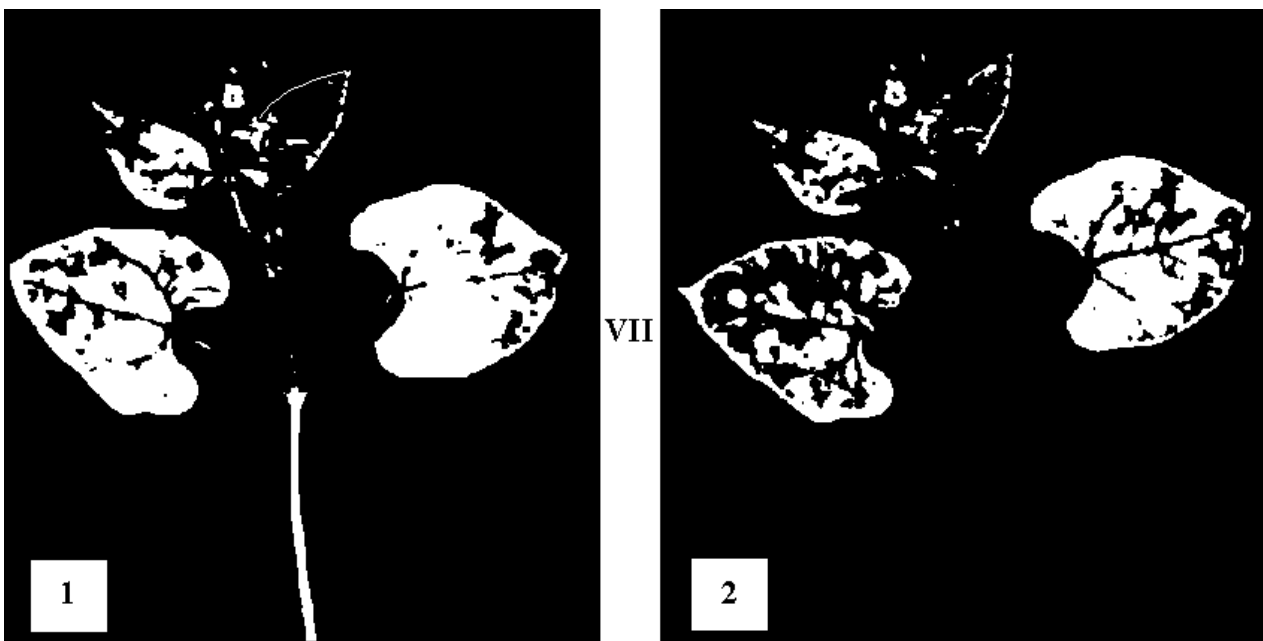
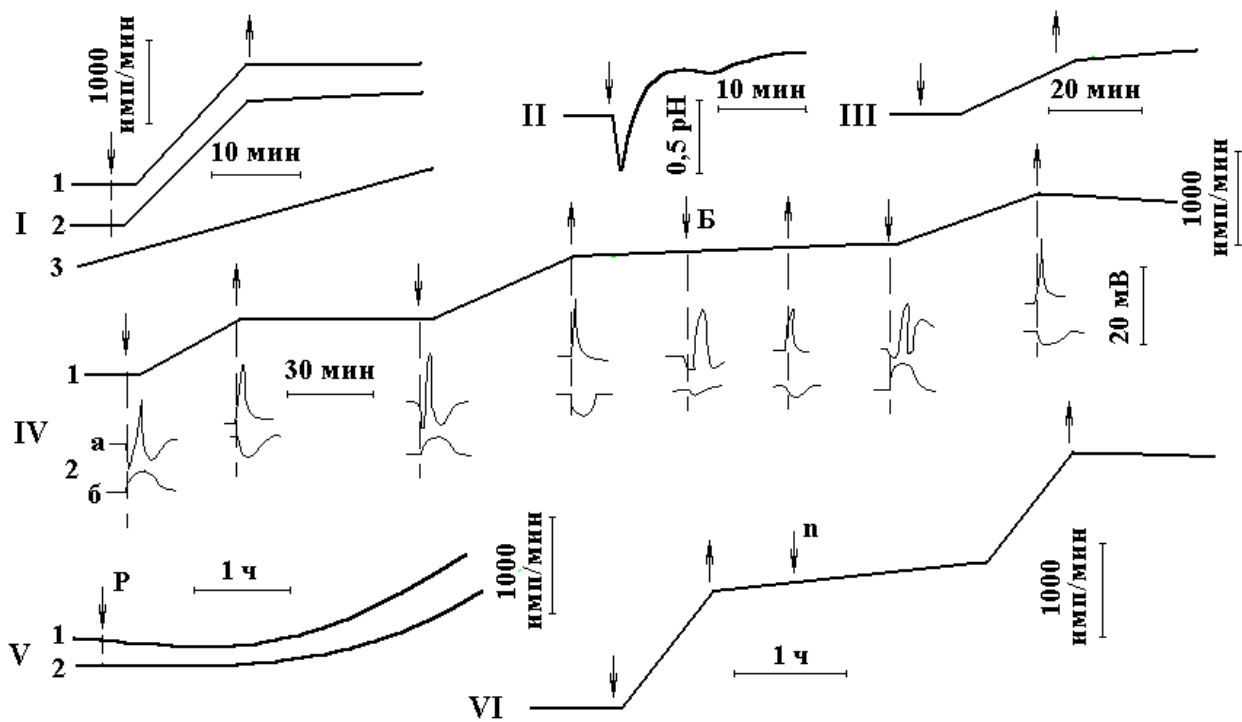


Рис. 5. Стимуляция поглощения элементов минерального питания и выделения протонов растениями под влиянием светового воздействия.

I – проросток кукурузы в почве ^{32}P в листе – 1 и в стебле – 2; 3 – без освещения). II – проросток кукурузы в растворе (H^+ в корнях при локальном лазерном воздействии ($\lambda = 633,8 \text{ нм}$; $W = 3 \text{ мВт/см}^2$ на лист)). III – саженец винограда в почве ^{45}Ca в листе). IV – проросток кукурузы в почве ^{32}P в листе – 1; электрическая реакция в листе на свет – 2а и стебле – 2б, физиологический блок – Б). V – саженец винограда на полевом участке (^{32}P в штамбе – 1 и листе – 2 во время рассвета – P). VI – проросток кукурузы в почве (^{32}P при резком – \downarrow и постепенном \downarrow II увеличении интенсивности света). Стрелки – начало и конец воздействия светом от лампы накаливания (5 Клк), кроме II и V. VII – растение фасоли (радиоавтографический анализ ^{32}P , поступившего из раствора $\text{KH}_2^{32}\text{PO}_4$ и ^{14}C из $^{14}\text{CO}_2$ воздуха при 5-минутном световом воздействии сразу после окончания опыта – 1 и спустя 60 дней – 2).

Наша концепция получила принципиальное подтверждение в работах других исследователей [23, 38, 39].

5. Электрофизиологическое воздействие лазерного излучения на растения

Нами впервые было использовано лазерное излучение в качестве электрофизиологического раздражителя [4, 40, 41]. Благодаря уникальным характеристикам этого излучения удалось получить новые факты, которые расширяют наши представления о природе и функции фотоиндуцированных электрических сигналов (рис. 6). Сверхкороткая длительность импульса (единицы пикосекунд) и высокая плотность лазерного излучения позволили обнаружить на листьях растений типичный ПД, которому присущ закон "все или ничего" (рис. 6, Б, Е), ПД способен распространяться по листу. Получены также эффекты суммации подпороговых раздражений (рис. 6, Е, П) и градуальный ответ на повышение интенсивности воздействия (рис. 6, Г, Е). Форма реакции на низкоинтенсивное излучение такая же, как на обычный свет (рис. 6, А). Высокая монохроматичность лазерного излучения, по-видимому, обеспечивает более точное попадание фактора на определенный фоторецептор (так, приемником лазерного излучения $\lambda = 633,8$ нм может быть хлорофилл и фитохром) по сравнению с монохроматическим светом, получаемым с помощью обычных и интерференционных фильтров. Об этом свидетельствуют различия в АЭР при действии на объект указанных факторов [4, 40, 41]. Поляризация и когерентность излучения вносит вклад в общую АЭР [4, 40, 41 (рис. 6, В)], что обуславливается пространственно-временной упорядоченностью объекта (АЭР в вариантах использования лазерного излучения $\lambda = 633,8$ нм), а) без изменения его характеристик, б) со снятой когерентностью, в) со снятой когерентностью и поляризацией) составили для листа кукурузы, в мВ – $4,1 \pm 0,4$; $2,7 \pm 0,2$; $2,4 \pm 0,2$.

Известно, что поляризованный свет позволяет выявить полярность расположения клеток в листе и хлоропластов в клетке [42], а также фитохромов по отношению к поверхности цитоплазматической мембраны клетки [43]. Роль когерентности в структуре и функции объекта еще предстоит выяснить. Во всяком случае считается, что живые организмы способны генерировать, подобно лазерам, собственное когерентное электромагнитное излучение [44]. Продолжительное навязывание растениям ориентационных эффектов путем выращивания растений на поляризованном свете привело к существенным изменениям в величинах стационарных БЭП и АЭР при действии плоскополяризованного света, ориентированного вдоль или поперек оси листа [41]. С помощью лазерного излучения, которое обладает поляризацией, нам впервые удалось обнаружить: а) оптическую активность (ОА) семян и листьев растений кукурузы в норме (знак вращения плоскости поляризации объектов совпадал со знаком их биоизомерии то есть левизной или правизной) [4]; б) волну структурных перестроек в листе (с преобладанием *l*-типа или *d*-компонентов ОА), которая сопровождает волну электрического возбуждения от внешних раздражителей [41]. Зависимость ОА от длины волны светового раздражителя имела максимум в желто-оранжевой области [41].

6. Электрофизиологическое действие γ -излучения на растения

Нами впервые показано, что γ -излучение, обычно не воспринимаемое органами чувств человека и животных, является эффективным электрофизиологическим раздражителем для растений [40, 45]. Тем самым наглядно демонстрируется высокая чувствительность системы электрофизиологической сигнализации у растений, что может быть использовано при разработке экспресс-методик оценки радиобиологических эффектов и радиозэкологического мониторинга.

В полевых условиях на установке γ -поле была исследована электрическая реакция растений на острое γ -излучение с мощностью дозы 10 Гр/ч [43] (рис. 7). Обнаружена позитивация БЭП с А до 6 мВ и негативация до 30 мВ с четко выраженным латентным периодом до 30 мин. Выключение источника γ -излучения приводило к резкому (без латентного периода) изменению БЭП, по полярности совпадающему с действием фактора (рис. 7). Пороги реакции находятся в пределах поглощенной дозы 2-6 Гр, которая для кукурузы считается стимуляционной [46]. Характер электрофизиологической стереополярности листьев – как при действии светового фактора [1, 40, 45], то есть γ -излучение является раздражителем I группы [1, 40, 45]. На пестром листе колеуса обнаружено участие всех пигментов листа в генерации электрической реакции [1, 40, 45]. Следовательно, на этом листе наблюдается мозаичность электрофизиологического и радиобиологического эффекта. В целом, γ -излучение выступает как неспецифический электрофизиологический раздражитель, индуцирующий градуальный ответ живой системы на экстремальные воздействия.

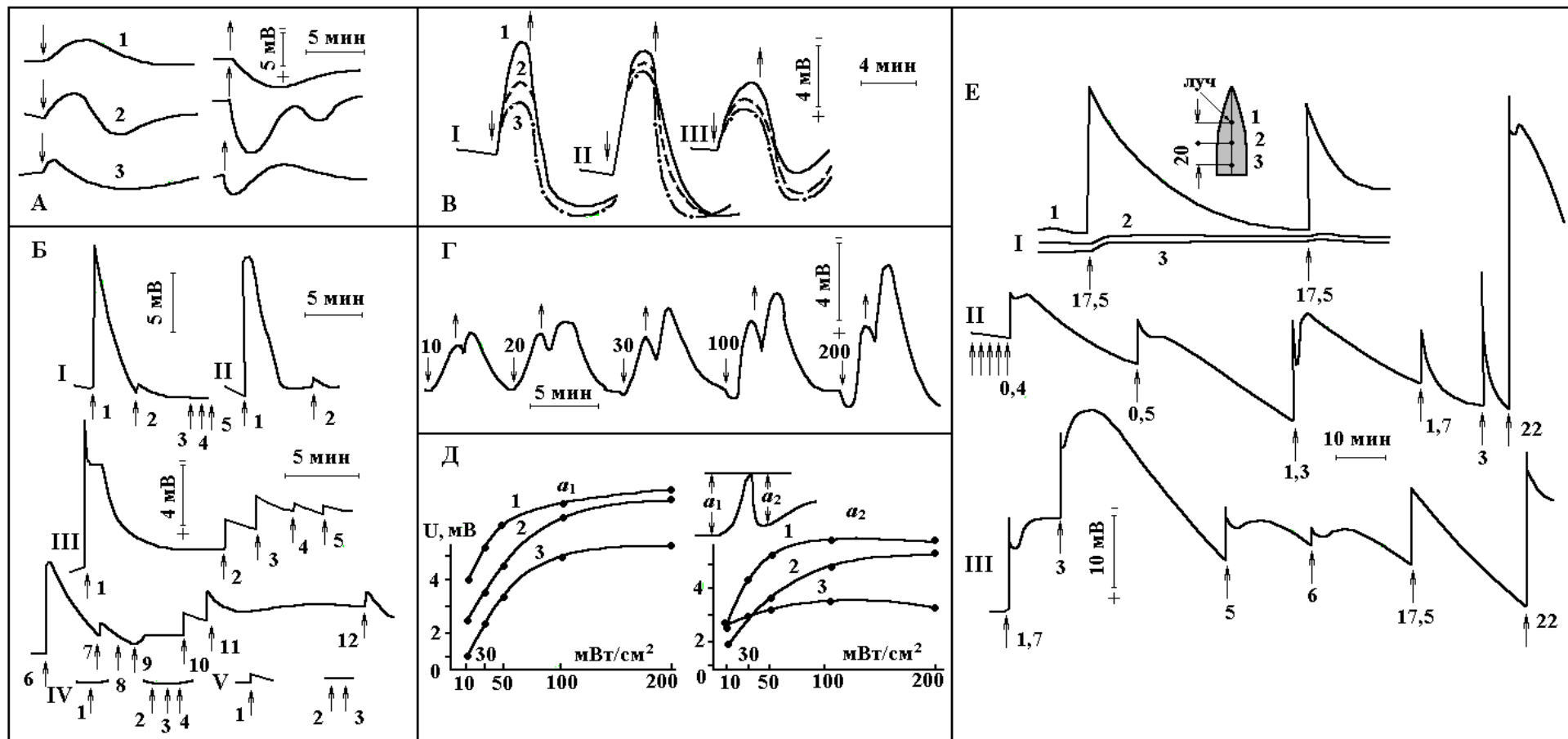


Рис. 6. Характеристики электрической реакции листьев растений (кукурузы) на излучения гелий-неонового лазера (ГНЛ, $\lambda = 632,8$ нм), гелий-кадмиевого лазера (ГКЛ, $\lambda = 440$ нм), перестраиваемого аргонно-ионного лазера (ПАИЛ) и импульсного рубинового лазера (ИРЛ, $\lambda = 694,3$ нм, реакция на одиночный импульс).

А – общий вид реакции от лампы накаливания (1), ГНЛ (2) и ГКЛ (3) при одинаковой плотности мощности ($W = 0,1$ мВт/см²). Б – ИЛР ($W = 20$ мВт/см²): I–V – № растений, 1–12 – № воздействий: 1–12 (I–III) – на лист в зоне измерительного электрода; 1 (IV) – на корневую шейку; 2, 3 (IV) – на корни; 1, 3 (V) – на лист (точка воздействия удалена от электрода на 40 мм). В – ПАИЛ ($\lambda = 459$ нм, $W = 3$ мВт/см²): I–III – повторности опыта; 1 – поляризованный когерентный свет; 2 – неполяризованный когерентный свет; 3 – неполяризованный некогерентный свет. Г – ПАИЛ ($\lambda = 459$ нм, $W = 10, 20, 30, 100, 200$ мВт/см²). Д – ПАИЛ (λ : 1 – 457 нм; 2 – 488 нм; 3 – 514 нм); a_1, a_2 – амплитуды реакции. Е – ИРЛ: I–III – № опыта; 1–3 – точки измерения потенциалов на листе; цифры под стрелками – W в мВт/см². Для А, В, Г – стрелками вниз показано начало воздействия, стрелками вверх – конец воздействия; для Б, Е – стрелками вверх – начало воздействия.

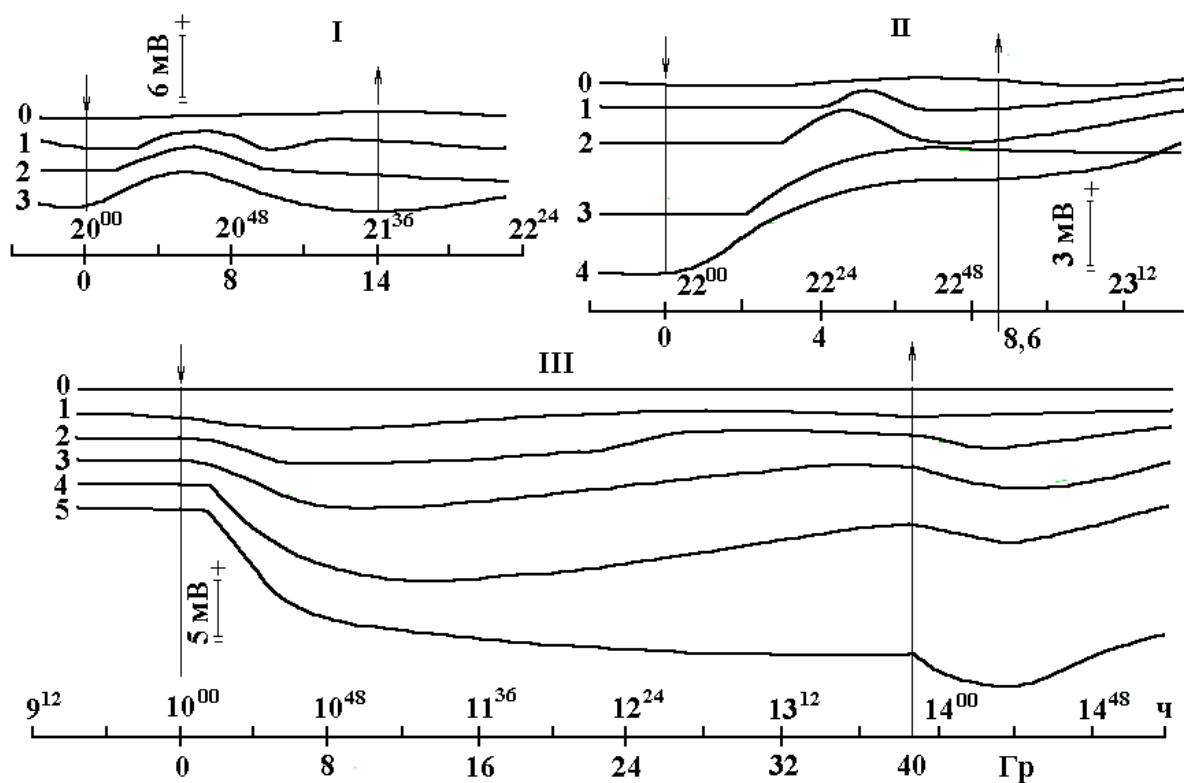


Рис. 7. Типы электрической реакции листьев 15-дневных проростков кукурузы на острое γ -облучение. I, II – отчлененные листья (линия А632 и гибрид М420); III – лист на целом растении (гибрид М420). 1–5 – № растений; О – потенциал электрода сравнения, стрелки – начало и конец воздействия.

Параметры реакции зависят от генотипа объекта, его возраста и физиологического состояния.

Изучалось также электрическое состояние растений кукурузы, произрастающих на γ -поле на разных расстояниях от γ -источника и тем самым получающих разные дозы [40, 45]. На первом этапе опыта (30–35 дней после посева) хроническое облучение вегетирующих растений привело к позитивации стационарных БЭП листьев лишь на участке с мощностью дозы 0,1 Гр/ч (контроль и опыт, в мВ: $-49,7 \pm 4,4$ и $-33,9 \pm 1,7$) еще до видимых морфологических различий у листьев. На втором этапе опыта (40–45 дней после посева) позитивация БЭП усилилась и захватила объекты всех участков поля (при этом контроль и облучение мощностью дозы 0,1 Гр/ч, составил, в мВ: $-74,7 \pm 2,5$ и $-48,8 \pm 2,9$). И в данном случае морфологические и физиологические изменения у растений проявились незначительно.

Таким образом, растения электрически реагируют как на острое, так и на хроническое γ -излучение значительно оперативнее, чем их морфология и физиология.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маслоброд С.Н. Пространственно-временная организация поверхностных биоэлектрических потенциалов растительного организма. 1. Электрофизиологическая стереополярность // Электронная обработка материалов. 1999. № 6. С. 49–64.
2. Маслоброд С.Н. Пространственно-временная организация поверхностных биоэлектрических потенциалов растительного организма. 2. Электрофизиологическая ритмическая активность // Электронная обработка материалов. 2000. № 1. С. 65–72.
3. Полевой В.В. Физиология растений. М., 1989.
4. Маслоброд С.Н. Электрофизиологическая полярность растений. Кишинев, 1973.
5. Шабала С.Н., Маслоброд С.Н. Электромагнитное взаимодействие в системе прорастающих семян // Электронная обработка материалов. 1993. № 6. С. 51–53.

6. *Маслоброд С.Н., Шабала С.Н., Третьяков Н.Н.* Эффект зеркальной симметризации ценотической пары проростков и электромагнитное взаимодействие прорастающих семян // Доклады АН России. 1994. Т. 334. № 3. С. 396–398.
7. *Osterhout W., Hill S.* Salt bridges and negative variation // Journ. Gener. Physiol. 1930. V.13. P. 547–552.
8. *Бос Д.* Избранные произведения по раздражимости растений в 2 томах. М., 1964. Т. 1–2.
9. *Синюхин А.М.* Функциональное значение потенциалов действия растительного организма. Вторая функция флоэмного пучка высшего растения // Известия АН СССР, серия биол. 1972. С. 747–755.
10. *Malone M.* Kinetics of wound-induced hydraulic signals and variation potentials in wheat seedlings // Planta. 1992. V. 187. № 34. P. 505–510.
11. *Полевой А.В., Танкелюн О.В., Полевой В.В.* Быстрая дистанционная передача сигнала о локальном стрессовом воздействии у проростков кукурузы // Физиология растений. 1997. Т. 44. № 5. С. 645–651.
12. *Шабала С.Н., Маслоброд С.Н.* Прямое доказательство взаимодействия между растениями посредством распространяющихся электрических сигналов // Электронная обработка материалов. 1991. № 2. С. 69–72.
13. *Маслоброд С.Н., Шабала С.Н., Третьяков Н.Н.* Передача электрических сигналов от одного растения к другому через адекватные стеблевые контакты. Идентификация стереоспецифичности сигнала // Электронная обработка материалов. 1995. № 2. С. 67–70.
14. *Оприлов В.А.* Распространяющееся возбуждение у высших растений // Успехи современной биологии. 1977. Т. 83. № 3. С. 442–458.
15. *Pickard B.G.* Electric signals in higher plants // Naturwiss. 1974. V. 61. P. 60–64.
16. *Шабала С.Н., Маслоброд С.Н.* Частотные характеристики вынужденных колебаний биопотенциалов растений // Биоэлектrogenез и мембранный транспорт у растений. Горький, 1989. С. 78–83.
17. *Shabala S.N.* Leaf bioelectric responses to rhythmic light; identification of the contributions from stomatal and mesophyll cells // Aust. Journ. Plant Physiol. 1997. V.24. P. 741–749.
18. *Урманцев Ю.А.* Симметрия природы и природа симметрии. М., 1976.
19. *Рейд Ф.* Симметрия растений // Узоры симметрии. М., 1980. С. 140–150.
20. *Маслоброд С.Н., Шабала С.Н., Буюкли Л.Б., Корлэтяну Л.Б., Пирожок Е.Ф., Русановская Е.Г.* Оценка взаимодействия растений в группе по зеркальной симметризации пары проростков // Известия АН Республики Молдова, серия биол. и хим. наук. 1994. № 6. С. 14–18.
21. *Becker R.O.* The significance of bioelectric potentials // Bioelectrochem. and Bioenerg. 1974. V. 1. № 1–2. P. 167–189.
22. *Jaffe L.F., Nuccitelli R.* Electrical control of development // Ann. Rev. Biophys. Bioenerg. 1977. V. 6. P. 445–476.
23. *Мелкумян Н.М., Рогатых Н.М., Зубарев Т.Н.* Об информационной роли потенциалов действия у клеток ацетабулярии // Доклады АН СССР. 1975. Т. 224. С. 1223–1225.
24. *Глаголев А.Н., Глаголева Т.Н., Левин С.А., Потапова Т.В., Скулачев В.П., Чайлахян Л.И.* Транспорт энергии посредством передачи электрохимического потенциала вдоль трихома цианобактерий // Доклады АН СССР. 1980. Т. 255. № 6. С. 1490–1493.
25. *Маслоброд С.Н.* Динамика зеркальной симметризации разновозрастных пар проростков кукурузы // Известия АН Республики Молдова, серия биол. и хим. наук. 1997. № 1. С. 3–7.
26. *Титов Ю.В.* Эффект группы у растений. Л., 1978.
27. *Brauner L.* Über den Primäreffekt der Schwerkraft beim Geotropismus der Pflanzen // Naturwiss. Rundschau. 1956. V. 9. № 12. P. 446–470.
28. *Гурвич А.Г.* Митогенетическое излучение. М., 1932.
29. *Касинов В.Б.* Биологическая изомерия. Л., 1973.
30. *Курсанов А.Л.* Транспорт ассимилятов в растении. М., 1976.
31. *Маслоброд С.Н., Земиман А.Я., Семин В.С., Степанов К.И., Лысиков В.Н.* О двух механизмах поступления фосфора в растения при световом воздействии. В сб: Проблемы фотоэнергетики растений. Кишинев, 1975. В. 3. С. 171–185.
32. *Маслоброд С.Н., Земиман А.Я., Степанов К.И., Лысиков В.Н., Семин В.С.* О функциональной роли фотоиндуцированной электрической реакции растения в процессе поглощения фосфора из почвы при световом воздействии // Физиология растений. 1975. Т. 22. В. 6. С. 1162–1167.
33. *Маслоброд С.Н., Земиман А.Я., Степанов К.И., Лысиков В.Н., Баркон И.А., Жариченко Г.И.* Динамика поступления в растения элементов минерального питания при световом стрессе. В сб: Минеральное питание и продуктивность растений. Киев, 1978. С. 206–211.

34. *Килянчук В.И., Земиман А.Я., Маслоброд С.Н.* Транспорт радиофосфора у винограда. Кишинев, 1979.
35. *Маслоброд С.Н., Медведев С.С., Максимов Г.Б., Лыиков В.Н.* Влияние светового облучения надземной части проростков кукурузы на поглощение ионов корнями. Тезисы докладов VI Всесоюзной конференции по фотоэнергетике растений. Львов, 1980. С. 39–40.
36. *Маслоброд С.Н.* Электрический "язык" растений. Кишинев, 1981.
37. *Опрутов В.А., Пятыгин С.С., Ретивин В.Г.* Биоэлектрогенез у высших растений. М., 1991.
38. *Gragam R.D., Bowling D.I.F.* Effect of the shoot on the translocation transmembrane potential of root cortical cells of sunflower // *Journ. Exp. Bot.* 1977. V. 28. № 105. P. 886–893.
39. *Вахмистров Д.Б.* Питание растений. М., 1979.
40. *Маслоброд С.Н., Лыиков В.Н., Духовный А.И., Олоер Ф.Г.* Электрофизиология кукурузы. Кишинев, 1978.
41. *Девятков Н.Д., Лыиков В.Н., Маслоброд С.Н., Макеева Н.С., Боярских Г.В.* Исследование лазерного излучения как фактора, изменяющего электрическое состояние растений // *Проблемы фотоэнергетики растений.* Кишинев, 1975. В.3. С. 142–158.
42. *Frank M.N.* Die Bewegungsreaction des Mougeetia-Chloroplasten bei kontinuierlicher Belichtung mit linear polarisierten langs-schlingendem Belicht // *Zeitsch. Pflanzenphys.* 1977. B. 82. № 3. P. 210–234.
43. *Haupt W., Mortel G., Winkelkemper F.* Demonstration of different dichroic orientation of phytochrome P_R and P_{FR} // *Planta.* 1987. V. 68. P. 183–186.
44. *Frohlich H.* Koherence in biological systems // *Collect Phenom.* 1981. V. 3. № 3–4. P. 139–146.
45. *Маслоброд С.Н., Акимов В.К., Шарбан И.Н., Лыиков В.Н.* Электрофизиологическое изучение растений кукурузы при остром и хроническом облучениях в условиях гамма-поля // *Радиобиология.* 1979. Т. 19. № 6. С. 876–882.
46. Предпосевное γ -облучение семян сельскохозяйственных культур. М., 1974.

Поступила 05.09.99

Summary

The systems of the electrophysiologic regulation of the plant organism ensuring the mechanisms of its spatial and temporal organization of the surface bioelectric potentials have been studied. The systems of the rapid and slow electrophysiologic signalization in plants (when the electric signal is transmitted from one plant to another in the absence of the water-ion canal, as well as under conditions of the electromagnetic distant induction of the seedling leftness and rightness in horizontal and vertical directions) have been identified. An electrophysiologic mechanism of the connection between above-ground and under-ground parts of the plant via a photoinduced electric signal, moving from leaves to roots and stimulating the inflow of mineral nutritive elements into plants before the chemical signal reaches the roots (photoassimilates) has been found out. The electrophysiologic action of untraditional stimulators – laser and γ -irradiation – on the plants has been discovered. A specific influence of the laser irradiation (its polarization, coherence, monochromaticity, power, modulation) and γ -irradiation (dose power and dose) on the parameters of the electric signals induced by them in plants has been shown.

ВЛИЯНИЕ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ НА РОСТ И ЛИПИДО-ОБРАЗОВАНИЕ *STREPTOMYCES CANOSUS* 71

*Институт микробиологии Академии наук РМ,
ул. Академическая, 1, г. Кишинев, МД-2028, Республика Молдова*

Известно, что под воздействием различных физических факторов могут изменяться все, без исключения, характерные признаки и свойства микроорганизмов. Степень изменения зависит от вида и дозы используемого мутагена, а также от рода, вида и даже штамма микроорганизма. Кроме того, учитывая, что биохимические мутанты крайне редко возникают спонтанно, использование радиации дает возможность увеличить частоту этих мутаций [1–3].

Эффективность использования ионизирующих излучений и их влияние на наследственную изменчивость показаны на многочисленных микробных и растительных объектах [4–7]. Применение УФ и γ -лучей в селекции микроорганизмов позволило получить высокоактивные штаммы различных продуцентов биологически активных веществ [2–9].

Среди микроорганизмов как продуценты физиологически активных соединений различной химической структуры особое место занимают актиномицеты, способные синтезировать витамины группы В, свободные аминокислоты, антибиотики медицинского и немедицинского (кормового) назначения. Учитывая перспективность кормовых препаратов для животноводства уже в 70–80-е годы проводилась селекция активных вариантов актиномицетов методом экспериментального мутагенеза, в том числе и ионизирующего излучения. Это позволило выбрать в качестве промышленных вариантов мутанты актиномицетов, обладающие выраженными антибиотическими и стимулирующими свойствами для животноводства и растениеводства [10, 11].

В последние годы различные физические и химические факторы использовали для получения штаммов микроорганизмов, отличающихся повышенным синтезом липидов, содержащих полиненасыщенные жирные кислоты. Так, например, после облучения УФ-лучами гриба *Mortierella isabelina*, содержащего в биомассе 27,0 % липидов, из которых на долю γ -линоленовой кислоты приходилось 3,3%, был получен стабильный мутант М₆, у которого в биомассе липиды составляли 32,8%, а γ -линоленовая кислота – 8,44% [12].

В доступной литературе нам не удалось встретить сообщение о получении методом экспериментального мутагенеза новых высокопродуктивных штаммов актиномицетов, отличающихся от исходных культур качественным и количественным составом липидов биомассы. В связи с этим целью исследований являлось изучение влияния γ -излучения на рост и липидообразование *Streptomyces canosus* 71.

Методика эксперимента

Объектом исследований служил музейный штамм стрептомицетов – *Streptomyces canosus* 71. Для изучения влияния ионизирующего излучения на рост и липидообразование стрептомицетов водную суспензию спор *S. canosus* 71 облучали на радиационно-химической γ -установке РХМ – γ -20 с активностью 12750 Кюри и мощностью 0,67 Гр/с. Источником γ -лучей является радиоактивный Co^{60} .

Использовали дозы 1000, 2000, 3000 и 4000 Гр. После обработки спор проводили микробиологический посев на агаризованную среду Чапека. Затем подробно изучали и описывали культуральные и морфологические особенности отличающихся от исходной культуры колоний [13].

Выбранные варианты культивировали на комплексной среде М-1 (основной источник углерода – кукурузная мука) в колбах Эрленмейера на вибростоле (180 об/мин) в течение 5 суток при 27°C. Из биомассы исследуемых вариантов экстрагировали общие липиды модифицированным методом Фолча [14].

Качественный и количественный состав липидов определяли методом тонкослойной хроматографии (ТСХ) и денситометрически. Способность накапливать биомассу и продуцировать липиды при росте на комплексной среде М-1 у выбранных вариантов сравнивали на момент отбора, через 6, 12, 18 и 24 месяца.

Результаты и их обсуждение

Известно, что при селекции хозяйственно полезных форм отбор почти всегда идет по количественным признакам [2, 3]. Поэтому из выбранных и проанализированных 1200 колоний были отобраны варианты с более интенсивным окрашиванием гифов и характеризующиеся постоянством морфологических признаков после многократного пассирования. Это были варианты 3, 6, 9 и 11, которые уже на 2-й, 3-й день роста на агаризованной среде Чапека образовывали густой газон. Следует отметить, что 3, 6 и 9-й тип колоний были обнаружены после облучения суспензией спор *S.canosus* 71 в дозах 1000, 2000 и 3000 Гр, а 11-й при дозе – 3000 Гр (табл.1).

Сравнение биосинтетической активности вариантов показало, что на момент отбора по количеству биомассы 6 и 11 варианты превосходили исходную культуру *S.canosus* 71 (контроль) на 124,4 и 50,0% соответственно. 9-й вариант незначительно превосходил контроль (на 7,0%), а у 3-го варианта количество биомассы было меньше, чем у остальных вариантов (81,6 % от исходной культуры). По продукции липидов (г/л) 6 и 11-й варианты также превосходили контроль (на 98,4 и 21,0% соответственно).

При анализе данных, полученных через 6 месяцев хранения, было отмечено, что выбранные 4 варианта превосходили контроль по образованию биомассы, а 3-й вариант – по содержанию липидов в биомассе. Причем, если на момент отбора в биомассе этого варианта липиды составляли 76,5%, то через 6 месяцев – 144,8% от контроля. Посев на агаризованную среду Чапека показал, что популяция

Таблица 1. Морфология вариантов *S.canosus* 71, полученных после воздействия γ -излучения

Доза, Гр	Среда культивирования	Тип колоний	Воздушный мицелий	Субстратный мицелий	Диаметр колоний, мм	Внешний вид колоний
I,II,III	1, 2	3	белый	буроватый	0,5	карликовые, круглые
I,II,III	1, 2	6	белый	буроватый	6,0–7,0	круглые с кратером, в центре белые, по краям – светлосерые
II	2	9	грязно-серый	буроватый	2,5–3,0	округлые, в центре – равномерно-складчатые
III	2	11	сиреневый	буроватый	3,0	округлые, в центре выпуклые
Контроль	1, 2	1	белый	буроватый	3,5–4,0	форма снежинок, кратер широкий, круглый, аспорогенный, по краям колоний равномерно-складчатые
	1, 2	2	белый	буроватый	2,0–2,5	мелкие, круглые, в центре выпуклые

Примечание. Рост колоний на средах: 1 – Чапека с сахарозой; 2 – Чапека с глюкозой; дозы (Гр): I – 1000; II – 2000; III – 3000.

3-го варианта, в отличие от вариантов 6,9,11, неоднородна и состоит из 5-ти типов колоний, резко отличающихся как по форме и размерам, так и по цвету воздушного мицелия (от белого, серовато-белого, темно-серого, до землистого с белыми вкраплениями). В данном случае, вероятно, можно говорить о сезонной изменчивости этого варианта подобно той, что наблюдал Кузнецов с соавторами, у актиномицетов – продуцентов антибиотиков [15].

По мнению Дриняева, такой вариант с высокой морфологической и биосинтетической гетерогенностью непригоден в качестве продуцента, но является перспективным для селекционной работы [16].

Через 12 месяцев у трех вариантов (6, 9 и 11-й) накопление биомассы и липидов происходило следующим образом: количество биомассы составляло 247,2; 110,8 и 179,5%, а липидов – 95,3; 79,4 и 96,6 % к контролю (исходной культуре) (табл. 2).

Таблица 2. Образование биомассы и липидов у 6, 9, 11-го вариантов (в % к исходной культуре *S.canosus* 71)

Варианты	АСБ, %	Общие липиды, %	Продуктивность липидов, %
На момент отбора			
6	224,4	88,1	198,4
9	107,3	57,2	61,4
11	150,0	80,4	121,0
через 6 месяцев			
6	147,4	93,2	136,6
9	107,1	73,3	78,6
11	170,8	89,3	152,8
через 12 месяцев			
6	247,2	95,3	235,8
9	110,8	79,4	87,4
11	179,5	96,6	173,6
через 18 месяцев			
6	216,0	98,9	210,3
9	158,3	71,1	111,8
11	170,7	99,3	167,6
через 24 месяца			
6	247,4	122,1	301,2
9	116,7	81,5	95,1
11	182,4	106,5	195,1

Периодические пересевы, хранение стрептомицетов в лабораторных условиях (холодильник) в течение еще 6-ти месяцев следующим образом повлияли на биосинтетическую активность исследуемых вариантов, сохранивших за это время морфологическую однородность: было отмечено увеличение количества биомассы у варианта 9 (7,2 г/л и 11,9 г/л – 12 и 18 месяцев соответственно), а у вариантов 6 и 11-го количество биомассы осталось на прежнем уровне (16,1 и 16,2 г/л у 6-го варианта, а 11,7 и 12,7 г/л у 11-го варианта). Анализируя липидообразующую деятельность этих вариантов, было замечено, что она незначительно повысилась у варианта 6 и 11, а у 9-го варианта осталась на прежнем уровне.

Показатели биосинтетической активности исследуемых вариантов после 24-х месяцев хранения и периодических пересевов были следующие: уменьшение образования биомассы у всех изучаемых стрептомицетов (как у исходной музейной культуры, так и у 3-х вариантов, полученных после воздействия γ -излучения), и увеличение количества содержащихся в ней липидов (табл. 2).

За время эксперимента было замечено, что образование биомассы стрептомицетами происходило следующим образом: как правило, количество ее было больше, если опыты проводили в мае – июне, то есть в период наиболее благоприятный для активизации роста и размножения актиномицетов, и меньше – в позднеосенний период (конец октября – начало ноября). Результаты проведенных наблюдений согласуются с данными литературы [1, 2] и позволяют предположить, что после

воздействия на музейный штамм *S.canosus* 71 γ -излучения, удалось получить варианты, отличающиеся морфологической однородностью и относительным постоянством уровня биосинтетической активности, которая выражается следующими показателями количества биомассы: у варианта 6 на 116,0 – 147,4%, у варианта 11 на 50,0 – 82,4% и варианта 9 на 7,3 – 58,3% выше исходной культуры. Количество липидов в биомассе составляет у 6-го варианта 88,1 – 122,1%, 11-го варианта – 80,4 – 106,5%, а у 9-го варианта – 57,2 – 81,5% к исходной культуре (табл. 2).

Следующим этапом исследований было изучение качественного и количественного состава синтезируемых липидов новыми вариантами. Проведенные исследования показали, что под действием γ -излучения у *S.canosus* 71 процесс липидообразования: проявился в неизменности качественного состава при существенных количественных изменениях у основных липидных фракций (табл. 3). При разделении общих липидов, с использованием метода ТСХ было установлено, что как у исходной культуры, так и у новых вариантов липиды состояли из классов соединений, которые были идентифицированы как фосфолипиды, моно-, ди-, триглицериды, стерины и их эфиры, воска. Кроме них на хроматограммах были выявлены и две неидентифицированные фракции.

Таблица 3. Фракционный состав липидов *S.canosus* 71 и его вариантов (в % к общим липидам)

Липидные фракции	Время определения	S.canosus 71	Варианты		
			6	9	11
Фосфолипиды	1	12,8	14,5	16,7	15,3
	2	17,4	19,9	18,1	15,8
	3	12,5	15,8	16,8	15,5
	4	8,7	11,9	11,2	13,4
	5	11,9	16,4	14,1	15,1
Стерины	1	15,1	19,7	19,6	17,4
	2	15,6	19,2	19,1	15,3
	3	20,9	27,2	26,7	23,1
	4	14,5	20,5	19,5	19,6
	5	14,5	16,4	18,3	16,6
Монодиглицериды	1	17,0	15,5	21,3	21,9
	2	15,3	12,8	18,2	19,8
	3	10,2	8,9	15,6	15,1
	4	15,1	16,6	12,9	14,2
	5	19,0	17,9	22,8	15,6
Триглицериды	1	22,2	23,2	21,0	23,1
	2	26,8	27,1	15,9	19,2
	3	26,2	28,3	24,4	27,3
	4	22,3	21,9	24,0	21,8
	5	24,2	25,0	21,2	23,1
Эфиры стеринов воска	1	27,2	21,3	21,3	22,3
	2	21,6	21,1	19,2	22,0
	3	19,1	18,3	16,4	14,3
	4	15,1	13,2	16,2	16,2
	5	19,5	24,3	18,3	17,7

Примечание. Время определения: 1 – на момент отбора вариантов; 2 – через 6 месяцев; 3 – через 12 месяцев; 4 – через 18 месяцев; 5 – через 24 месяца хранения.

Культивирование исходной культуры и трех ее вариантов на сложной комплексной среде М-1 способствовало тому, что в количественном отношении преобладающими фракциями были триглицериды, суммарная фракция эфиров, стеринов и восков, а также фракция стеринов. Далее, по степени уменьшения процентного содержания в общих липидах можно назвать суммарную фракцию моно-, диглицеридов и фракцию фосфолипидов. Сравнивая эти данные с полученными нами ранее, можно отметить, что количественное соотношение основных липидных фракций у представителя так назы-

ваемой «серой» группы стрептомицетов – *S.canosus* 89 существенным образом отличается от *S.canosus* 71 и его вариантов: у *S.canosus* 89 при культивировании на комплексной мучной среде эта разница более значимая. Так, если у *S.canosus* 89 триглицериды составляют 53,7%, суммарная фракция эфиров стерина и восков – 7,5%, стерина – 3,9% и фосфолипидов – 1,8%, то у *S.canosus* 71 и его новых вариантов триглицериды составляют 21,2–25,0%, эфиры стерина и воска – 17,7–24,3%, стерина – 21,2–25,0% и фосфолипиды 11,9–16,4% (на момент завершения исследований, то есть через 24 месяца после отбора новых вариантов) (табл. 3). Это происходит, вероятно, потому, что, как известно из литературы, среда культивирования оказывает влияние на рост и липидообразование актиномицетов [1, 8, 11, 15]. Мы же в этих опытах сократили вдвое количество основного источника углерода – кукурузную муку, изменив тем самым существенный фактор – соотношение С:N, вследствие чего нейтральная фракция липидов (триглицериды) уменьшилась, а такие важные биологически активные фракции, как фосфолипиды и стерина, отличались повышенным содержанием. Это также согласуется с литературными данными и данными, полученными нами ранее, когда под воздействием такого физического фактора, как лазерное облучение, у каротинообразующих дрожжей *Rhodotorula gracilis* K-1 отмечали увеличение содержания фосфолипидов и стерина [17, 18]. По данным, представленным в табл. 3, у варианта 6 в общих липидах, фракция фосфолипидов за время наблюдений составляла 113,3–139,9%, у варианта 9 – 104,0–134,4%, а у варианта 11 – 90,8–154,0% по отношению к контролю (исходной культуре), а стерина – 123,1 – 141,4%; 126,0 – 134,5% и 98,1–135,2% соответственно по вариантам.

Таким образом, проведенными исследованиями установлено, что под влиянием γ -излучения у *S.canosus* 71 произошли изменения в характере накопления биомассы, а также биосинтетической активности, в частности, липидообразования. В результате селекции были выбраны варианты, отличающиеся от исходной культуры не только морфологическими признаками, но и способностью более активно накапливать биомассу, в липидах которой присутствуют такие биологически активные фракции, как фосфолипиды и стерина, количественно превышали содержание их в липидах исходной музейной культуры в среднем на 17,3–54,0% и 23,1–41,4%.

Результаты исследований показывают возможность получения новых высокопродуктивных штаммов актиномицетов, образующих биологически активные вещества липидной природы, при использовании такого физического фактора, как γ -излучение.

Автор выражает благодарность сотруднику Института Генетики АН РМ, кандидату биологических наук И.М. Романовой и сотруднику Института микробиологии И.О. Растимешиной за помощь в проведении эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красильников Н.А. Лучистые грибки. М., 1970. С. 241–242.
2. Алиханян С.И. Селекция промышленных микроорганизмов. М., 1968.
3. Алиханян С.И., Акифьев А.П. Общая генетика. М., 1985. С. 41–48.
4. Каракудиев Р.Т., Хатамов Ш., Каракудиев Т.У., Хашимов К.Х., Имамалиев А.И., Кист А.А. Влияние γ -радиации в сочетании с микроэлементами на семена хлопчатника // Радиобиология. 1986. Т.26. В.5. С. 691–695.
5. Курганова Л.Н., Анисимова А.А., Королева В.Ю. Влияние предпосевного γ -облучения семян на липидный состав мембран хлоропластов и интенсивность перекисидации у гороха // Радиобиология. 1986. Т.26. В.2. С. 273–276.
6. Никитин Д.И., Таштемирова М.А., Питрюк И.А., Сорокин В.В., Оранская М.С., Никитин Л.Е. Высокая устойчивость к ионизирующей радиации некоторых олиготрофных бактерий // Микробиология. 1993. Т.62. В.6. С. 1064–1071.
7. Gille E., Toth T.E., Florin F., Georghita G. The biosynthesis of secondary metabolites in mutagen treated medicinal plants // Roumanian Journ. of Biol. Sciences. 1997. № 5–6. V.1. P.15–16.
8. Шугаева М.Ф. Изменчивость пигментных актиномицетов. Алма-Ата, 1968.
9. Goodrich – Tanriculu M., Lin Jiam – Tsyh., Stafford A.E., Макапугай М.И., Мс Кун Томас А., Fuller G. Novel *Neurospora crassa* mutants with altered synthesis of polyunsaturated fatty acids // Microbiology. 1995. V.141. № 9. P. 2307–2314.

10. Тулемисова К.А. Индуцированная изменчивость актиномицета - продуцента кормового препарата. // Биологически активные вещества микроорганизмов. Сб.тр. Института микр. и вирусол. АН Каз.ССР. 1977. Т.22. С 64–70.
11. Музапбаров Б. Биологически активные вещества *Streptomyces antibioticus* штамм ИМБ 25/779 – стимуляторы роста цыплят. Автореф. дис. канд. биол. наук. Алма-Ата, 1987. С. 18.
12. Zhang Jun, Xiang Layin, Wang Hongmei. Weisshengwuxue tongbao // Microbiology. 1993. V.20. № 3. P. 140–143.
13. Музапбаров Б., Копытина М.Н. Способность к синтезу липидов у вариантов *Streptomyces antibioticus* и жирнокислотный состав триглицеридных фракций мелкокладчатого варианта // Тр. Института микр. и вирусол. Т.25. Алма-Ата, 1988. С. 80–89.
14. Кейтс М. Техника липидологии М., 1975. С. 384.
15. Кузнецов В.Д. Спонтанная изменчивость актиномицетов – продуцентов антибиотиков и стабилизация их биосинтетической активности и таксономических свойств: Автореф. дис. докт. биол. наук. 1975. С. 38.
16. Дрияев В.А., Стерлина Т. С., Березкина Н.Е., Мосин В.А., Кругляк Б.Б., Есинов С.Е., Кобрин М.Б., Юркив В.А. Авермектины: естественная изменчивость штамма – продуцента *Streptomyces avermectilis* ВКМ. А.с.1301.//Биотехнология. 1993. №11–12. С. 21–25.
17. Ларикова Г.А., Гальцова Р.Д. Влияние ионизирующих излучений на биосинтез липидов у дрожжевых организмов // Микробиология. 1967. Т. 36. № 6. С. 953–957.
18. Бурцева С.А. Микробные биоантиоксиданты липидной природы. Автореф. дисс.канд.биол.наук. М., 1986. С. 15.

Поступила 16.02.2000

Summary

The influence of γ -radiation on growth and lipids synthesis of on *Streptomyces canosus* 71 was studied. The strain was irradiated in four doses of γ -rays (1000 – 4000 Gy) and 12 new variants were selected. Three of them were stable in morphological properties and differed from the initial strain in the rate of biomass and lipids synthesis. The possibility of application the γ -irradiation for obtaining the new *Streptomyces* strains, producing the biologically active substances (lipids) was shown.
