

# Синергизм начальной стадии удаления диэлектрических материалов при электроэрозионной обработке в электролитах

А. А. Зарипов<sup>a,\*</sup>, У. Б. Халилов<sup>a,b</sup>, Х. Б. Ашуров<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий Академии наук Республики Узбекистан,  
г. Ташкент, 100125, Узбекистан

<sup>b</sup>Антверпенский университет, Центр передовых исследований NANOLab,  
Научная группа PLASMANT, Антверпен, 2610, Бельгия

\*e-mail: [zaripov@iplt.uz](mailto:zaripov@iplt.uz)

Поступила в редакцию 17.06.2022

После доработки 30.03.2023

Принята к публикации 04.04.2023

Керамика и композиты, многие физико-химические свойства которых существенно превышают аналогичные свойства металлов и их сплавов, качественно обрабатываются преимущественно электроэрозионным методом. Несмотря на существующие работы, механизм начальной стадии удаления материалов до сих пор не раскрыт. Для понимания механизма удаления диэлектриков предлагается новая модель, основанная на экспериментальных результатах, полученных на усовершенствованной электроэрозионной установке. Определено, что начальная стадия удаления диэлектрического материала состоит из трех последовательных этапов, которые связаны с синергетическим воздействием на процесс анионной группы электролитов, плазменного факела и кавитационного удара. Это позволяет лучше понять механизм удаления композитных и керамических материалов, что должно способствовать обеспечению обрабатываемости этих материалов и широкого использования в перспективных технологиях.

*Ключевые слова:* электроэрозионная обработка (ЭЭО), механизм удаления материалов, скорость удаления материалов, синергетический эффект, кавитация, пузырьки, коллапс, электролиты, анионная группа, плазменный факел, импульсный разряд

УДК 621.9.047

<https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.4.01>

## ВВЕДЕНИЕ

Композитные и керамические материалы успешно используются в аэрокосмической технике [1], на железнодорожном транспорте [2], в машиностроении [3], компонентах ракет и гиперзвуковых транспортных средствах [4], системе гражданской инфраструктуры [5], биомедицине [6, 7] и т.д. Столь широкому их применению способствует многообразие физико-механических характеристик и химического состава, которые позволяют создавать материалы с заранее рассчитанными свойствами [8–10].

Несмотря на описанные выше преимущества композитов и керамики, их обработка сопряжена с большими трудностями. В частности, механическая обработка, хотя и имеет предпочтение при обработке металлов [11], приводит к неприемлемому качеству деталей из керамических и композитных материалов [12] и снижает долговременную надежность [13]. Поэтому для обработки допускаются только немеханические методы, такие как лазерный, ультразвуковой, электрохимический и электроэрозионный [14].

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) отличается от других немеханических методов экономичностью и возможностью обработки композитных материалов сложного профиля [15]. При обработке диэлектриков электроэрозионные методы используются в сочетании с другими способами, такими как метод вспомогательного электрода [16], электрохимическая [17], ультразвуковая [18] и лазерная обработки [19, 20]. Однако, несмотря на некоторые преимущества этих комбинированных методов, метод ЭЭО с применением электролитов более практичен и эффективен при обработке керамики и композитов [21].

Невзирая на то, что известны различные модели удаления керамики и композитов, механизм удаления при ЭЭО с использованием электролитов по-прежнему является предметом дискуссий. Научная полемика о механизмах обработки привела к тому, что имеются несколько предполагаемых моделей процесса. Например, Мелк и др. [22] на основе обработки

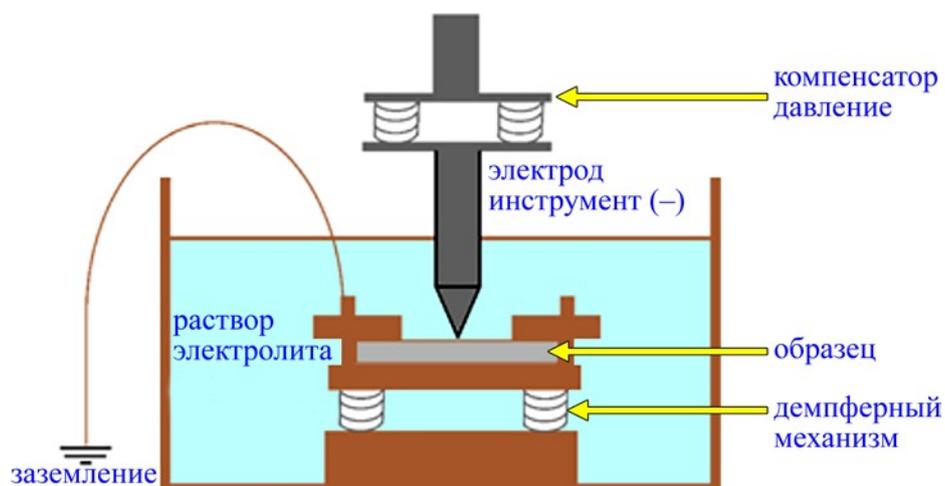


Рис. 1. Схематическое изображение электроэрозионного устройства для удаления диэлектриков в электролитах.

композита 3Y-TZP многослойных углеродных нанотрубок пришли к заключению, что удаление материала происходит вследствие плавления, испарения и растрескивания. Однако вклад появления и существования разрядов, а также роль физико-химических свойств электролитов на всех этапах обработки не были учтены [23]. Ю и др. [24] посредством экспериментов и моделирования показали возможности термической, механической и химической природы удаления углепластика. В работе [25] было изучено влияние термического напряжения на удаление материала композитного карбида кремния, армированного углеродным волокном, и определено, что высокая скорость резания связана с термическим напряжением. Кроме того, Раджпут и др. [26] на основе обработки кварца, стекла, керамики показали, что механизм удаления материала включает термическую эрозию, химическое травление, термическое растрескивание. Дутта и др. [27] определили процентный вклад напряжения, длительности импульса и частоты оборотов электрода-инструмента (ЭИ) в скорость удаления материала (MRR). Они утверждали, что удаление происходит именно за счет плавления и испарения. Клок и др. [28] выявили значительные расхождения, сравнивая измеренную температуру при обработке с уже существовавшими моделями. Кроме того, в описанных выше работах [24–26] не учитываются другие составляющие удаления материала, такие как влияние импульсных разрядов и пузырькового слоя вблизи катода [29].

Несмотря на наличие ряда работ, имеющиеся результаты не дают возможности полностью и всесторонне понять природу удаления материалов. В данной статье мы сосредоточимся на механизме начальной стадии удаления диэлектриков при их обработке в электролитах.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для ЭЭО диэлектриков в электролитах было разработано усовершенствованное электроэрозионное устройство с релаксационным генератором [30], которое показано на рис. 1.

Установка состоит из следящей компенсирующей системы в виде плавающей головки с коническим катодом и держателя-демпфера. Образец, расположенный на держателе-демпфере, прижимается к наконечнику анода и устанавливается внутри ванны, заполненной электролитом NaOH или KOH, или NaCl. Между электролитом и катодом создается разность потенциалов. Выходное напряжение установки можно регулировать в диапазоне 0–400 V, а максимальный ток – до 10 А. Объектами исследования являются стекло (в качестве композита [31, 32]) с химическим составом SiO<sub>2</sub> – 68,4%; CaO – 8,5%; Na<sub>2</sub>O – 9,4%; K<sub>2</sub>O – 7,1%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 3,9%; B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 2,7% и Alumina Ceramics (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Поверхность образцов исследовали с помощью оптического микроскопа NLCD-307B.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2а показан образец диэлектрика, не подвергнутый электроэрозионной обработке. После обработки в электролите края отверстий не идеальны для окружности (см. рис. 2б), как и в случае термической обработки [33]. В частности, на обработанной поверхности отверстия отчетливо видны последовательности сколов, выпуклостей, которые не являются следствием плавления, термообработки. Аналогично Пол и др. [34] определили, что увеличение концентрации электролита приводит к неправильной форме окружности и отверстия. Также Ян и др. [35] считают, что не вращающийся катод приведет к неправильной форме отверстия. В целом визуальная оценка прошитых отверстий

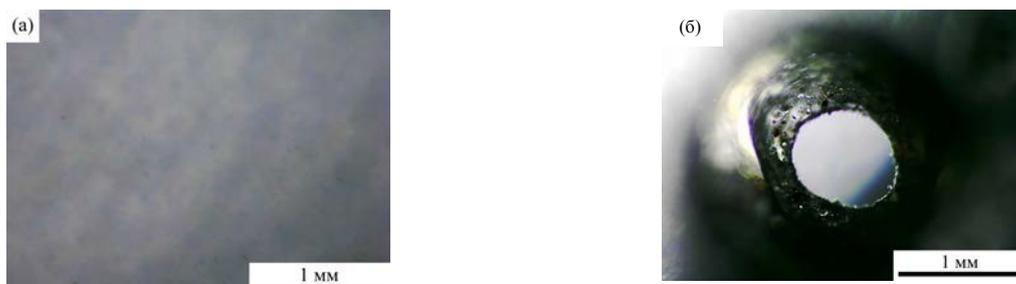


Рис. 2. Образец стеклянной пластины до (а) и после (б) электроэрозионной обработки в электролите.

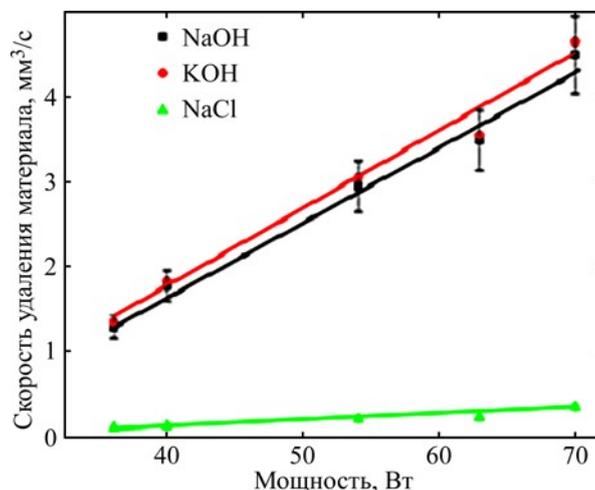
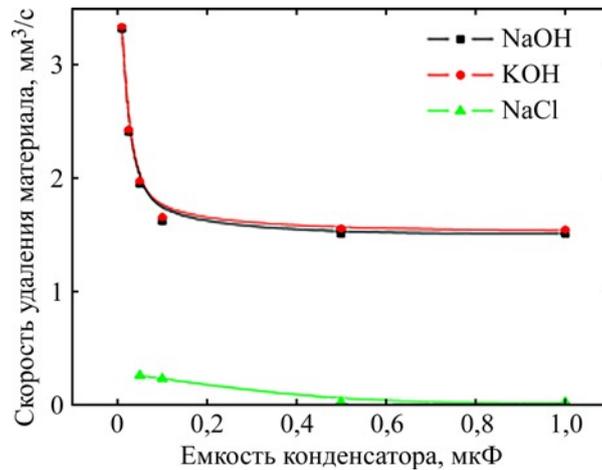


Рис. 3. Зависимость скорости удаления стеклянной пластины от подводимой мощности в водных растворах электролитов NaCl, NaOH и KOH.

вращающимся катодом и выводы вышеперечисленных авторов не позволяют заключить, что они являются следствием термической обработки. Однако такая оценка не позволяет делать окончательные выводы. Более универсальной оценкой для всех методов обработки является определение скорости удаления материала [36, 37].

Результаты показали, что MRR при электроэрозии в электролитах зависит от двух важных факторов: электрической мощности и типа электролита. В частности, на рис. 3 показана зависимость MRR от вкладываемой электрической мощности: при 36 Вт в 6%-х водных электролитах NaOH, KOH и NaCl скорости удаления материала составляют 1,3; 1,35 и 0,11 мм<sup>3</sup>/с, а при 70 Вт – 4,5; 4,65 и 0,36 мм<sup>3</sup>/с соответственно. Очевидно, численные значения MRR увеличиваются более чем в 3 раза и имеют линейную зависимость от подводимой электрической мощности в исследованном диапазоне 35–75 Вт. Полученная линейная зависимость MRR от подводимой электрической мощности идентична теоретической зависимости для полиэлектролитов [38]. Однако эта линейность зависит не только от входной мощности, но может быть связана с физико-химическими свойствами электролита. Например, Мохаммад и др. [39] сообщают, что часть энергии разряда поглощается заготовкой из-за проводимости, а остальная часть рассеивается в электролите из-за

конвекции и излучения. Вэй и др. [40, 41] подсчитали, что доля мощности, передаваемой на деталь в режиме разряда, составляет всего 29%. В этой ситуации Билал и др. [42] считают, что термическое растрескивание и скалывание являются главной движущей силой в ЭЭО диэлектрика. Также Ражпут и др. [43] предпочитают механизм удаления материала в качестве тепловой модели. Хотя тепловая модель хорошо согласуется с существующими имитационными моделями, разница между вычисленными значениями [43] и экспериментально наблюдаемыми [21, 44] значительна. В частности, в зависимости от материала температура в имитационных моделях превышает 3300 К, а при практических измерениях с помощью термопары вольфрам–железо и спектрального анализа температура катода составляет 2300±200 К [21, 44]. Более того, результаты Словецкого и Терентьева (где температура катода не превышает 1500 К) в общем согласуются с вышеуказанными выводами [45]. Кроме этого, температура электролита на расстоянии 2 мм от газоразрядного (или пузырькового) слоя даже при высоких температурах катода не превышает температуры кипения воды (100 °С) [45–49]. В нашем случае температура плавления керамических образцов была выше, чем 3000 К [50, 51], поэтому полагаем, что удаление материала происходит не вследствие термической обработки. Это означает, что линейный рост



**Рис. 4.** Зависимость скорости удаления стеклaнной пластины от емкости конденсатора в водных растворах электролитов NaCl, NaOH и KOH.

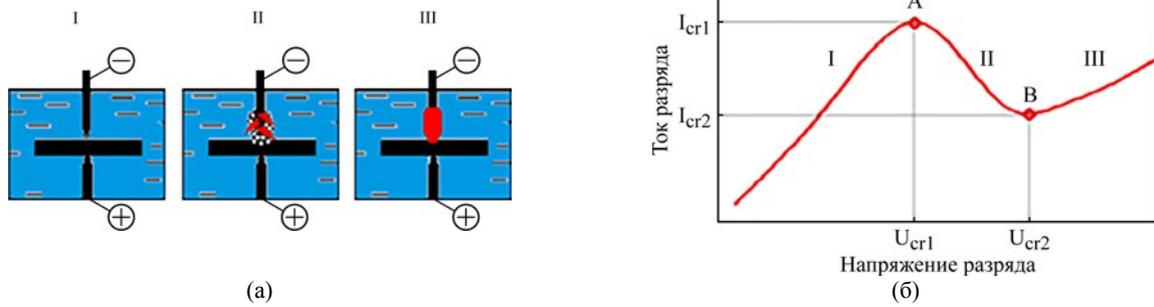
MRR при увеличении вкладываемой электрической мощности не связан с термическими эффектами, а зависит от других факторов, например, от физико-химических свойств (то есть типа или концентрации) электролита. В частности, зависимости MRR от емкости и типа электролита показаны на рис. 3. Результаты доказывают, что образцы в щелочных растворах обрабатываются примерно с одинаковой скоростью, и на порядок большей, чем при обработке в поваренной соли. А именно: изменение анионной группы с  $\text{Cl}^-$  на  $\text{OH}^-$  приводит к повышению MRR на порядок и увеличению интенсивности появления пузырьков водорода у катода [52]. Пауль и др. [53] также добились значительного увеличения MRR, используя гидроокиси калия и натрия при обработке полупроводников. Кроме того, несмотря на то что зависимость MRR от типа электролита очень сильная, MRR не зависит от концентрации электролита в исследованном диапазоне (5–27%). Очевидно, что процесс обработки связан не только с физико-химическими свойствами электролита, но и с внешним фактором, например, частотными характеристиками релаксационного генератора [54].

На рис. 4 представлен график зависимости MRR от емкости конденсатора, определяющей частотные характеристики разряда в RC-генераторе. В частности, для водных растворов NaOH, KOH и NaCl при 1 мкФ значения скорости съема составляют 1,51; 1,54 и 0,022 мм<sup>3</sup>/с, а при 0,01–0,05 мкФ – 3,32; 3,33 и 0,36 мм<sup>3</sup>/с соответственно. Результаты показывают, что при меньших емкостях конденсатора MRR выше, чем при относительно больших емкостях. Али и др. [55] обнаружили, что емкость конденсатора является наиболее важным параметром для создания проводящего слоя в непроводящей керамике. Известно, что емкость

конденсатора линейно связана с длительностью импульса ( $\tau$ ) в RC-генераторах (то есть,  $\tau = RC$ ). Дутта и др. [27] методом Тагучи определили, что влияние длительности импульса на MRR является значительным, то есть доля среди других влияющих факторов превышает 5%. Хан и др. [56] улучшили качество поверхности за счет разветвления разряда, что привело к повышению частоты импульсов. Янг и др. [57] также показали, что увеличение частоты импульса разряда расширяет обрабатываемую зону поверхности и производит меньше тепловой энергии. Очевидно, что уменьшение емкости конденсатора или длительности импульса приводит к улучшению и ускорению обработки диэлектрика.

Исходя из анализа вышеописанных результатов и существующих литературных данных механизм удаления диэлектриков в его начальной стадии можно разделить на три этапа (см. рис. 5а). На начальном этапе (см. рис. 5а, I), происходит обычный процесс электролиза, что связано с возможностью образования в электролитах точечных дефектов с разным типом проводимости [58]. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) в этой области имеет линейную зависимость (см. рис. 5б, I).

Этот процесс продолжается до тех пор, пока не возникает пороговый (критический) или ионный (анионный) ток (см. рис. 5б II, A), при котором появляются первоначальные пузырьки и последующие разряды. Это величина сильно зависит от физико-химических свойств, то есть от типа электролита [21]. В частности, критический ток и напряжения при концентрации 6% для электролитов NaCl, NaOH и KOH составляют 50 В и 1,8 А, 25 В и 2 А, 25 В и 1,9 А соответственно. В случае NaCl повышенное критическое напряжение связано с сопротивлением электролита между электродами, которое



**Рис. 5.** Схематическое изображение начальной стадии процесса ЭЭО диэлектриков, состоящей из трех этапов (а); вольт-амперная характеристика электролитов для трех этапов начальной стадии процесса ЭЭО (б).

вдвое больше, чем в случае NaOH и KOH. Результаты также показали, что для других концентраций электролитов общий характер ВАХ идентичен на всех этапах.

Начало второго этапа характеризуется образованием пузырьков на поверхности катода (см. рис. 5а, II). Причина появления пузырьков и усиления газообразования связана с повышением локальной температуры электролита вблизи катода (например, средняя температура газа в экспериментах составляет 900 К [45]) из-за дальнейшего увеличения входного напряжения. Увеличение концентрации пузырьков вблизи катода приводит к постепенному изолированию поверхности катода. Скопления пузырьков и сопутствующие первоначальные разряды не могут существовать по отдельности. Образование большого количества мелких пузырьков на катоде усиливает эти разряды [59]. Из-за появления в электролите изолирующего пузырькового слоя полный электрический ток состоит из тока проводимости и тока смещения [60]. Токи смещения возникают в изолирующем пузырьковом слое в нестационарном режиме при приложении к этой среде переменного электрического поля [61]. На границе электролита и пузырькового слоя (изолирующего часть катода) ток ионов (анионов) и токи смещения компенсируются между собой. Следовательно, ионный ток протекает только через оставшуюся неизолированную часть катода. Хотя токи смещения чувствительно увеличиваются, но суммарный (полный) ток уменьшается из-за сильного падения ионного тока. В частности, суммарный ток и напряжения в точке В (см. рис. 5б II) для электролитов NaCl, NaOH и KOH при концентрации 6% составляют 110 В и 1,3 А, 65 В и 0,6 А, 65 В и, 0,6 А соответственно. Уменьшение критического тока на катоде связано с увеличением сопротивления электролита и изолирующего пузырькового слоя между электродами. В конце второго этапа вблизи катода появляются устойчивые парогозовые слои (средняя толщина 0,5 мм) из-за максимального скопления

пузырьков. Следовательно, через эти слои начинают проскакивать высокочастотные разряды.

Финальный этап характеризуется явлениями кавитации [23], а также плазменного светящего факела (с характерным временем жизни 5 мс [62]), существующим из-за участвовавших высокочастотных разрядов вблизи катода (см. рис. 5а, III). В начале третьего этапа пузырьки парогозового слоя начинают схлопываться из-за уравнивания внутреннего и внешнего давления за счет повышения локальной температуры, которая является производной приложенного напряжения. Следовательно, схлопывание пузырьков, называемое кавитацией [63], приводит к возникновению большого кавитационного удара, который составляет примерно  $10^{10}$  МПа [23]. Поэтому Куо и др. [64] использовали кавитацию для улучшения MRR за счет специально созданных пузырьков. Именно за счет кавитации уменьшается площадь поверхности изолирующего парогозового слоя, что приводит к последующему умеренному увеличению тока разряда на ВАХ (см. рис. 5б, III). В то же время кулоновские силы светящего плазменного факела из ионизированного газа влияют на шероховатость поверхности диэлектрика, состоящего из диполей. Еще одной стороной, участвующей в процессах, являются анионные группы электролитов (Cl<sup>-</sup>, OH<sup>-</sup>). Эти группы служат для изменения атомных связей из-за их присоединения к поверхностным атомам образца [52]. Одновременно анионная группа и плазменное воздействие, взаимно дополняя друг друга, приводят к ослаблению атомных связей на поверхности образцов из диэлектрика, а следовательно, квантационный удар разрывает связь. Разрыв атомных связей из-за синергетического эффекта трех вышеуказанных факторов можно считать началом процесса ЭЭО.

## ВЫВОДЫ

В данной статье мы предложили новую модель механизма удаления диэлектрических

материалов с учетом анализа ранее существовавших традиционных моделей. Удаление материалов экспериментально исследовано на усовершенствованной электроэрозионной установке, что позволило существенно увеличить скорость удаления материала (MRR).

В частности, мы определили, что начальная стадия удаления диэлектрических материалов состоит из трех последовательных этапов: вначале происходит процесс обычного электролиза (I), затем у катода образуется пузырьковый слой (II) и учащаются высокочастотные разряды с последующим возникновением плазменного факела вблизи катода и кавитации (III). Установлено, что механизм начальной стадии удаления материалов связан с синергетическим эффектом взаимодействия анионной группы электролитов, горящего плазменного факела и кавитационного удара. В целом результаты показывают, что предложенная синергетическая модель охватывает все основные процессы механизма начальной стадии удаления материала, причем в существенно большей степени, чем традиционные тепловые модели.

В основном проведенные измерения и их анализ позволяют глубже понять процесс ЭЭО диэлектриков с целью увеличения MRR, что предполагает расширение возможности применения композитных и керамических материалов в перспективных отраслях.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Soutis, C., Aerospace engineering requirements in building with composites, *Polymer Composites in the Aerospace Industry*, Irving Ph., Soutis C., Eds., Woodhead Publishing, 2020, p. 3.
- Robinson, M., Matsika, E. and Peng, Q., Application of composites in rail vehicles, *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2016, Elsevier, p. 1.
- Mavhungu, S.T., Akinlabi, E.T., Onitiri, M.A. and Varachia, F.M., Aluminum matrix composites for industrial use: advances and trends, *Procedia Manuf.*, 2017, vol. 7, p. 178.
- Binner, J., Porter, M., Baker, B., Zou, J., et al., Selection, processing, properties and applications of ultra-high temperature ceramic matrix composites, UHTCMCs—a review, *Int. Mater. Rev.*, 2020, vol. 65, no. 7, p. 389.
- Ganga Rao, H., Infrastructure applications of fiber-reinforced polymer composites, *Applied Plastics Engineering Handbook*. William Andrew Publishing, 2017, p. 675.
- Mann, G.S., Singh, L.P., Kumar, P. and Singh, S., Green composites: A review of processing technologies and recent applications, *J. Thermoplast. Comp. Mater.*, 2020, vol. 33, no. 8, p. 1145.
- Boccardi, E., Ciraldo, F.E. and Boccaccini, A.R., Bioactive glass-ceramic scaffolds: Processing and properties, *MRS Bull.*, 2017, vol. 42, no. 3, p. 226.
- Ralbag, N., Mann-Lahav, M., Davydova, E.S., Ash, U., et al., Composite materials with combined electronic and ionic properties, *Matter*, 2019, vol. 1, no. 4, p. 959.
- Li, Zh., Zhang, X., Cheng, H., Liu, J., et al., Confined synthesis of 2D nanostructured materials toward electrocatalysis, *Adv. Energy Mater.*, 2020, vol. 10, no. 11, art. ID 1900486.
- Li, N., Huang, S., Zhang, G., Qin, R., et al., Progress in additive manufacturing on new materials: A review, *J. Mater. Sci. Technol.*, 2019, vol. 35, no. 2, p. 242.
- Costa, C., Ferreira, L.P., Sá, J.C., Silva, F.J., et al., Implementation of 5S methodology in a metalworking company, *DAAAM International Scientific Book*, Branko Katalinic, Ed., Vienna: DAAAM International Editor, 2018, p. 001.
- Heidary, H., Karimi, N.Z. and Minak, G., Investigation on delamination and flexural properties in drilling of carbon nanotube/polymer composites, *Comp. Struct.*, 2018, vol. 201, p. 112.
- Xu, J., Li, Ch., Mi, S., An, Q., et al., Study of drilling-induced defects for CFRP composites using new criteria, *Comp. Struct.*, 2018, vol. 201, p. 1076.
- Bilal, A., Jahan, M.P., Talamona, D. and Perveen, A., Electro-discharge machining of ceramics: A review, *Micromachines*, 2018, vol. 10, no. 1, p. 10.
- Rayat, M.S., Gill, S.S., Singh, R. and Sharma, L., Fabrication and machining of ceramic composites: A review on current scenario, *Mater. Manufact. Proc.*, 2017, vol. 32, no. 13, p. 1451.
- Mohri, N., Fukuzawa, Y., Tani, T., Saito, N., et al., Assisting electrode method for machining insulating ceramics, *CIRP annals*, 1996, vol. 45, no. 1, p. 201.
- Абитов, А.Р., *Электрофизикохимическая обработка фасонных поверхностей в кремниевых заготовках*, Автореферат дис. ... канд. ф.-м. наук, Тула, 2011.
- Леон, А.В., Звядинцева, С.Ю., Чирков, Е.А., Шкодин, А.С., и др., Классификация основных направлений исследований гибридных процессов, *Механика XXI века*, 2019, № 18, с. 196.
- Al-Ahmari, A.M.A., Rasheed, M.S., Mohammed, M.K., Saleh, T., A hybrid machining process combining micro-EDM and laser beam machining of nickel–titanium-based shape memory alloy, *Mater. Manufact. Proc.*, 2016, vol. 31, no. 4, p. 447.
- Li, L., Diver, C., Atkinson, J., Giedl-Wagner, R., et al., Sequential laser and EDM micro-drilling for next generation fuel injection nozzle manufacture, *CIRP annals*, 2006, vol. 55, no. 1, p. 179.

21. Abdulkarimov, E.T., Mirkarimov, A.S. and Zaripov A.A., Electroerosion treatment of dielectric materials, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2007, vol. 43, no. 2, p. 77.
22. Melk, L., Antti, M.L. and Anglada, M., Material removal mechanisms by EDM of zirconia reinforced MWCNT nanocomposites, *Ceram. Int.*, 2016, vol. 42, no. 5, p. 5792.
23. Зарипов, А.А., Ашуров, Х.Б., Феноменологический механизм воздействия кавитации на ЭЭО стекла, *ЭОМ*, 2014, т. 50, № 2, с. 105.
24. Yue, X., Yang, X., Tian, J., He, Z., et al., Thermal, mechanical and chemical material removal mechanism of carbon fiber reinforced polymers in electrical discharge machining, *Int. J. Machine Tools Manufact.*, 2018, vol. 133, p. 4.
25. Yue, X., Li, Q. and Yang, X., Influence of thermal stress on material removal of Cf/SiC composite in EDM, *Ceram. Int.*, 2020, vol. 46, no. 6, p. 7998.
26. Rajput, V., Goud, M. and Suri, N.M., Study on effective process parameters: toward the better comprehension of EDCM process, *Int. J. Modern Manufact. Technol.*, 2019, vol. XI, no. 2, p. 105.
27. Dutta, H., Debnath, K. and Sarma, D.K., A study of material removal and surface characteristics in microelectrical discharge machining of carbon fiber reinforced plastics, *Polymer Compos.*, 2019, vol. 40, no. 10, p. 4033.
28. Klocke, F., Mohammadnejad, M., Zeis, M. and Klink, A., Investigation on the variability of existing models for simulation of local temperature field during a single discharge for electrical discharge machining (EDM), *Procedia CIRP*, 2018, vol. 68, p. 260.
29. Зарипов, А.А., Ашуров, Х.Б., Вклады различных факторов в процесс электроимпульсной обработки, *Узбекский физический журнал*, 2016, т. 18, № 3, с. 214.
30. Зарипов, А.А., *Процессы при электроэрозионной обработке диэлектриков*, Автореф. докт. дис., Инст. ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, 2019.
31. Pahlevani, F. and Sahajwalla, V., Effect of glass aggregates and coupling agent on the mechanical behaviour of polymeric glass composite, *J. Cleaner Product.*, 2019, vol. 227, p. 119.
32. Thomason, J.L., Glass fibre sizing: A review, *Composites Part A: Appl. Sci. Manufact.*, 2019, vol. 127, art. ID 105619.
33. Furutani, K. and Maeda, H., Machining a glass rod with a lathe-type electro-chemical discharge machine, *J. Micromechan. Microeng.*, 2008, vol. 18, no. 6, art. ID 065006.
34. Paul, L. and Hiremath, S.S., Improvement in machining rate with mixed electrolyte in ECDM process, *Procedia Technol.*, 2016, vol. 25, p. 1250.
35. Yan, B.H., Wang, A.C., Huang, C.Y. and Huang, F.Y., Study of precision micro-holes in borosilicate glass using micro EDM combined with micro ultrasonic vibration machining, *Int. J. Machine Tools Manufact.*, 2002, vol. 42, no. 10, p. 1105.
36. Bobbili, R., Madhu, V. and Gogia, A.K., Effect of wire-EDM machining parameters on surface roughness and material removal rate of high strength armor steel, *Mater. Manufact. Proc.*, 2013, vol. 28, no. 4, p. 364.
37. Mohammadi, A., Tehrani, A.F., Emanian, E. and Karimi, D., Statistical analysis of wire electrical discharge turning on material removal rate, *J. Mater. Proces. Technol.*, 2008, vol. 205, nos. 1–3, p. 283.
38. Ашуров, Х.Б., Зарипов, А.А., Экспериментальное изучение и модельное описание импульсного коронного разряда вблизи твердого тела, помещенного в сильный электролит, Доклады Академии Наук Узбекистана, 2013, № 1, с. 26.
39. Mohammad, Y.A., Maleque, M.A., Banu, A., Sabur, A., et al., Micro electro discharge machining of non-conductive ceramic, *Mater. Sci. Forum*, 2018, vol. 911, p. 20.
40. Wei, C., Xu, K., Ni, J., Brzezinski, A.J., et al., A finite element based model for ECDM in discharge regime, *Int. J. Adv. Manufact. Technol.*, 2011, vol. 54, p. 987.
41. Wei, C., Hu, D., Xu, K. and Ni, J., Electro chemical discharge dressing of metal bond micro grinding tools, *Int. J. Machine Tools Manufact.*, 2011, vol. 51, p. 165.
42. Bilal, A., Perveen, A., Talamona, D. and Jahan, M.P., Understanding material removal mechanism and effects of machining parameters during EDM of zirconia-toughened alumina ceramic, *Micromachines*, 2021, vol. 12, no. 1, p. 67.
43. Rajput, V., Goud, M. and Suri, N.M., Finite element modeling based material removal analysis of non-conductive materials in ECDM using adaptive tool feed system, *Int. J. Modern Manufact. Technol.*, 2020, vol. XII, no. 1, p. 164.
44. Kirko, D.L., Oscillatory processes in the plasma of the discharge in electrolyte in a magnetic field, *Techn. Phys.*, 2015, vol. 60, no. 4, p. 505.
45. Словецкий, Д.И., Терентьев, С.Д., Электрический разряд в электролитах – источник неравновесной плазмы при атмосферном давлении, *Химия высоких энергий*, 2003, т. 37, № 5, с. 355.
46. Fascio, V., Wiithrich, R., Viquerat, D. and Langen H., 3D micro structuring of glass using ECDM. *Proc. Int. Symposium on Micromechatronics and Human Science*, 1999, p. 179.
47. Fascio, V., Langen, H.H., Bleuler, H. and Comminellis, C., Investigations of the SACE, *Electrochem. Commun.*, 2003, vol. 5, p. 203.
48. Basak, I. and Ghosh, A., Mechanism of spark generation during electrochemical discharge machining: a theoretical model and experimental verification, *J. Mater. Proces. Technol.*, 1996, vol. 62, nos. 1–3, p. 46.
49. Fascio, V., Wuthrich, R. and Bleuler, H., SACE in the light of electrochemistry, *Electrochim. Acta*, 2004, vol. 49, p. 3997.

50. Gu, M., Huang, C., Xiao, S. and Liu, H., Improvements in mechanical properties of TiB<sub>2</sub> ceramics tool materials by the dispersion of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles, *Mater. Sci. Eng.: A*, 2008, vol. 486, nos. 1–2, p. 167.
51. Schneider, S.J. and McDaniel, C.L., Effect of environment upon the melting point of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, *J. Res. Nat. Bureau Standards. Sect. A, Phys. Chem.*, 1967, vol. 71, no. 4, p. 317.
52. Jalali, M., Maillard, P. and Wüthrich, R., Toward a better understanding of glass gravity-feed micro-hole drilling with electrochemical discharges, *J. Micromech. Microeng.*, 2009, vol. 19, no. 4, art. ID 045001.
53. Paul, L. and Hiremath, S.S., Improvement in machining rate with mixed electrolyte in ECDM process, *Procedia Technol.*, 2016., vol. 25, p. 1250.
54. Zaripov, A.A. and Ashurov, Kh.B., Electrical discharge machining of nonconductive materials, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2011, vol. 47, no. 3, p. 197.
55. Mohamed A.R., Asfana B. and Mohammad Y.A., Investigation of recast layer of non-conductive ceramic due to micro-EDM, *Advanced Materials Research – Trans Tech Publications Ltd*, 2014, vol. 845, p. 857.
56. Han, M.S., Min, B.K. and Lee, S.J., Improvement of surface integrity of electro-chemical discharge machining process using powder-mixed electrolyte, *J. Mater. Proces. Technol.*, 2007, vol. 191, nos. 1–3, p. 224.
57. Yang, C.T., Song, S.L., Yan, B.H. and Huang, F.Y., Improving machining performance of wire electrochemical discharge machining by adding SiC abrasive to electrolyte, *Int. J. Machine Tools Manufact.*, 2006, vol. 46, no. 15, p. 2044.
58. Macdonald, D.D., The history of the point defect model for the passive state: a brief review of film growth aspects, *Electrochim. Acta*, 2011, vol. 56, no. 4, p. 1761.
59. Descoedres, A., *Characterization of electrical discharge machining plasmas*, THÈSE NO 3542, Lausanne, EPFL, 2006.
60. Siegel, D.M., *Innovation in Maxwell's electromagnetic theory: Molecular vortices, displacement current, and light*. Cambridge University Press, 2003.
61. Ивченко, Г., Токи смещения в металлах, диэлектриках и в вакууме. <http://new-idea.kulichki.net/pubfiles/190712004817.pdf>
62. Абдукаримов, Э.Т., Миркаримов, А.М., Зарипов, А.А., Исследование электрического разряда в водном растворе электролита, *Узбекский физический журнал*, 2003, т. 5, № 1, с. 52.
63. Brennen, C.E., *Cavitation and bubble dynamics*, Cambridge University Press, 2014.
64. Kuo, K.Y., Wu, K.L., Yang, C.K. and Yan, B.H., Wire electrochemical discharge machining (WECDM) of quartz glass with titrated electrolyte flow, *Int. J. Machine Tools Manufact.*, 2013, vol. 72, p. 50.

### Summary

Ceramics and composites, many of whose physico-chemical properties significantly exceed similar properties of metals and their alloys, are processed qualitatively mainly by the electroerosion method. Despite the existing works, the mechanism of the initial stage of the removal of materials has not yet been identified. For a comprehensive understanding of the mechanism of the removal of dielectrics, a new model is proposed based on the experimental results obtained on an improved electroerosion installation. It was revealed that the initial stage of the removal of a dielectric material consists of three successive stages which are associated with the synergistic effect on the process of the anionic group of electrolytes, plasma flare, and the cavitation shock. This makes it possible to better understand the mechanism of the removal of composite and ceramic materials, which should contribute to ensuring the machinability of those materials and their wide use in promising technologies.

*Keywords:* electroerosion treatment, material removal mechanism, material removal rate, synergetic effect, cavitation, bubbles, collapse, electrolytes, anionic group, plasma flame, pulse discharge

# Повышение качества оксидных покрытий, формируемых методами электролитического оксидирования на внутренних поверхностях длинномерных изделий

О. Е. Чуфистов<sup>a,\*</sup>, В. Н. Малышев<sup>b</sup>,  
А. Н. Золкин<sup>a</sup>, Е. А. Чуфистов<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, 440039, Россия

<sup>b</sup>Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, 119991, Россия

<sup>c</sup>Пензенский государственный университет, г. Пенза, 440026, Россия

\*e-mail: [chufistov@yahoo.com](mailto:chufistov@yahoo.com)

Поступила в редакцию 14.03.2023

После доработки 13.06.2023

Принята к публикации 20.06.2023

Отмечено, что методы электролитического оксидирования, включая традиционное анодирование и микродуговое оксидирование, реализуемые по классическим схемам в электролитических ваннах с механическими, пневматическими и магнитными миксерами, не обеспечивают получение качественных равномерных оксидных покрытий на внутренних поверхностях изделий из сплавов металлов вентильной группы. Обоснована принципиальная возможность получения качественных равномерных покрытий на протяженных внутренних поверхностях изделий, в том числе на поверхностях глубоких отверстий, при пропускании через них раствора электролита. Экспериментально доказано, что на основе предложенного подхода можно обрабатывать изделия с глубокими отверстиями, добиваясь соотношения минимальных и максимальных значений толщины и напряжения пробоя покрытий на внутренних и внешних поверхностях в интервале 0,85–0,93. Предложен способ формирования покрытий исключительно на внутренних поверхностях изделий без изменения состояния их внешних поверхностей и без использования электролитических ванн. Установлена корреляция между значениями толщины и напряжения пробоя покрытий. Показана возможность косвенного определения толщины покрытий по результатам измерения напряжения их пробоя.

*Ключевые слова:* вентильные металлы, алюминий, традиционное анодирование, микродуговое оксидирование, внутренняя поверхность, глубокое отверстие, покрытие, толщина, напряжение пробоя

УДК 620.197+621.794

<https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.4.09>

## ВВЕДЕНИЕ

При окислении металлов вентильной группы, к числу которых относятся Al, Mg, Nb, Ti и Zr, на их поверхностях образуются тонкие оксидные пленки с асимметричной (вентильной) проводимостью [1, 2]. Методы электролитического оксидирования в растворах электролитов, включая традиционное анодирование (ТА) и микродуговое оксидирование (МДО), также известное как плазменно-электролитическое оксидирование, позволяют увеличивать толщину этих оксидных пленок на порядки [3–5], преобразуя их в функциональные оксидные покрытия (ТА-покрытия и МДО-покрытия), обладающие уникальным набором свойств. При этом МДО-покрытия могут быть получены не только на вентильных металлах и их сплавах, но и на некоторых сплавах черных металлов и даже неметаллов. Это открывает

дополнительные возможности для более широкого применения указанных материалов в машиностроении и смежных отраслях, а также для повышения эксплуатационных свойств изделий широкого спектра применения [6–8].

В производственной практике методы ТА и МДО обычно реализуются по общепринятой схеме, показанной на рис. 1, с использованием специальных электролитических ванн, обычно изготавливаемых из коррозионностойких сталей или других металлических сплавов, химически инертных по отношению к растворам электролитов. Это позволяет электролитическим ваннам быть противоэлектродами по отношению к оксидируемым изделиям. В некоторых случаях, в том числе и при использовании электролитических ванн, изготовленных из непроводящих материалов, в качестве противоэлектродов могут использоваться

специальные пластины, решетки, спирали, стержни и т.д. из коррозионноустойчивых сталей или других металлических сплавов, химически инертных к растворам электролитов [9–13].

Электролитические ванны должны иметь размеры, достаточные для свободного размещения в них обрабатываемых изделий и необходимого объема растворов электролитов. В то же время в ваннах должны быть предусмотрены двойные стенки или змеевики, через которые можно прокачивать холодную воду из системы водоснабжения для охлаждения растворов электролитов, которые нагреваются проходящим через них электрическим током в процессе ТА или МДО. При отсутствии таких конструктивных элементов в ваннах растворы электролитов приходится охлаждать с помощью специальных охлаждающих устройств [14, 15].

В процессе оксидирования изделий растворы электролитов в ваннах должны хорошо перемешиваться. Это необходимо для их постоянного обновления вблизи оксидируемых поверхностей, а также для выравнивания температуры и химического состава растворов электролитов по всему объему ванн [16]. Для перемешивания растворов электролитов в ваннах обычно применяются механические, пневматические или магнитные миксеры (мешалки). Однако с помощью этих устройств весьма проблематично обеспечить достаточное перемешивание растворов электролитов вблизи нетехнологичных поверхностей, к числу которых относятся поверхности отверстий, канавок, пазов и т.п., вследствие чего растворы электролитов в этих местах плохо обновляются, обедняются и нагреваются, что ухудшает окисление вентильных металлов и повышает интенсивность растворения образующегося оксида. Поэтому при проведении оксидирования по классической схеме (рис. 1) на таких поверхностях образуются неравномерные ТА- и МДО-покрытия с меньшей толщиной и пониженными эксплуатационными свойствами [9].

Следует отметить, что для пазов, канавок, резьб и неглубоких отверстий разработаны схемы реализации методов ТА и МДО, обеспечивающие получение качественных ТА- и МДО-покрытий, близких по толщине, эксплуатационным свойствам и их равномерности к ТА- и МДО-покрытиям на внешних, хорошо доступных для растворов электролитов поверхностях. Эти схемы основаны на использовании жиклеров и распылителей, располагаемых около нетехнологичных участков поверхностей и одновременно являющихся противозэлектродами по отношению к обрабатываемым изделиям. Но для обработки глубоких сквозных отверстий и других

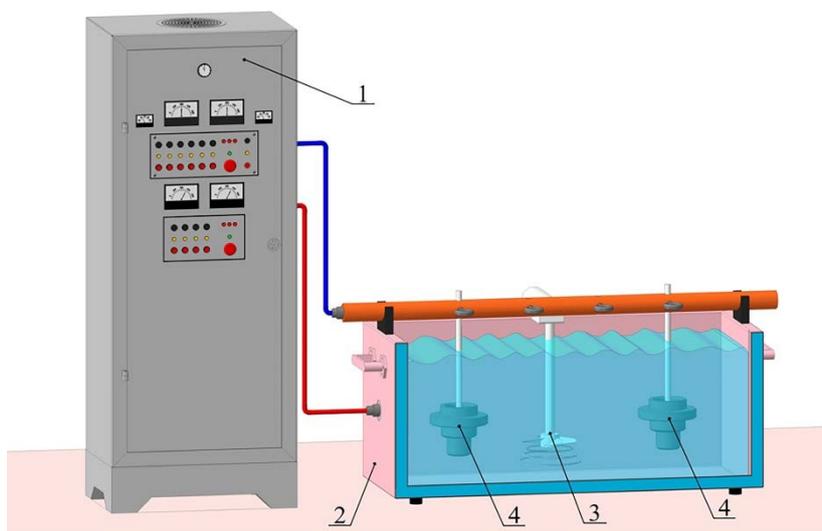
протяженных внутренних поверхностей эти технические решения не подходят. В данной связи весьма полезно вспомнить ранее разработанные схемы реализации методов ТА и МДО во внутренних полостях специальных противозэлектродов с течением через них растворов электролитов [9]. Эти схемы обеспечивают достаточно высокую равномерность ТА- и МДО-покрытий на компактных деталях с отверстиями и другими нетехнологичными участками. Аналогичный подход представляется целесообразным и для улучшения качества и равномерности покрытий, формируемых методами ТА и МДО на внутренних поверхностях длинномерных изделий.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

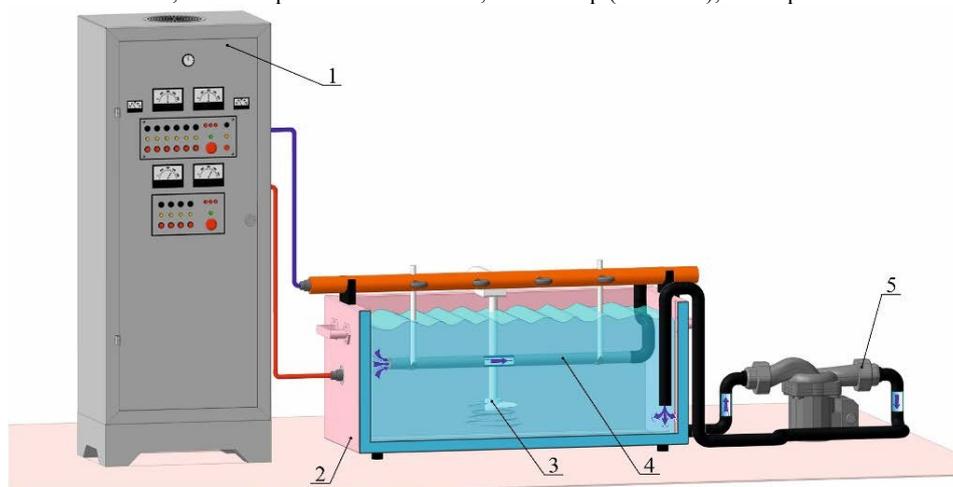
С целью оценки эффективности применения предложенного подхода в производственной практике проведены исследования. В качестве обрабатываемых изделий использовали трубы длиной 1000 мм с толщиной стенок 1 мм, изготовленные из сплава АМгЗ (ЕНАW5754) с диаметром отверстий 23 мм и из сплава Д16 (2024) с диаметром отверстий 10 мм. После механической и химической очистки их обрабатывали методами ТА и МДО с использованием технологического комплекса, включающего источник питания, электролитическую ванну из коррозионноустойчивой стали 12Х18Н10Т (АISI 304) с водяным охлаждением, а также насос с регулируемым расходом рабочей жидкости, гибкие соединительные шланги и механический миксер из материалов, химически стойких к воздействию раствора электролита.

Обработку труб методами ТА и МДО осуществляли согласно классической схеме, показанной на рис. 1, и предлагаемой схеме, изображенной на рис. 2.

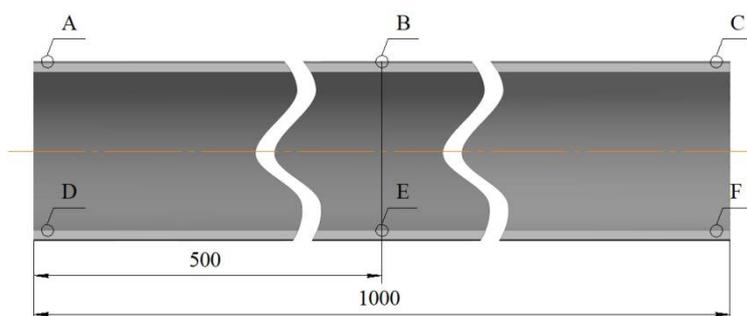
При этом обработку труб из АМгЗ с диаметром отверстий 23 мм проводили методом ТА в течение 20 минут в анодном режиме при плотности тока на обрабатываемых поверхностях  $2,5 \text{ А/дм}^2$  в растворе щавелевой кислоты при его средней температуре  $15^\circ\text{С}$ . Обработку труб из Д16 с диаметром отверстий 10 мм выполняли методом МДО в течение 20 минут в анодно-катодном режиме при плотности тока на обрабатываемых поверхностях в анодном полупериоде  $18 \text{ А/дм}^2$  в растворе едкого кали (5 г/л) и жидкого стекла (6 г/л) при его средней температуре  $20^\circ\text{С}$ . При обработке с использованием предложенной схемы расход раствора электролита, проходящего через отверстия трубных заготовок, для методов ТА и МДО поддерживали соответственно в интервалах 1–2



**Рис. 1.** Классическая схема реализации ТА и МДО с механическим миксером:  
1 – источник питания; 2 – электролитическая ванна; 3 – миксер (мешалка); 4 – обрабатываемое изделие.



**Рис. 2.** Предлагаемая схема реализации ТА и МДО с направленным течением раствора:  
1 – источник питания; 2 – электролитическая ванна; 3 – миксер (мешалка); 4 – обрабатываемое изделие; 5 – насос.

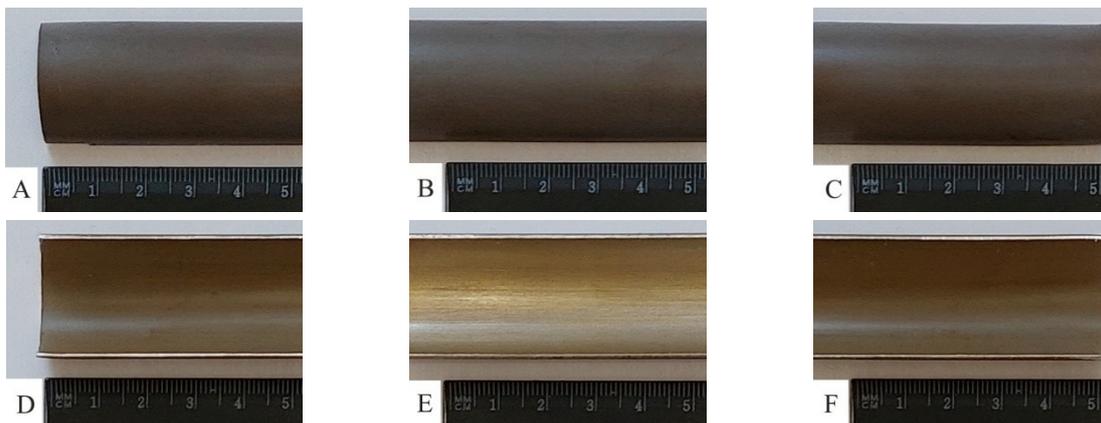


**Рис. 3.** Схема расположения зон измерений толщины и напряжения пробоя ТА- и МДО-покрытий.

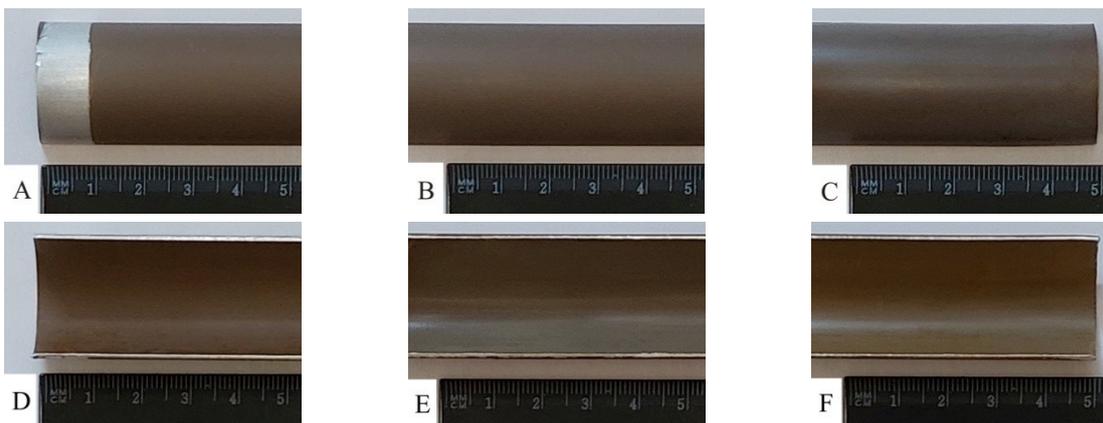
и 10–12 л/мин на 1 дм<sup>2</sup> оксидируемых поверхностей отверстий.

Визуальный контроль сформированных ТА- и МДО-покрытий на внутренних и наружных поверхностях труб проводился после их продольного разрезания на парные фрагменты. Точные измерения толщины и напряжения пробоя ТА- и МДО-покрытий выполнялись на наружных и внутренних поверхностях труб у краев и в средних зонах, как показано на рис. 3.

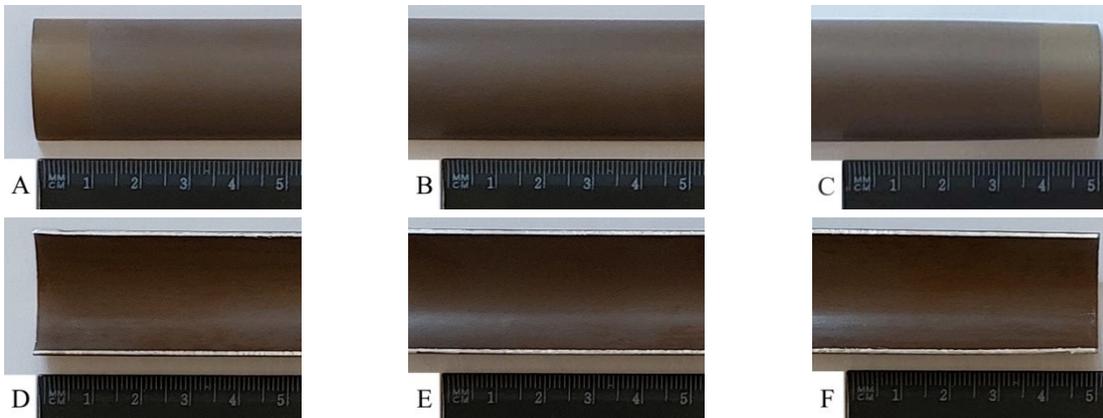
При этом толщину ТА- и МДО-покрытий на внутренних и внешних поверхностях трубных заготовок определяли металлографическим методом с помощью микроскопа МИМ-8 на поперечных микрошлифах фрагментов труб. Напряжение пробоя ТА- и МДО-покрытий измеряли с помощью пробойной установки УПУ-1М на постоянном токе исключительно для косвенного подтверждения результатов измерения их толщины, поскольку между



**Рис. 4.** Фотографии участков наружной и внутренней поверхностей трубы, обработанных методом ТА по классической схеме (рис. 1).



**Рис. 5.** Фотографии фрагментов наружной и внутренней поверхностей трубы, обработанных ТА по предложенной схеме (рис. 3) при постоянном направлении потока электролита.



**Рис. 6.** Фотографии фрагментов наружной и внутренней поверхностей трубы, обработанных методом ТА по предложенной схеме (рис. 3) с переменным направлением потока раствора электролита.

толщиной и напряжением пробоя ТА- и МДО-покрытий, как правило, наблюдается устойчивая связь [17].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 показаны фотографии участков в шести зонах (три на внешней стороне и три на внутренней стороне) трубы (согласно рис. 3) после обработки методом ТА по классической схеме (согласно рис. 1). Визуально легко заметить, что ТА-покрытие на внешней поверхности трубы выглядит более толстым и равномерным, о чем можно судить по более

насыщенному и однородному бронзовому цвету. На внутренней поверхности у ТА-покрытия наблюдается меньшая толщина и большая неравномерность – толщина в средней зоне отверстия значительно меньше, чем у краев. При обработке методом МДО наблюдаются аналогичные закономерности.

На рис. 5 показаны подобные фотографии фрагментов поверхностей труб после обработки методом ТА по предложенной схеме (согласно рис. 2) с постоянным направлением течения раствора электролита через отверстие из зоны D в зону F. Можно заметить, что ТА-покрытие

Таблица. Результаты измерений толщины и напряжения пробоя ТА- и МДО-покрытий

Схема	Метод	Сплав	Толщина, мкм					
			Напряжение пробоя, В					
			Зона А	зона В	зона С	зона D	зона E	зона F
Классическая (рис. 1)	МДО	Д16	78,26	78,39	78,37	52,75	15,30	52,58
			1012,93	1018,49	998,85	649,39	178,56	647,80
	ТА	АМг3	44,85	45,37	43,74	28,69	7,24	27,83
			779,80	808,61	765,08	493,10	102,98	484,57
Предлагаемая (рис. 2) с постоянным направлением течения раствора электролита	МДО	Д16	78,47	78,59	77,12	76,07	71,72	66,31
			1009,10	1012,97	992,13	978,52	914,23	827,12
	ТА	АМг3	43,83	45,32	42,85	43,41	40,05	36,79
			766,52	802,27	748,96	757,19	684,23	609,02
Предлагаемая (рис. 2) с переменным направлением течения раствора электролита	МДО	Д16	78,41	78,91	77,12	75,56	73,24	75,73
			1012,93	1017,95	994,81	961,96	925,68	962,67
	ТА	АМг3	44,13	45,28	43,77	41,64	39,40	42,16
			775,24	798,59	764,85	727,49	676,15	738,06

на внешней поверхности трубы выглядит более однородным. На внутренней поверхности ТА-покрытие имеет некоторую неравномерность; его толщина в зоне D, через которую свежий раствор электролита поступает в отверстие, больше, чем в зоне F, через которую отработанный раствор электролита выходит из отверстия в электролитическую ванну. Важно отметить, что в местах соприкосновения со шлангом, по которому раствор электролита подается в отверстие, на внешней поверхности трубы остается кольцевая область без ТА-покрытия. Аналогичные закономерности наблюдаются при обработке методом МДО.

На рис. 6 приведены аналогичные фотографии фрагментов поверхностей труб после обработки методом ТА по предложенной схеме (согласно рис. 2), но с переменным направлением течения раствора электролита, когда он течет из зоны D в зону F в течение первой половины времени обработки, а вторую половину времени обработки после переподсоединения шланга к противоположному концу трубы раствор электролита течет из зоны F в зону D. Можно заметить, что ТА-покрытие на внешней и внутренней поверхностях трубы имеет стабильную насыщенность. Даже в местах соприкосновения со шлангом ТА-покрытие визуально выглядит довольно толстым. Примерно такая же картина наблюдается и при обработке методом МДО.

В таблице приведены результаты измерений толщины и напряжения пробоя ТА и МДО-покрытий в зонах труб, показанных на рис. 4–6, после статистической обработки.

Данные, приведенные в таблице, хорошо согласуются с результатами визуального контроля ТА- и МДО-покрытий и показывают, что по толщине и напряжению пробоя в соответствующих зонах ТА- и МДО-покрытия, полученные по предложенной схеме, по меньшей

мере не уступают ТА- и МДО-покрытиям, полученным по классической схеме.

При этом на наружных поверхностях труб ТА- и МДО-покрытия, полученные по классической и предлагаемой схемам, имеют сопоставимые характеристики, а на внутренних поверхностях ТА- и МДО-покрытия, полученные по предлагаемой схеме с переменным направлением течения раствора электролита, отличаются гораздо лучшей равномерностью. Соотношения минимальных и максимальных значений толщины и напряжения пробоя ТА- и МДО-покрытий во всех зонах измерений для классической схемы находятся в диапазоне 0,12–0,20, а для предлагаемой схемы с переменным направлением течения раствора электролита – в диапазоне 0,84–0,93.

Важно отметить, что, используя предложенную схему обработки, можно получать качественные равномерные ТА- и МДО-покрытия на поверхностях отверстий без изменения состояния других поверхностей изделий, сохраняя их первоначальный внешний вид. Для этого достаточно закрепить изделие выше уровня раствора электролита в ванне и вставить противозлектрод в виде стержня с обтекаемыми изоляторами, исключаяющими контакт изделия и стержня, в отверстие изделия со стороны, свободной от шланга. Также можно вообще отказаться от использования электролитической ванны, заменив ее простым бюджетным резервуаром достаточного объема, изготовленным из материала, химически нейтрального по отношению к раствору электролита, создав условия для протекания раствора электролита по замкнутому циклу «резервуар – отверстие изделия – резервуар».

Результаты проведенного исследования позволяют утверждать, что методы ТА и МДО по предложенной схеме обеспечивают формирование качественных однородных ТА- и МДО-

покрытий на протяженных внутренних поверхностях, в том числе на поверхностях глубоких отверстий, изделий из вентильных металлов. Протекание раствора электролита по внутренним поверхностям способствует его постоянному обновлению, создавая условия для более интенсивного формирования ТА- и МДО-покрытий. При прохождении через отверстие раствор электролита постепенно нагревается, и его состав изменяется, следовательно, в зоне, где свежий раствор втекает в отверстие, ТА- и МДО-покрытие имеет большую толщину, чем в средней зоне, и намного большую толщину, чем в зоне, где нагретый отработанный раствор электролита вытекает из отверстия. Изменение направления течения раствора электролита на противоположное позволяет выровнять толщину ТА- и МДО-покрытий во всех зонах внутренних поверхностей. Но необходимо иметь в виду, что чем больше длина изделия, тем сложнее получить качественное ТА- или МДО-покрытие в средней части его внутренних поверхностей.

Когда свежий раствор подается на внутреннюю поверхность изделия из ванны, отработанный нагретый раствор вытекает обратно в ванну, где он охлаждается, восстанавливает свой химический состав и подается обратно в отверстие изделия, тем самым поддерживая высокую интенсивность образования ТА- и МДО-покрытий.

Важно отметить, что значения толщины и напряжения пробоя всех ТА- и МДО-покрытий устойчиво коррелируют друг с другом, о чем можно судить по небольшим колебаниям значений электрической прочности (отношение напряжения пробоя покрытия к его толщине). Если не принимать во внимание результаты, полученные в зоне  $E$  по классической схеме, то ТА-покрытия на сплаве АМг3 и МДО-покрытия на сплаве Д16 имеют электрическую прочность, попадающую в интервалы 16,56–17,83 и 12,30–13,00 В/мкм соответственно. Таким образом, по значениям величины напряжения пробоя можно косвенно определять значения толщины ТА- и МДО-покрытий путем расчета отношения результатов измерения напряжения пробоя к среднему значению электрической прочности соответствующего покрытия.

## ВЫВОДЫ

Обработка методами ТА и МДО может обеспечить получение качественных равномерных ТА- и МДО-покрытий на протяженных внутренних поверхностях, включая поверхности глубоких отверстий, изделий, изготовленных из сплавов вентильных металлов, при условии, что раствор электролита постоянно свободно обнов-

ляется вблизи этих поверхностей, что недостижимо при использовании классических схем реализации ТА и МДО.

Обработка методами ТА и МДО может обеспечить получение качественных однородных ТА- и МДО-покрытий исключительно на внутренних поверхностях без изменения состояния внешних поверхностей и без использования электролитических ванн – внутри полостей (отверстий) изделий.

Толщина ТА- и МДО-покрытий может быть косвенно определена с достаточно высокой точностью как отношение результатов измерения напряжения пробоя к среднему значению электрической прочности для соответствующего типа покрытия вследствие хорошей корреляции между толщиной ТА- и МДО-покрытий и их напряжением пробоя.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Dyer, C.K., Electrolytic rectification and cathod discharge reversibility of some valve metals, *J. Electrocomp. Sci. Techn.*, 1974, vol. 1, p. 121. <https://doi.org/10.1155/APEC.1.121>.
2. Khalil, N. and Leach, J.S.L., The anodic oxidation of valve metals – I. Determination of ionic transport numbers by  $\alpha$ -spectrometry, *J. Electrochem. Act.*, 1986, p. 1279. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(86\)80148-7](https://doi.org/10.1016/0013-4686(86)80148-7).
3. El-Hameed, A.M.A., Abdel-Aziz, Y.A. and El-Tokhy, F.S., Anodic coating characteristics of different aluminum alloys for spacecraft materials, *J. Mat. Sci. Appl.*, 2017, vol. 8, no. 2, p. 197. [doi:10.4236/msa.2017.82013](https://doi.org/10.4236/msa.2017.82013).
4. Diamanti, M.V., Curto, B.D. and Pedefferri, M.P., Anodic oxidation of titanium: from technical aspects to biomedical applications, *J. App. Biomat. Biom.*, 2011, vol. 9, no. 1, p. 55. <https://doi.org/10.5301/JABB.2011.7429>.
5. Markov, G.A., Mironova, M.K., Potapova, O.G. and Tatarchuk, V.V., Structure of anodic films formed by the microarc oxidation of aluminum, *Izv. Akad.naukSSSR, Neorg. Mat.*, 1983, vol. 19, no. 7, p. 1110.
6. Velavan, A., Saravanan, C.G. and Vikneswaran, M., The impact of formation of oxide layer on the piston crown using micro-arc oxidation on the characteristics of the spark ignition engine, *Key Eng. Mater.*, 2019, vol. 813, p. 31. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.813.31>.
7. Malyshev, V.N., Modification of friction knots work surfaces on the basis of microarc oxidation method, *Int. J. Sci. Res. Sci. Eng. Tech.*, 2016, vol. 2, no. 4, p. 464. <https://doi.org/10.32628/IJSRSET1624106>.

8. Chufistov, O.E., Chufistov, E.A. and Artemiev, V.P., Technology, structure and properties of coatings, formed by anodic oxidation methods on aluminum and its alloys, *J. Non-Ferr. Met.*, 2010, vol. 2, p. 37.
9. Tchufistov, O.E., Formation of coatings on details from valve metals alloys by micro-arc oxidation in internal cavities of counter electrodes, *Sol. State Phenom.*, 2020, vol. 299, p. 833. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.833>
10. Kajánek, D., Hadzima, B., Buhagiar, J., Wasserbauer, J., et al., Corrosion degradation of AZ31 magnesium alloy coated by plasma electrolytic oxidation, *J. Trans. Res. Proc.*, 2019, vol. 40, p. 51. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.010>.
11. Durdu, S., Deniz, Ö.F., Kutbay, I. and Usta, M., Characterization and formation of hydroxyapatite on Ti6Al4V coated by plasma electrolytic oxidation, *J. Alloys Comp.*, 2013, vol. 551, p. 422. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.11.024>.
12. Akbar, E.A., Qaiser, M.A., Hussain, A., Mustafa, R.A., et al., Surface modification of aluminum alloy 6060 through plasma electrolytic oxidation, *Int. J. Eng. Works*, 2017, vol. 4, no. 6, p. 114.
13. Tarantseva, K.R. and Pakhomov, V.S., On the problem of setting a criterion for pitting resistance of stainless steels, *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2010, vol. 46, p. 359. <https://doi.org/10.1134/S2070205110030123>.
14. Kim, D., Sung, D., Lee, J., Kim, Y., et al., Composite plasma electrolytic oxidation to improve the thermal radiation performance and corrosion resistance on an Al substrate, *J. App. Surf. Sci.*, 2015, vol. 357, part B, p. 1396. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.10.003>.
15. Walsh, F.C., Low, C.T., Wood, R.J., Stevens, K.T., et al., Plasma electrolytic oxidation (PEO) for production of anodized coatings on lightweight metal (Al, Mg, Ti) alloys, *J. Surf. Eng. Coat.*, 2009, vol. 87, no. 3, p. 122. <https://doi.org/10.1179/174591908X372482>
16. Tarantseva, K.R., Models and methods of forecasting pitting corrosion, *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2010, vol. 46, p. 139. <https://doi.org/10.1134/S2070205110010211>.
17. Tchufistov, O.E., Tchufistov, E.A. and Zolkin, A.N., Breakdown voltage and electrical strength of oxide coatings formed on aluminum alloys by electrolytic oxidation methods, *Mater. Today: Proc.*, 2021, vol. 38, no. 4, p. 1728. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.237>.

### Summary

It is known that the methods of electrolytic oxidation, including traditional anodizing and microarc oxidation, implemented according to classical schemes in electrolytic baths with mechanical, pneumatic, and magnetic mixers, cannot provide high-quality homogeneous oxide coatings on the inner surfaces of products made from valve metal alloys. In this paper, the principal possibility of obtaining high-quality uniform coatings on the extended internal surfaces of products, including the surfaces of deep holes, when an electrolyte solution is passed through them, is revealed. It has been experimentally proved that, based on the proposed approach, it is possible to process products with deep holes, achieving a ratio of both minimum and maximum values of the thickness and the breakdown voltage of coatings on the internal and external surfaces in a range of 0.85–0.93. A possibility of forming coatings exclusively on the internal surfaces of products without changing the state of their external surfaces, moreover, without using expensive electrolytic baths – inside internal cavities of products themselves, is shown. A good correlation between the values of the thickness and of the breakdown voltage of coatings has been established. As a result, a possibility of indirectly determine the coatings thickness based on the results of their breakdown voltage measuring has been substantiated.

**Keywords:** valve metals, aluminum, traditional anodizing, microarc oxidation, internal surface, deep hole, coating, thickness, breakdown voltage

# Электрофизический механизм возникновения явления поверхностного эффекта в металлическом проводнике с электрическим переменным током проводимости

М. И. Баранов

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния»  
Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»,  
г. Харьков, 61013, Украина, e-mail: [baranovmi49@gmail.com](mailto:baranovmi49@gmail.com)

Поступила в редакцию 26.07.2021

После доработки 20.06.2022

Принята к публикации 29.06.2022

Предложен электрофизический механизм, объясняющий возникновение неравномерного распределения напряженностей собственного переменного электромагнитного поля (ЭМП) по толщине массивного изотропного немагнитного металлического проводника прямоугольного поперечного сечения с электрическим переменным током проводимости  $i_0(t)$  различных амплитудно-временных параметров. В основу механизма, обосновывающего проявление поверхностного эффекта в указанном проводнике, положен закон электромагнитной индукции Фарадея–Максвелла. Математически показано, что возникающие в материале проводника от действия переменного тока проводимости  $i_0(t)$  и соответственно собственного переменного магнитного потока  $\Phi_0(t)$  индукционные переменные токи проводимости и их переменные магнитные поля при  $d\Phi_0(t)/dt > 0$  ослабляют распределенные внутри проводника напряженности собственного переменного ЭМП, а при  $d\Phi_0(t)/dt < 0$  поддерживают уменьшающиеся во времени и по глубине материала проводника напряженности ЭМП.

*Ключевые слова:* металлический проводник, электрический переменный ток проводимости, переменное электромагнитное поле, закон электромагнитной индукции, механизм возникновения поверхностного эффекта

УДК 621.3.01:621.313

<https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.4.16>

## ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестно, что переменный электрический ток проводимости в металлическом проводнике любой геометрической формы распределяется неравномерно по его поперечному сечению [1, 2]. Причем наибольшие значения плотности такого тока будут отмечаться на поверхности проводника. По мере удаления от поверхности проводника в его глубь данная плотность тока станет убывать и собственное электромагнитное поле (ЭМП) проводника будет испытывать пространственное затухание по его толщине. В теоретической электротехнике (электрофизике) это электрофизическое явление получило название поверхностного эффекта (скин-эффекта), протекающего как в квазистационарном, так и нестационарном режимах [1–3].

Следует отметить, что в теории ЭМП Максвелла не рассматриваются электрофизические механизмы, происходящие в сплошных диэлектрических и проводящих средах с переменным (импульсным) ЭМП [4]. В этой теории решается основная задача электродинамики: по заданному простран-

ственно-временному распределению электрических зарядов и токов в сплошных проводящих и диэлектрических средах находятся амплитудно-временные параметры (АВП) напряженностей ЭМП в указанных средах с известными параметрами, описывающими их электрические и магнитные свойства [1–5]. Укажем, что такими параметрами для этих сред в феноменологической теории ЭМП являются приведенные в [4]: абсолютная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_a$ , абсолютная магнитная проницаемость  $\mu_a$  и удельная электропроводность  $\gamma_0$ . В этой связи электрофизический механизм, приводящий к возникновению явления поверхностного эффекта в металлических проводниках произвольной конфигурации с переменным (импульсным) током проводимости различных АВП, оказался малоизученным. На практике при применении переменных (импульсных) токов проводимости (например, в области промышленной электроэнергетики [6, 7], высоковольтной импульсной техники [8–10] и современных электротехнологий [11]) актуальной задачей остается та, которая связана с электрофизическими причинами и природой проявления поверхностного эффекта в токоне-

сущих частях электрических проводов и кабелей и особенностями влияния этого эффекта на электрические параметры кабельно-проводниковой продукции и протекающие в ней электромагнитные процессы.

*Цель статьи* – разработка электрофизического механизма возникновения явления поверхностного эффекта в массивном изотропном немагнитном металлическом проводнике прямоугольного поперечного сечения с электрическим переменным током проводимости различных АВП.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим массивный изотропный немагнитный ( $\mu_a = \mu_r \times \mu_0$  при относительной магнитной проницаемости  $\mu_r = 1$  и  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Гн/м [2]) металлический проводник прямоугольного поперечного сечения  $S_0 = h_0 \times b_0$ , по которому в направлении оси  $OX$  декартовой системы координат и соответственно вдоль его длины  $l_0 \gg h_0$  ( $l_0 \gg b_0$ ) протекает электрический переменный ток проводимости  $i_0(t)$  (рис. 1). Для анализа протекающих в материале проводника электромагнитных процессов принимаем, что переменный ток  $i_0(t)$  изменяется во времени  $t$  по закону затухающей синусоиды [3]:

$$i_0(t) = k_i I_{m1} \exp(-\delta_i t) \sin(2\pi f_i t), \quad (1)$$

где  $I_{m1}$ ,  $\delta_i$ ,  $f_i$  – соответственно амплитуда первой полуволны, коэффициент затухания и частота изменения протекающего по проводнику тока;

$$k_i = \left[ \exp(-0,5\pi^{-1}\delta_i f_i^{-1} \operatorname{arccctg} 0,5\pi^{-1}\delta_i f_i^{-1}) \times \right. \\ \left. x \sin(\operatorname{arccctg} 0,5\pi^{-1}\delta_i f_i^{-1}) \right]^{-1}$$

– нормирующий коэффициент, численно равный  $k_i \geq 1$  (следует заметить, что при  $0,5\pi^{-1}\delta_i f_i^{-1} = 0$ , когда отсутствует затухание электрического переменного тока проводимости  $i_0(t)$ , коэффициент  $k_i = 1$ ).

Полагаем, что на некоторой глубине  $z_\lambda$  рассматриваемого проводника, примерно равной длине волны  $\lambda_0 = 2\pi / (\pi f_i \mu_0 \gamma_0)^{1/2}$  ЭМП в его материале [1], собственный магнитный поток  $\Phi_0(t)$  проводника и его собственное ЭМП будут испытывать практически полное пространственное затухание.

Для лучшего понимания электромагнитных процессов, протекающих в рассматриваемом проводнике, необходимо напомнить, что в электротехнике за положительное направление электрического тока принято направление движения (дрейфа) в проводящем материале электрического контура его положительных электрических зарядов [1]. Что касается

материала исследуемого металлического проводника, то в нем электрический ток будет определяться дрейфом под действием приложенного к этому проводнику электрического напряжения  $u_0(t)$  его отрицательно заряженных свободных электронов, направление движения которых будет противоположным направлению перемещения указанных положительных зарядов. Принимаем, что временные параметры переменного тока проводимости  $i_0(t)$ , собственного переменного магнитного потока  $\Phi_0(t)$  и напряженностей собственного ЭМП проводника будут значительно превышать время релаксации  $\tau_e$  его дрейфующих электронов, равное для основных проводниковых материалов порядка  $10^{-14}$  с [12]. Влиянием тока смещения в материале проводника на электромагнитные процессы в нем пренебрегаем. Требуется с учетом принятых допущений разработать и в обобщенном виде описать электрофизический механизм возникновения явления поверхностного эффекта в исследуемом массивном изотропном немагнитном металлическом проводнике прямоугольного поперечного сечения с переменным током проводимости  $i_0(t)$  различных АВП.

### ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЯВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПРОВОДНИКЕ

В основу данного электрофизического механизма положим классический закон электромагнитной индукции Фарадея–Максвелла [2, 13, 14]. Указанный фундаментальный закон электромагнетизма будет справедлив не только для сплошной проводящей среды рассматриваемого проводника с переменным магнитным полем (поток), но и для любого замкнутого электрического контура, мысленно выбранного в той или иной неэлектропроводящей и электропроводящей области существования такого переменного поля (потока) [2, 4]. При исследовании особенностей пространственного распределения собственного переменного магнитного потока  $\Phi_0(t)$  и напряженностей собственного ЭМП в материале проводника с переменным электрическим током проводимости  $i_0(t)$  указанных АВП выберем в его продольном сечении в плоскости  $XOZ$  элементарный замкнутый электрический контур  $abcd$  прямоугольной формы, приведенный на рис. 1 и характеризующийся высотой  $h_{ad} = h_{bc}$  и длиной  $l_{ab} = l_{dc} = l_0$ . Считаем, что для геометрических размеров выбранного нами в проводнике замкнутого электрического контура  $abcd$  будут справедливы следующие соотношения:  $h_{ad} \ll l_0$ ,

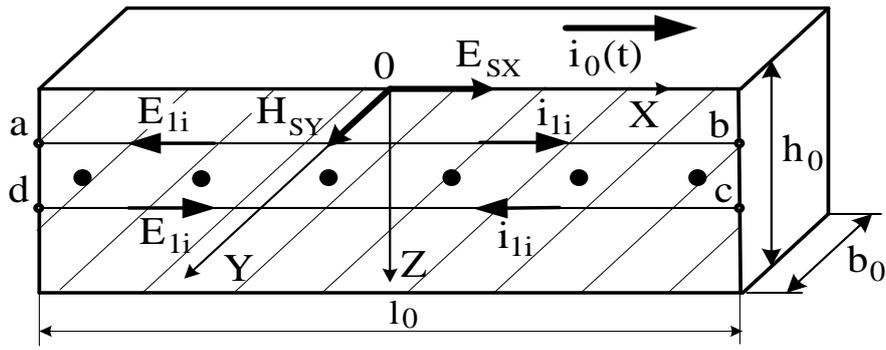


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемого массивного однородного немагнитного металлического проводника прямоугольного поперечного сечения с электрическим переменным током проводимости  $i_0(t)$  и виртуальным замкнутым электрическим контуром  $abcd$  (жирными точкам обозначены векторы напряженности  $H_{1y}(z_1, t)$ , пронизывающие этот контур).

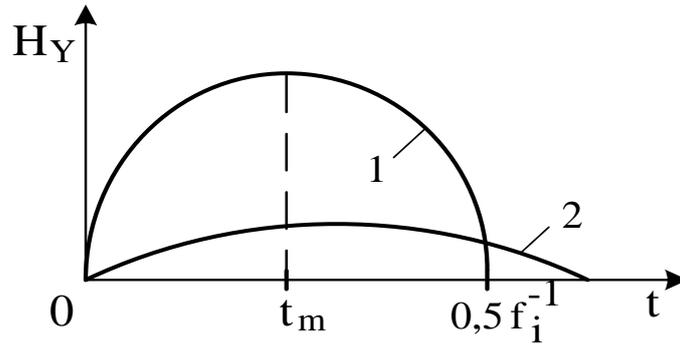


Рис. 2. Временные распределения напряженностей первой полуволны собственного переменного магнитного поля на наружной поверхности ( $H_{sy}$ , кривая 1,  $z = 0$ ) и в глубине ( $H_{ny}$ , кривая 2,  $z = z_n$ ) исследуемого массивного однородного немагнитного металлического проводника с электрическим затухающим по синусоиде током проводимости  $i_0(t)$ .

$h_{ad} \ll h_0$  и  $h_{ad} \ll b_0$ . Применим к замкнутому электрическому контуру  $abcd$ , способному виртуально пошагово (с шагом, равным  $h_s = h_{ad}$ ) перемещаться сверху вниз в плоскости  $XOZ$  от наружной поверхности проводника в его глубину, закон электромагнитной индукции, связанный с изменяющейся во времени  $t$  и его нормально пронизывающей в локальных зонах размещения данного контура соответствующей частью собственного переменного магнитного потока  $\Phi_0(t)$  исследуемого проводника с током проводимости  $i_0(t)$ .

Вначале рассмотрим *случай 1*, когда для переменного тока проводимости  $i_0(t)$  и собственного переменного магнитного потока  $\Phi_0(t)$  проводника будет выполняться следующее неравенство:  $d\Phi_0(t)/dt > 0$ . Этот случай будет соответствовать возрастанию (нарастанию) переменного тока проводимости  $i_0(t)$  и собственного переменного магнитного потока  $\Phi_0(t)$  проводника. Для приведенной на рис. 2 кривой 1 первой полуволны напряженности  $H_{sy}(0, t)$  собственного переменного магнитного поля на плоской наружной поверхности ( $z = 0$ ) рассматриваемого проводника данный случай будет выполняться на временном отрезке  $[0, t_m]$ , где  $t_m$  — время, соответствующее амплитуде первой полуволны напряженности  $H_{sy}(0, t)$ . Кстати, применительно к исследуемому проводнику с переменным электрическим током проводимости  $i_0(t)$  согласно (1)

на его плоской наружной поверхности указанные напряженности магнитного  $H_{sy}(0, t)$  и электрического  $E_{sx}(0, t)$  полей (см. рис. 1) будут связаны соответственно в квазистационарном и нестационарном режимах проявления поверхностного эффекта в однородном материале проводника следующими граничными соотношениями электродинамики [3]:

$$E_{sx}(0, t) = (\gamma_0 h_0)^{-1} H_{sy}(0, t); \quad (2)$$

$$E_{sx}(0, t) = (\gamma_0 h_0)^{-1} \int_0^t \left\{ 1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} \times \exp \left[ -\frac{\pi^2 k^2 (t - \tau)}{\mu_0 \gamma_0 h_0^2} \right] \cos(\pi k) \right\} \frac{\partial H_{sy}(0, \tau)}{\partial \tau} d\tau. \quad (3)$$

Из (2) и (3) явно видно, что временные изменения напряженности  $H_{sy}(0, t)$  магнитного поля приводят к соответствующим изменениям напряженности  $E_{sx}(0, t)$  электрического поля проводника.

Принимая во внимание малость величины  $h_{ad}$ , в дальнейших расчетных оценках будем использовать усредненное в момент времени  $t$  по высоте  $h_{ad}$  «окна» рассматриваемого элементарного замкнутого электрического контура  $abcd$  значение нормально ориентированной к плоскости данного контура на его первом шаге размещения ( $n = 1$ ;  $z = z_1$ ) вблизи наружной поверхности проводника напряженности  $H_{1y}(z_1, t)$

собственного переменного магнитного поля (см. рис. 1). Значение глубины  $z_1$  размещения виртуального контура  $abcd$  относительно наружной поверхности проводника ( $z = 0$ ) привяжем к нижней границе этого контура. Тогда при  $n = 1$  в соответствии с законом электромагнитной индукции для возникающей в виртуальном электрическом контуре  $abcd$  ( $z = z_1$ ) электродвижущей силы  $e_{1i}(z_1, t)$  от прямого действия на него собственного переменного магнитного поля с напряженностью  $H_{1y}(z_1, t)$  в принятом приближении можно записать следующее аналитическое выражение [2]:

$$e_{1i}(z_1, t) = -\mu_0 h_{ad} l_0 \frac{dH_{1y}(z_1, t)}{dt}. \quad (4)$$

Используя (4), для индуцированной при  $n = 1$  ( $z = z_1$ ) в рассматриваемом элементарном замкнутом электрическом контуре  $abcd$  напряженности  $E_{1i}(z_1, t)$  электрического поля (см. рис. 1) имеем:

$$E_{1i}(z_1, t) = -0,5\mu_0 h_{ad} \frac{dH_{1y}(z_1, t)}{dt}. \quad (5)$$

Из (5) видно, что при  $h_{ad} \rightarrow 0$  и  $dH_{1y}(z_1, t)/dt \rightarrow 0$  значение  $E_{1i}(z_1, t)$  будет обнуляться. В этих условиях для высоты  $h_{ad}$  виртуального контура  $abcd$  и напряженности  $H_{1y}(z_1, t)$  собственного магнитного поля проводника рассматриваемый полевой механизм будет терять свою работоспособность. В пределах замкнутого контура  $abcd$  при  $d\Phi_0(t)/dt > 0$  индуцированная напряженность  $E_{1i}(z_1, t)$  переменного электрического поля в соответствии с известным правилом Ленца [2, 4] будет вызывать протекание плотности тока  $\delta_{1i}(z_1, t) = \gamma_0 E_{1i}(z_1, t)$  и индукционного тока  $i_{1i}(z_1, t)$  такого направления, что их переменное магнитное поле будет противодействовать изменению, вызвавшему этот индукционный ток  $i_{1i}(z_1, t)$  соответствующей части магнитного потока  $\Phi_0(t)$ . С учетом того, что переменный индукционный ток  $i_{1i}(z_1, t)$  в замкнутом контуре  $abcd$  является током проводимости, обусловленным дрейфом свободных электронов материала проводника, то направление его протекания вдоль стороны (плеча) этого контура длиной  $l_{ab}$  будет совпадать с направлением протекания собственного тока проводимости  $i_0(t)$  проводника, а вдоль стороны (плеча) данного контура длиной  $l_{dc}$  указанный индукционный ток  $i_{1i}(z_1, t)$  будет направлен в сторону, противоположную направлению протекания принятого тока проводимости  $i_0(t)$  (см. рис. 1). Причем при  $n = 1$  ( $z = z_1$ ) в пределах прямоугольного контура  $abcd$  (см. рис. 1) алгебраическая сумма его индукционных токов, имеющих на противоположных сторонах контура разные направления

своего протекания, будет всегда равна нулю. Поэтому индукционный ток  $i_{1i}(z_1, t)$  рассматриваемого контура  $abcd$  не будет никаким образом влиять на результирующий (интегральный) ток проводимости  $i_0(t)$  проводника. При  $n \gg 1$ , соответствующем размещению замкнутого электрического контура  $abcd$  вдали от наружной поверхности исследуемого проводника ( $z = z_n$ ), аналогично (5) для индуцируемой соответствующей частью собственного переменного магнитного потока  $\Phi_0(t)$  проводника в этом замкнутом контуре напряженности  $E_{ni}(z_n, t)$  электрического поля получаем:

$$E_{ni}(z_n, t) = -0,5\mu_0 h_{ad} \frac{dH_{ny}(z_n, t)}{dt}. \quad (6)$$

Из (6) и данных рис. 1 можно заключить, что возникающие в виртуальном замкнутом электрическом контуре  $abcd$  напряженности  $E_{ni}(z_n, t)$  индуцируемого переменного электрического поля на его противоположных сторонах (плечах) имеют равные по модулю значения и противоположные друг другу знаки, что и обуславливает их взаимную компенсацию. Поэтому напряженности  $E_{ni}(z_n, t)$  индуцируемого электрического поля в используемом нами элементарном виртуальном замкнутом электрическом контуре  $abcd$  не будут влиять на характер распределения по толщине материала рассматриваемого проводника напряженности  $E_{nx}(z_n, t)$  собственного переменного электрического поля.

Исходя из общефизических соображений и принятых допущений следует ожидать того, что  $dH_{ny}(z_n, t)/dt < dH_{1y}(z_1, t)/dt$ . В этой связи согласно (5) и (6) внутри материала рассматриваемого проводника возможно выполнение следующего неравенства:  $E_{ni}(z_n, t) < E_{1i}(z_1, t)$ . Поэтому при  $d\Phi_0(t)/dt > 0$  с увеличением глубины размещения виртуального электрического контура  $abcd$  ( $z_n > z_1$ ) и соответственно слоя проводящего материала проводника влияние явления электромагнитной индукции на характер распределения в нем (проводнике) напряженностей собственного ЭМП будет ослабевать. Индуцируемая согласно (6) напряженность  $E_{ni}(z_n, t)$  переменного электрического поля в контуре  $abcd$  и обусловленная ею плотность тока  $\delta_{ni}(z_n, t) = \gamma_0 E_{ni}(z_n, t)$ , а также вызванный ими индукционный ток  $i_{ni}(z_n, t)$  этого контура в соответствии с правилом Ленца и законом полного тока [1, 2] будут приводить к возникновению в локальной зоне размещения контура  $abcd$  ( $z = z_n$ ) противодействующего проникающему в материал проводника собственному переменному магнитному полю с напряженностью  $H_{ny}(z_n, t)$  наведенного магнитного поля, усредненная по высоте  $h_{ad}$  виртуального

замкнутого контура  $abcd$  напряженность  $H_{ni}(z_n, t)$  которого может быть рассчитана с учетом (6) по следующему соотношению:

$$\begin{aligned} H_{ni}(z_n, t) &= h_{ad} \gamma_0 E_{ni}(z_n, t) = \\ &= -0,5 \mu_0 \gamma_0 h_{ad}^2 \frac{dH_{ny}(z_n, t)}{dt}. \end{aligned} \quad (7)$$

Из (7) и правила Ленца применительно к закону электромагнитной индукции следует, что усредненная напряженность  $H_{ni}(z_n, t)$  переменного магнитного поля от индукционного тока  $i_{ni}(z_n, t)$ , нормально пронизывающая виртуальный замкнутый контур  $abcd$ , будет направлена против усредненной напряженности  $H_{ny}(z_n, t)$  собственного переменного магнитного поля проводника (см. рис. 1). Поэтому для соседних шагов локального размещения при  $n$  и  $(n-1)$  в продольном сечении исследуемого проводника электрического контура  $abcd$  усредненные значения для его напряженностей  $H_{ny}(z_n, t)$  и  $H_{ny}(z_{n-1}, t)$  собственного переменного магнитного поля будут определяться выражением:

$$\begin{aligned} H_{ny}(z_n, t) &= H_{ny}(z_{n-1}, t) - \\ &- 0,5 \mu_0 \gamma_0 h_{ad}^2 \frac{dH_{ny}(z_n, t)}{dt}. \end{aligned} \quad (8)$$

Из (8) для пространственной производной  $dH_{ny}(z_n, t)/dz$  вытекает следующее соотношение:

$$\begin{aligned} \frac{dH_{ny}(z_n, t)}{dz} &= [H_{ny}(z_n, t) - H_{ny}(z_{n-1}, t)] h_{ad}^{-1} = \\ &= -0,5 \mu_0 \gamma_0 h_{ad} \frac{dH_{ny}(z_n, t)}{dt}. \end{aligned} \quad (9)$$

Из (9) видно, что в рассматриваемом случае (при  $d\Phi_0(t)/dt > 0$  и соответственно  $dH_{ny}(z_n, t)/dt > 0$ ) указанная производная  $dH_{ny}(z_n, t)/dz$  будет отрицательной. Это обстоятельство однозначно указывает на то, что при этом с увеличением глубины размещения в исследуемом проводнике принятого виртуального электрического контура  $abcd$  и соответственно глубины проникновения в его материал переменного (импульсного) ЭМП напряженность  $H_{ny}(z_n, t)$  собственного магнитного поля проводника по отношению к ее значению  $H_{ny}(0, t)$  на наружной поверхности ( $z = 0$ ) проводника будет уменьшаться.

Согласно первому уравнению Максвелла из теории ЭМП [1, 12] применительно к рассматриваемой геометрической конфигурации исследуемого металлического проводника с учетом (9) можно записать следующее аналитическое выражение для напряженности  $E_{nx}(z_n, t)$  переменного электрического поля на глубине  $z = z_n = n \times h_{ad}$  размещения принятого контура

$abcd$  в материале проводника:

$$\begin{aligned} E_{nx}(z_n, t) &= -\gamma_0^{-1} \frac{dH_{ny}(z_n, t)}{dz} = \\ &= 0,5 \mu_0 h_{ad} \frac{dH_{ny}(z_n, t)}{dt}. \end{aligned} \quad (10)$$

Кроме того, согласно второму уравнению Максвелла из теории ЭМП [1, 12] для пространственной производной  $dE_{nx}(z_n, t)/dz$  применительно к исследуемому металлическому проводнику имеем:

$$\frac{dE_{nx}(z_n, t)}{dz} = -\mu_0 \frac{dH_{ny}(z_n, t)}{dt}. \quad (11)$$

Укажем, что классическое уравнение (11) электродинамики следует и из соотношения (10), полученного для используемого в оценочных расчетах электромагнитных процессов в проводящем материале исследуемого проводника виртуального замкнутого электрического контура  $abcd$ . При этом в выражении (10) напряженность  $E_{nx}(z_n, t)$  надо поделить на половину высоты  $h_{ad}/2$  указанного виртуального контура (см. рис. 1) и добавить знак «минус» в его правой части, обусловленный отрицательным значением искомой производной  $dE_{nx}(z_n, t)/dz$  для контура. Данное обстоятельство указывает на правомерность используемого подхода при разработке электрофизического механизма, объясняющего возникновение поверхностного эффекта в проводнике с переменным ЭМП (током  $i_0(t)$ ).

Из (11) видно, что в рассматриваемом электрофизическом случае (при  $dH_{ny}(z_n, t)/dt > 0$ ) пространственная производная  $dE_{nx}(z_n, t)/dz$  в материале проводника будет иметь отрицательное значение, что свидетельствует об уменьшении напряженности  $E_{nx}(z_n, t)$  собственного электрического поля проводника по мере проникновения переменного (импульсного) ЭМП вглубь его проводящей среды.

Уменьшение и нелинейный характер изменения временной производной  $dH_{ny}(z_n, t)/dt$  в (8) и (10) с увеличением глубины размещения виртуального электрического контура  $abcd$  в материале проводника затрудняет выполнение по (8) и (10) обоснованных количественных расчетов степени уменьшения усредненных значений для напряженностей собственного переменного магнитного  $H_{ny}(z_n, t)$  и переменного электрического  $E_{nx}(z_n, t)$  полей. Тем не менее с учетом (8) в грубом приближении для усредненной напряженности  $H_{ny}(z_n, t)$  собственного переменного магнитного поля на глубине  $z = z_n = n \times h_{ad}$  немагнитного гомогенного материала исследуемого проводника с током  $i_0(t)$

находим:

$$H_{ny}(z_n, t) \approx H_{sy}(0, t) - 0,5n\mu_0\gamma_0 h_{ad}^2 \frac{dH_{ny}(z_n, t)}{dt}. \quad (12)$$

Из (12) при достаточно большом удалении используемого контура  $abcd$  от плоской наружной поверхности ( $z = 0$ ) исследуемого проводника ( $n \gg 1$ ) следует, что  $H_{ny}(z_n, t) \rightarrow 0$ . При этом в соответствии с (10) и (11) будет происходить и пространственное затухание  $E_{nx}(z_n, t)$ . Поэтому в данном случае станет наблюдаться практически полное затухание по толщине материала проводника его ЭМП.

Важно указать на то, что согласно (8) и (12) при  $d\Phi_0(t)/dt > 0$  по мере удаления от наружной поверхности ( $z = 0$ ) проводника с напряженностью  $H_{sy}(0, t)$  собственного переменного магнитного поля локальной зоны размещения ( $z > 0$ ) виртуального замкнутого электрического контура  $abcd$  в глубине материала проводника будет наблюдаться ослабление напряженности собственного переменного магнитного поля. Причем, чем будет выше скорость изменения во времени  $t$  собственного переменного магнитного потока  $\Phi_0(t)$  проводника и соответственно напряженности  $H_{ny}(z_n, t)$  его собственного переменного магнитного поля (чем будет выше частота  $f_i$  колебаний тока проводимости  $i_0(t)$  в проводнике), а также чем будет больше значение удельной электропроводности  $\gamma_0$  материала проводника, тем согласно (8) это ослабление станет большим. При этом пространственное затухание собственного переменного магнитного поля проводника, обусловленного собственным переменным магнитным потоком  $\Phi_0(t)$ , будет наступать на меньшей глубине его проводящего материала и при меньшем числе шагов  $n$  виртуального перемещения по толщине проводника контура  $abcd$ . В первом приближении максимальное число шагов  $n = n_m$  перемещения контура  $abcd$  по материалу проводника может быть оценено из следующего соотношения:  $n_m \approx \lambda_0/h_{ad} \approx 2\pi/(\pi f_i \mu_0 \gamma_0 h_{ad}^2)^{1/2}$ . Из данного расчетного соотношения видно, что с возрастанием частоты  $f_i$  колебаний тока  $i_0(t)$  и удельной электропроводности  $\gamma_0$  материала проводника это число  $n_m$  будет уменьшаться. Это обстоятельство может дополнительно указывать на то, что с ростом частоты  $f_i$  колебаний тока проводимости  $i_0(t)$  и значений удельной электропроводности  $\gamma_0$  процесс пространственного ослабления (затухания) собственного магнитного поля в проводящем материале проводника будет усиливаться. Описанному на основе предлагаемого электрофизического механизма распределения в проводнике собственного ЭМП характеру изменения напряженности  $H_{ny}(z_n, t)$  собственного переменного магнитного поля проводника

внутри его проводящего материала при достаточно большом удалении контура  $abcd$  от его наружной поверхности ( $z = 0$ , см. рис. 1) для случая  $d\Phi_0(t)/dt > 0$  на временном интервале  $[0, t_m]$  будет качественно соответствовать нарастающая часть кривой 2 на рис. 2, указывающая на значительное ослабление по глубине проводника проникающего в него собственного переменного магнитного поля.

Что касается выбора численного значения шага вертикального перемещения  $h_s$  в плоскости  $XOZ$  рассматриваемого металлического проводника виртуального электрического контура  $abcd$  прямоугольной формы, равного высоте  $h_{ad}$  этого контура, то при этом можно воспользоваться следующим неравенством:  $\mu_0\gamma_0 h_{ad}^2 \ll 0,25f_i^{-1}$ . Левая часть данного неравенства будет соответствовать постоянной времени  $\tau_c = \mu_0\gamma_0 h_{ad}^2$  элементарного замкнутого контура  $abcd$ , а правая часть – четверти периода колебаний тока проводимости  $i_0(t)$ , равной  $t_m$  (см. рис. 2). В этой связи в первом приближении искомое значение  $h_s = h_{ad}$  может быть оценено из следующего соотношения:  $h_{ad} \approx [0,025f_i^{-1}/(\mu_0\gamma_0)]^{1/2}$ . Из приведенного расчетного соотношения для  $h_s = h_{ad}$  видно, что с ростом частоты  $f_i$  колебаний тока  $i_0(t)$  и удельной электропроводности  $\gamma_0$  материала проводника шаг  $h_s = h_{ad}$  в (4)–(10) будет уменьшаться. Укажем, что для практического случая с массивным ( $h_0 = 10$  мм) медным ( $\gamma_0 = 5,81 \times 10^7$  Ом<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup> [4]) проводником принятой формы при  $f_i = 50 \times 10^3$  Гц, характерного для области высоковольтной импульсной техники [3, 12], из рекомендуемого выше приближенного расчетного соотношения для  $h_{ad}$  следует, что шаг  $h_s$  виртуального перемещения элементарного электрического контура  $abcd$  будет принимать численное значение, примерно равное  $h_s \approx 0,083$  мм. При этом максимальное число шагов  $n_m \approx 2\pi/(0,025\pi)^{1/2}$  вертикального перемещения данного контура  $abcd$  в указанном немагнитном материале проводника численно составит около  $n_m \approx 22$ .

Приведенные для случая  $d\Phi_0(t)/dt > 0$  изменения усредненной напряженности  $H_{ny}(z_n, t)$  собственного переменного магнитного поля в материале проводника вызовут соответствующие изменения и усредненной напряженности  $E_{nx}(z_n, t)$  собственного переменного электрического поля проводника (см. рис. 1) в составе единой распространяющейся в его однородном материале волны ЭМП [15]. Интересно отметить, что применение для предлагаемого электрофизического механизма, объясняющего и раскрывающего природу возникновения неравномерного по толщине однородного немагнитного проводящего материала исследуемого металлического

проводника распределения напряженностей собственного переменного ЭМП, перемещающегося по толщине рассматриваемого проводника в его продольном сечении виртуального элементарного замкнутого электрического контура  $abcd$  прямоугольной конфигурации, позволяет учесть влияние явления электромагнитной индукции [1, 2] на указанное распределение в материале проводника изменений его собственного переменного ЭМП.

На правомерность приведенных на рис. 2 для случая  $d\Phi_0(t)/dt > 0$  результатов временного распределения внутри рассматриваемого проводника напряженности  $H_{ny}(z_n, t)$  его собственного переменного магнитного поля, полученных на основе предлагаемого электрофизического механизма возникновения в материале проводника неравномерного по его толщине распределения напряженностей собственного переменного ЭМП проводника, указывают приведенные в [3, 16, 17] результаты аналитических полевых электродинамических расчетов для нестационарного поверхностного эффекта, выполненных для анализируемого случая с использованием классических уравнений Максвелла.

Далее рассмотрим *случай 2*, когда для электрического переменного тока проводимости  $i_0(t)$  и собственного переменного магнитного потока  $\Phi_0(t)$  рассматриваемого проводника будет выполняться следующее неравенство:  $d\Phi_0(t)/dt < 0$ . Этот случай будет соответствовать снижению (спаду) переменного тока проводимости  $i_0(t)$  и собственного переменного магнитного потока  $\Phi_0(t)$  проводника. Для кривой  $I$  на рис. 2, характерной для первой полуволны напряженности  $H_{yy}(0, t)$  собственного переменного магнитного поля на плоской наружной поверхности ( $z = 0$ ) исследуемого проводника, этот случай будет выполняться для  $t > t_m$  на временном отрезке  $[t_m, f_i^{-1}/2]$ . Используя описанную выше модель элементарного электрического контура  $abcd$ , виртуально и пошагово ( $z = z_n = n \cdot h_{ad}$ , где  $n = 0, 1, 2, 3, \dots, n_m$ ) перемещающегося сверху вниз в плоскости  $XOZ$  по однородному материалу проводника, с учетом принятых на рис. 1 направлений векторов напряженностей электрического  $E_{sx}(0, t)$  и магнитного  $H_{yy}(0, t)$  полей на наружной поверхности проводника ( $z = 0$ ), а также направлений индуцированной при  $n = 1$  напряженности  $E_{ni}(z_n, t)$  переменного электрического поля в указанном замкнутом электрическом контуре  $abcd$ , можно показать, что в данном случае выражение для индуцируемой при  $d\Phi_0(t)/dt < 0$  в этом контуре соответствующей частью

собственного переменного магнитного потока  $\Phi_0(t)$  проводника напряженности  $E_{ni2}(z_n, t)$  электрического поля принимает следующий вид:

$$E_{ni2}(z_n, t) = 0,5\mu_0 h_{ad} \frac{dH_{ny}(z_n, t)}{dt}. \quad (13)$$

Видно, что выражение (13) для  $E_{ni2}(z_n, t)$  от аналогичного выражения (6) для  $E_{ni}(z_n, t)$  отличается лишь знаком в их правой части. Вызванные напряженностью  $E_{ni2}(z_n, t)$  переменного электрического поля плотность тока  $\delta_{ni2}(z_n, t) = \gamma_0 E_{ni2}(z_n, t)$  и индукционный ток  $i_{ni2}(z_n, t)$  в контуре  $abcd$  в соответствии с правилом Ленца и законом полного тока [1, 2] будут приводить к возникновению в локальной зоне размещения замкнутого контура  $abcd$  (на глубине  $z = z_n$ ) наведенного напряженностью  $H_{ny}(z_n, t)$  собственного магнитного поля и противодействующего изменению собственного магнитного потока  $\Phi_0(t)$  магнитного поля с усредненной по высоте  $h_{ad}$  виртуального контура  $abcd$  напряженностью  $H_{ni2}(z_n, t)$ :

$$\begin{aligned} H_{ni2}(z_n, t) &= h_{ad} \gamma_0 E_{ni2}(z_n, t) = \\ &= 0,5\mu_0 \gamma_0 h_{ad}^2 \frac{dH_{ny}(z_n, t)}{dt}. \end{aligned} \quad (14)$$

Усредненная напряженность  $H_{ni2}(z_n, t)$  магнитного поля по (14) от индукционного тока  $i_{ni2}(z_n, t)$ , нормально пересекающая плоскость виртуального прямоугольного замкнутого контура  $abcd$ , в этом случае ( $d\Phi_0(t)/dt < 0$ ) будет совпадать по направлению с усредненной напряженностью  $H_{ny}(z_n, t)$  собственного переменного магнитного поля проводника (см. рис. 1). Поэтому с учетом (14) при  $d\Phi_0(t)/dt < 0$  для соседних шагов локального размещения при  $n$  и  $(n-1)$  в продольном сечении проводника, лежащем в плоскости  $XOZ$ , виртуального контура  $abcd$  усредненные значения для его напряженностей  $H_{ny}(z_n, t)$  и  $H_{(n-1)y}(z_{n-1}, t)$  собственного переменного магнитного поля будут определяться выражением:

$$\begin{aligned} H_{ny}(z_n, t) &= H_{(n-1)y}(z_{n-1}, t) + \\ &+ 0,5\mu_0 \gamma_0 h_{ad}^2 \frac{dH_{ny}(z_n, t)}{dt}. \end{aligned} \quad (15)$$

Из (15) следует, что при  $d\Phi_0(t)/dt < 0$  индуцируемая по (14) напряженность  $H_{ni2}(z_n, t)$  магнитного поля на глубине  $z = z_n$  размещения виртуального контура  $abcd$  будет способствовать определенному возрастанию внутри материала проводника уменьшающихся во времени  $t$  значений напряженности  $H_{ny}(z_n, t)$  собственного магнитного поля. В рассматриваемом случае ( $d\Phi_0(t)/dt < 0$ ) согласно правилу Ленца явление электромагнитной индукции,

протекающее в материале исследуемого проводника, будет способствовать согласно (15) поддержанию во времени  $t$  его спадающего и пространственно затухающего собственного переменного магнитного поля. Такая особенность проявления для случая  $d\Phi_0(t)/dt < 0$  в материале проводника электромагнитной индукции будет приводить к временному сдвигу вправо (в сторону больших времен  $t$ ) кривой напряженности  $H_{ny}(z_n, t)$  собственного переменного магнитного поля, характерной для глубин  $z = z_n = n \times h_{ad}$ . Будет происходить так называемое «размазывание» (смещение) во времени  $t$  проникающего вглубь материала проводника переменного магнитного поля и трансформация его частотного спектра в область более низких частот ЭМП.

Причем для  $d\Phi_0(t)/dt < 0$  чем будет выше скорость изменения во времени  $t$  собственного переменного магнитного потока  $\Phi_0(t)$  проводника и соответственно напряженности  $H_{ny}(z_n, t)$  его собственного переменного магнитного поля, а также чем будет выше частота  $f_i$  колебаний тока проводимости  $i_0(t)$  в проводнике и больше значение удельной электропроводности  $\gamma_0$  материала исследуемого проводника, тем согласно (15) эта «поддержка» убывающего во времени  $t$  и затухающего по координате  $z$  (по толщине проводника) собственного магнитного поля будет большей. Кроме того, из (15) вытекает, что с увеличением глубины размещения  $z_n = n \times h_{ad}$  виртуального электрического контура  $abcd$  и нелинейным изменением в материале проводника с одновременным уменьшением временной производной  $dH_{ny}(z_n, t)/dt$  влияние явления электромагнитной индукции на процесс пространственно-временного распределения в проводнике напряженностей его собственного ЭМП будет ослабевать.

Описанный выше характер пространственно-временного изменения усредненной напряженности  $H_{ny}(z_n, t)$  собственного переменного магнитного поля рассматриваемого проводника, базирующийся на предлагаемом электрофизическом механизме неравномерного по его толщине распределения напряженностей собственного переменного ЭМП, будет качественно соответствовать при  $t > t_m$  ходу кривой 2 для  $H_{ny}(z_n, t)$  на рис. 2. Как и для случая 1 ( $d\Phi_0(t)/dt > 0$ ), в случае 2 ( $d\Phi_0(t)/dt < 0$ ) приведенные особенности изменения по координате  $z$  и во времени  $t$  усредненной напряженности  $H_{ny}(z_n, t)$  собственного переменного магнитного поля проводника вызовут соответствующие изменения и для усредненной напряженности  $E_{nx}(z_n, t)$  собственного переменного электри-

ческого поля данного проводника [15]. В результате таких пространственно-временных изменений при  $d\Phi_0(t)/dt < 0$  напряженностей  $H_{ny}(z_n, t)$  и  $E_{nx}(z_n, t)$  собственного переменного ЭМП исследуемого проводника в его однородном немагнитном материале и будет проявляться рассматриваемый нами поверхностный эффект, характеризующийся неравномерным по координате  $z$  и толщине однородного немагнитного материала исследуемого проводника распределением напряженностей его собственного переменного ЭМП.

Результаты аналитических полевых электродинамических расчетов для нестационарного поверхностного эффекта применительно к исследуемому массивному металлическому проводнику с используемым по (1) электрическим переменным током проводимости  $i_0(t)$ , выполненным с применением классических уравнений Максвелла и приведенных в [3, 16, 17], подтверждают правомерность для анализируемого случая  $d\Phi_0(t)/dt < 0$  описанного и указанного на рис. 2 (кривая 2 для  $t > t_m$ ) характера изменения напряженности  $H_{ny}(z_n, t)$  собственного переменного магнитного поля внутри однородного немагнитного материала данного проводника и соответственно работоспособность предлагаемого электрофизического механизма возникновения в нем явления поверхностного эффекта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые на основе применения виртуального элементарного замкнутого электрического контура  $abcd$  прямоугольной конфигурации (высотой  $h_{ad}$  и длиной  $l_0 \gg h_{ad}$ ) и фундаментального закона электромагнитной индукции Фарадея–Максвелла к нему разработан электрофизический механизм возникновения явления поверхностного эффекта в массивном однородном немагнитном металлическом проводнике длиной  $l_0$  прямоугольного поперечного (продольного) сечения с переменным (импульсным) током проводимости  $i_0(t)$  различных АВП, формирующим в материале проводника собственный переменный магнитный поток  $\Phi_0(t)$  и собственное переменное (импульсное) ЭМП.

2. Продемонстрированы электрофизические возможности разработанного механизма по теоретическому обоснованию и природе проявления неравномерного распределения напряженностей собственного переменного ЭМП по толщине материала исследуемого проводника для различных скоростей изменения его переменного тока проводимости  $i_0(t)$  и переменного магнитного потока  $\Phi_0(t)$ , а также

для различных значений частоты  $f_i$  колебаний данного тока проводимости  $i_0(t)$  и удельной электропроводности  $\gamma_0$  материала проводника. Показано, что при  $d\Phi_0(t)/dt > 0$  возникающие в материале проводника индукционные электрические переменные токи проводимости и их переменные магнитные поля ослабляют распределенные внутри проводника напряженности собственного переменного ЭМП и вызывают их пространственное затухание, а при  $d\Phi_0(t)/dt < 0$  указанные наведенные переменные токи проводимости и их магнитные поля поддерживают уменьшающиеся во времени  $t$  и по глубине материала проводника напряженности его собственного ЭМП, сдвигаемые (смещаемые) из-за этого внутри материала проводника в область больших времен  $t$  и более низких частот.

3. Приведенные результаты верификации полученных на основе разработанного электрофизического механизма возникновения явления поверхностного эффекта в рассматриваемом проводнике расчетных данных указывают на правомерность и работоспособность предлагаемого механизма.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Нейман, Л.Р., Демирчян, К.С., *Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов в 2 томах*. Том 2. Л.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
2. Яворский, Б.М., Детлаф, А.А., *Справочник по физике*. М.: Наука, 1990. 624 с.
3. Баранов, М.И., *Избранные вопросы электрофизики: Монография в 4 томах. Том 2. Книга 1: Теория электрофизических эффектов и задач*. Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. 384 с.
4. Кузьмичев, В.Е., *Законы и формулы физики*. Киев: Наукова думка, 1989. 864 с.
5. Подольцев, А.Д., Кучерявая, И.Н., *Элементы теории и численного расчета электромагнитных процессов в проводящих средах*. Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 1999. 363 с.
6. *Электротехнический справочник. Производство и распределение электрической энергии*. Том 3. Книга 1. М.: Энергоатомиздат, 1988. 880 с.
7. Шидловский, А.К., Щерба, А.А., Золотарев, В.М., Подольцев, А.Д., Кучерявая, И.Н., *Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения*. Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2013. 550 с.
8. Бейер, М., Бёк, В., Мёллер, К., Цангель, В., *Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения*. М.: Энергоатомиздат, 1989. 555 с.
9. Бортник, И.М., Белогловский, А.А., Верещагин, И.П., Вершинин, Ю.Н. и др., *Электрофизические основы техники высоких напряжений: Учебник для ВУЗов*. М.: Изд. дом МЭИ, 2010. 704 с.
10. Месяц, Г.А., *Импульсная энергетика и электроника*. М.: Наука, 2004. 704 с.
11. Подольцев, А.Д., Кучерявая, И.Н., *Мультифизическое моделирование в электротехнике*. Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. 305 с.
12. Кнопфель, Г., *Сверхсильные импульсные магнитные поля*. М.: Мир, 1972. 391 с.
13. Баранов, М.И., Электрофизический микро-механизм явления электромагнитной индукции в движущемся металлическом проводнике, *Электричество*, 2010, № 11, с. 59.
14. Баранов, М.И., Электрофизический микро-механизм явления электромагнитной индукции в неподвижном металлическом проводнике, *Электричество*, 2012, № 1, с. 36.
15. Никольский, В.В., Никольская, Т.И., *Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие для вузов*. М.: Наука, 1989. 544 с.
16. Баранов, М.И., Белый, И.В., Хименко, Л.Т., Поверхностный эффект и распределение электродинамических усилий в цилиндрических токопроводах коаксиальной системы с импульсным током, *Электричество*, 1976, № 10, с. 1.
17. Баранов, М.И., Поверхностный эффект в полой проводящем изотропном цилиндре с аксиальным импульсным магнитным полем, *Технічна електродинаміка*, 1999, № 2, с. 3.

#### Summary

An electrophysical mechanism explaining the origin of an uneven distribution of the field strength of the intrinsic alternating electromagnetic field (EMF) over the thickness of the bulk homogeneous nonmagnetic metal conductor with a rectangular cross-section with an alternating current  $i_0(t)$  of different peak-temporal parameters is suggested. This mechanism, justifying the manifestation of the surface effect in the specified conductor, is based on the Faraday–Maxwell law of electromagnetic induction. It is mathematically shown that inductive alternating conduction currents and their alternating EMF arising in the conductor material due to the action of an alternating conduction current  $i_0(t)$  and, accordingly, an intrinsic alternating magnetic flux  $\Phi_0(t)$  at  $d\Phi_0(t)/dt > 0$  weaken the intrinsic alternating EMF strength distributed inside the conductor, and at  $d\Phi_0(t)/dt < 0$  they maintain the EMF strength diminishing with time and the material depth.

**Keywords:** metal conductor, alternating current, alternating electromagnetic field, law of electromagnetic induction, mechanism of origin of the superficial effect

# К вопросу о расчете величины индуцированных зарядов и электростатического диполя сплюснутого сфероида с осью симметрии, коллинеарной внешнему однородному электростатическому полю

Н. Ю. Колбнева

Ярославская государственная сельскохозяйственная академия,  
г. Ярославль, 150042, Россия, e-mail: [kolbneva-nata@yandex.ru](mailto:kolbneva-nata@yandex.ru)

Поступила в редакцию 20.02.2022

После доработки 02.05.2023

Принята к публикации 23.05.2023

В аналитических асимптотических расчетах первого порядка малости по квадрату эксцентриситета определены параметры поверхностных индуцированных зарядов, положения их центров и величина эквивалентного диполя сплюснутого проводящего сфероида путем перехода от сфероидальных координат в сферические координаты. Получены характеристики эквивалентного диполя в зависимости от напряженности электростатического поля, квадрата эксцентриситета и радиуса равновеликой сферы.

*Ключевые слова:* сплюснутая сфероидальная капля, электростатическое поле, электростатический потенциал, центры индуцированных зарядов, жесткий диполь

УДК 532.59:534.1

<https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.25>

## ВВЕДЕНИЕ

Исследования туманных и облачных капель во внешних электрических полях вызывают интерес в связи с многочисленными приложениями в геофизике, гидрометеорологии, научном приборостроении и технологии [1–4]. Известно, что в природных условиях наблюдаются внутриоблачные и дождевые капли различной формы: сферические, сплюснутые сфероидальные и вытянутые сфероидальные [5–7]. При этом большинство экспериментальных и теоретических работ посвящены проблеме исследования во внешних электрических полях капли, имеющей равновесную вытянутую вдоль направления поля сфероидальную форму [8–11]. Однако многие вопросы, связанные с исследованием сплюснутой сфероидальной капли, до сих пор являются малоизученными. Тем не менее такая капля, находящаяся во внешних электрических полях, является объектом исследований грозовых облаков, огней Св. Эльма и других жидкокапельных систем естественного и искусственного происхождения [12, 13].

Знания о деформации равновесной поверхности капли по сравнению с исходной сферической формой нужны для оценки интенсивностей акустического и электромагнитного излучений туманных, внутриоблачных и дождевых капель, а также диапазона частот, в котором они наблюдаются [14, 15]. Кроме того, исследования

деформации равновесных форм капель в различных силовых полях (электрических, аэродинамических, гравитационных, акустических и т.д.) необходимы для анализа физических закономерностей временной эволюции неустойчивых капель [16, 17].

В таких задачах предлагаемые модели строятся в рамках электрогидродинамики, а аналитические решения проводятся классическими методами теории возмущений путем разложения по двум независимым малым параметрам квадрата эксцентриситета и безразмерной амплитуды осцилляций в сферической системе координат.

Согласно [18] осциллирующая вытянутая сфероидальная капля, подвешенная в электростатическом поле, моделируется диполем. Ввиду этого возникает необходимость отдельного поиска характеристик диполя равновесного сплюснутого проводящего сфероида при малых стационарных деформациях.

Заметим, что сходные фрагменты подобных задач (аналитические выражения для равновесного электростатического потенциала и распределения зарядов на равновесной поверхности сплюснутого проводящего сфероида) уже решены ранее (см. [19, 20]), но в весьма неудобных для практического использования сфероидальных координатах. В связи с этим целесообразно иметь аналитические асимптотические решения, заранее переведенные в сферические координаты, что может существенно

помочь в устранении математической сложности и громоздких расчетов при рассмотрении обсуждаемых задач.

### ФИЗИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим незаряженную проводящую сферу радиуса  $R$ , находящуюся в вакууме в однородном электростатическом поле напряженностью  $E_0$ .

Примем, что во внешнем электрическом поле сфера деформируется в сплюснутый сфероид с осью симметрии, ориентированной по полю.

Задачу будем решать в осесимметричной постановке. Уравнение сплюснутого сфероида с центром в начале сферической системы координат  $(r, \theta, \varphi)$  в первом порядке малости по квадрату эксцентриситета имеет вид [21, 22]:

$$r(\theta) = \frac{R(1-e^2)^{1/3}}{(1-e^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} \approx R \left( 1 - \frac{1}{3} e^2 P_2(\mu) \right), \quad (1)$$

где  $e = \sqrt{1 - \left(\frac{c}{a}\right)^2}$  – эксцентриситет сфероида;

$a, c$  – большая и малая полуоси сфероида;  $P_n(\mu)$  – осесимметричный полином Лежандра  $n$ -го порядка [23],  $\mu \equiv \cos \theta$ . Здесь полярный угол  $\theta$  отсчитывается от положительного направления оси вращения.

В соответствии с общезначимыми принципами под действием электрического поля на поверхности проводящего сфероида индуцируются электрические заряды. Пусть внутренняя среда проводника имеет большую проводимость, так что характерное время перераспределения индуцированных зарядов много меньше гидродинамического времени, и электрическое поле в окрестности сфероида примем постоянным в любой момент времени с электрическим потенциалом  $\Phi(r, \theta)$ . Напряженность поля связана с электрическим потенциалом соотношением:  $\vec{E} = -\nabla \Phi(r, \theta)$  [24].

Проводящий сфероид смоделируем эквивалентным диполем (рис. 1). Разноименным индуцированным внешним электрическим полем зарядам поставим в соответствие равновеликие точечные заряды. Эти заряды расположим на оси симметрии сфероида в положениях центров положительного  $q_+$  и отрицательного  $q_-$  зарядов. В результате имеем жесткий диполь с дипольным моментом:

$$\vec{d} = q_+ (\vec{R}_{q_+} - \vec{R}_{q_-}), \quad (2)$$

где  $\vec{R}_{q_{\pm}}$  – радиусы-векторы, определяющие положение центров индуцированных зарядов.

Таким образом, в нижеследующем рассмотрении найдем величину и положение центров зарядов, индуцированных однородным электрическим полем, а также величину дипольного момента для проводящего сплюснутого сфероида в сферических координатах путем перехода от сфероидальных координат.

### ПЕРЕХОД ОТ ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО В СФЕРОИДАЛЬНЫХ КООРДИНАТАХ, К ВЫРАЖЕНИЮ, ЗАПИСАННОМУ В СФЕРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

Чтобы найти характеристики диполя для проводящего сплюснутого сфероида, прежде всего, необходимо получить аналитическое выражение электрического потенциала, записанного в сферической системе координат.

Для эллипсоида с двумя равными полуосями  $a = b > c$  эллипсоидальные координаты  $(\xi, \eta, \zeta)$  вырождаются в сплюснутые сфероидальные координаты  $(\xi, \zeta, \varphi)$ .

Отметим, что для сплюснутого сфероида ось симметрии  $z$  направлена параллельно электростатическому полю  $\vec{E}_0$ . Тогда выражение для электрического потенциала вблизи поверхности сплюснутого проводящего сфероида во внешнем электрическом поле в сфероидальных координатах определяется в виде [19, с. 48]:

$$\Phi = -E_0 z \left\{ 1 - \left( \sqrt{\frac{a^2 - c^2}{\xi + c^2}} - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{a^2 - c^2}{\xi + c^2}} \right) \times \right. \\ \left. \times \left( \sqrt{\frac{a^2}{c^2} - 1} - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{a^2}{c^2} - 1} \right)^{-1} \right\}. \quad (3)$$

Здесь координата  $\xi$  находится из решения уравнения:

$$\frac{\rho^2}{a^2 + \xi} + \frac{z^2}{c^2 + \xi} - 1 = 0. \quad (4)$$

Отметим, что в (4) цилиндрические координаты  $z, \rho$  определяются через эллипсоидальные координаты  $\xi, \eta$  в виде:

$$z = \pm \sqrt{\frac{(\xi + c^2)(\eta + c^2)}{c^2 - a^2}}, \quad \rho = \sqrt{\frac{(\xi + a^2)(\eta + a^2)}{a^2 - c^2}}.$$

Решение (3) записывается как:

$$\xi_{1,2} = \frac{1}{2} \left\{ -\left( a^2 + c^2 \right) + z^2 + \rho^2 \pm \sqrt{\left( -\left( a^2 + c^2 \right) + z^2 + \rho^2 \right)^2 + 4\left( c^2 \rho^2 + a^2 \left( z^2 - c^2 \right) \right)} \right\}. \quad (5)$$

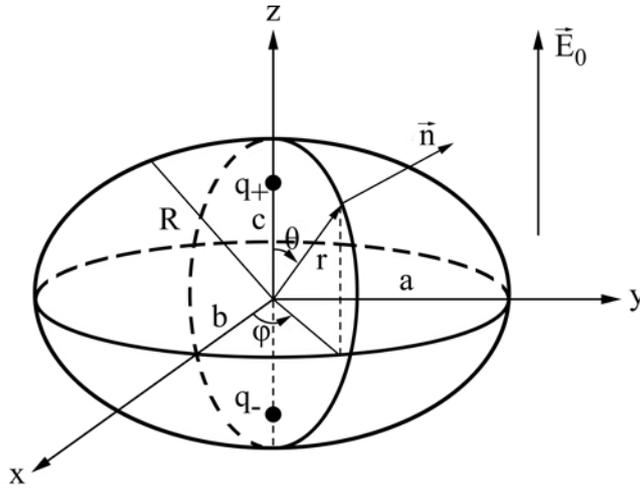


Рис. 1. Схема расположения индуцированных зарядов в сплюснутом сфероиде.

Из (5) выберем такое  $\xi$ , что в пространстве вне эллипсоида координата  $\xi$  принимает значения  $0 \leq \xi < \infty$ .

Если в (5) оценить выражение в фигурных скобках, то можно увидеть, что один из корней уравнения (4) является положительным, другой – отрицательным.

Таким образом, получим:

$$\xi = \frac{1}{2} \left\{ -\left(a^2 + c^2\right) + z^2 + \rho^2 \pm \sqrt{\left(-\left(a^2 + c^2\right) + z^2 + \rho^2\right)^2 + 4\left(c^2 \rho^2 + a^2\left(z^2 - c^2\right)\right)} \right\}. \quad (6)$$

В (6) большая  $a$  и малая  $c$  полуоси сфероида связаны с эксцентриситетом  $e$  на основе соотношений:

$$a = R(1 - e^2)^{-1/6}, \quad c = R(1 - e^2)^{1/3}. \quad (7)$$

Выразим  $z$ ,  $\rho$  через сферические координаты в виде:

$$z = r \cos \theta, \quad \rho = r \sin \theta. \quad (8)$$

В итоге, подставляя (6)–(8) в (3) и раскладывая получившееся выражение в ряд по степеням малого параметра квадрата эксцентриситета  $e^2$  ( $e^2 \ll 1$ ), найдем электрический потенциал в окрестности сплюснутого сфероида, расположенного во внешнем электрическом поле, в сферических координатах в линейном приближении по  $e^2$ :

$$\Phi(r, \theta) = E_0 \left[ r P_1(\mu) \left( \frac{R^3}{r^3} - 1 \right) - \frac{2 R^3}{5 r^2} e^2 \left( P_1(\mu) + \frac{3 R^2}{2 r^2} P_3(\mu) \right) \right], \quad (9)$$

где  $P_n(\mu)$  – осесимметричный полином Лежандра  $n$ -го порядка [23];  $n$  – целое число,  $\mu \equiv \cos \theta$ .

### РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА СПЛЮСНУТОГО СФЕРОИДА В СФЕРИЧЕСКИХ КООРДИНАТАХ

Для отыскания электрического потенциала в окрестности осесимметричного сплюснутого сфероида во внешнем электрическом поле сформулируем краевую задачу, состоящую из уравнения Лапласа:

$$\Delta \Phi(r, \theta) = 0 \quad (10)$$

условия поведения электрического потенциала на бесконечности:

$$r \rightarrow \infty: \Phi(r, \theta) \rightarrow -E_0 r \cos \theta \quad (11)$$

постоянства электрического потенциала вдоль поверхности сфероида:

$$r = r(\theta): \Phi(r, \theta) = \text{const} \quad (12)$$

и равенства нулю суммарного заряда:

$$\frac{1}{4\pi} \oint_S (\vec{n}(r, \theta), \nabla \Phi(r, \theta)) dS = 0,$$

$$S = [r = r(\theta), 0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \phi \leq 2\pi], \quad (13)$$

где  $r = r(\theta)$  – уравнение сплюснутого сфероида;  $\vec{n}(r, \theta)$  – единичный вектор нормали к поверхности сфероида, определяемый в виде:

$$\vec{n}(r, \theta) = \frac{\nabla(r - r(\theta))}{\left| \nabla(r - r(\theta)) \right|_{r=r(\theta)}}. \quad (14)$$

Электрический потенциал  $\Phi(r, \theta)$  представим в виде ряда по степеням малого параметра  $e^2$ :

$$\Phi(r, \theta) \approx \Phi^{(0)}(r, \theta) + \Phi^{(1)}(r, \theta) + O(e^4), \quad (15)$$

где  $\Phi^{(0)}(r, \theta)$  – электрический потенциал нулевого порядка малости по  $e^2$ ,  $\Phi^{(1)}(r, \theta)$  – добавка к потенциалу первого порядка по  $e^2$ . Верхний индекс в (15) указывает на порядок малости.

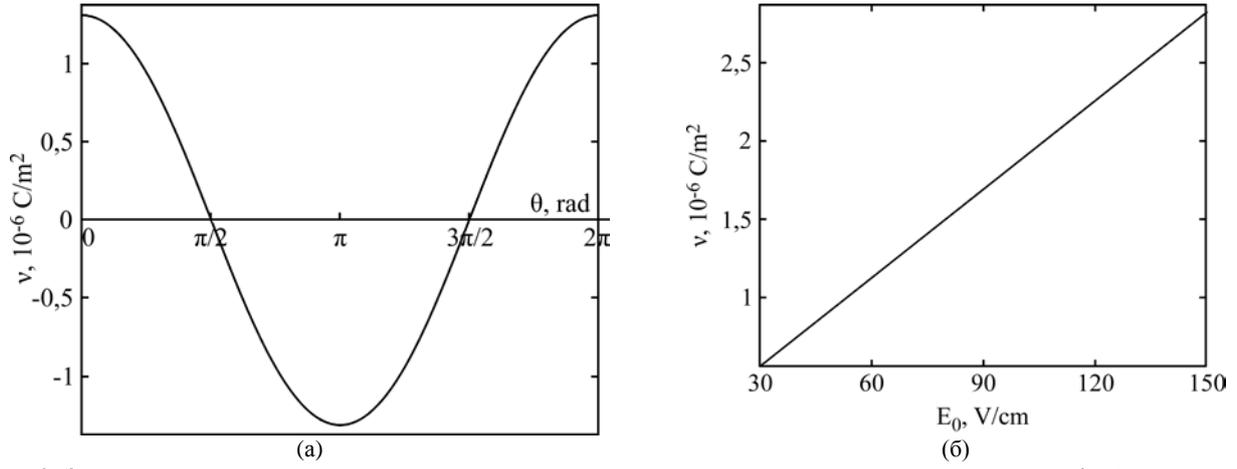


Рис. 2. Зависимость величины поверхностной плотности индуцированного заряда  $\nu$  от полярного угла  $\theta$  (а), рассчитанная при  $E_0 = 50$  В/см,  $e^2 = 0,03$ , и от напряженности внешнего электростатического поля  $E_0$  (б), рассчитанная при  $e^2 = 0,03$ .

Подставляя разложение (15) в исходную систему уравнений (10)–(13), выделим краевую задачу для нахождения  $\Phi^{(0)}(r, \theta)$ :

$$\begin{aligned} \Delta \Phi^{(0)}(r, \theta) &= 0, \\ r \rightarrow \infty: \Phi^{(0)}(r, \theta) &\rightarrow -E_0 r \cos \theta, \\ r = R: \Phi^{(0)}(r, \theta) &= \text{const}, \\ r = R: \int_0^\pi \frac{\partial \Phi^{(0)}(r, \theta)}{\partial r} R^2 \sin \theta d\theta &= 0 \end{aligned}$$

и краевую задачу для определения поправки к потенциалу  $\Phi^{(1)}(r, \theta)$ , связанному с отклонением сфероидальной формы от сферической:

$$\begin{aligned} \Delta \Phi^{(1)}(r, \theta) &= 0, \\ r \rightarrow \infty: \Phi^{(1)}(r, \theta) &\rightarrow 0, \\ r = R: \Phi^{(1)}(r, \theta) - \frac{1}{3} \text{Re}^2 \frac{\partial \Phi^{(0)}(r, \theta)}{\partial r} P_2(\mu) &= \text{const}, \\ r = R: \int_0^\pi \left( \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial r} - \frac{1}{3} e^2 \left( 2 \frac{\partial \Phi^{(0)}}{\partial r} + R \frac{\partial^2 \Phi^{(0)}}{\partial r^2} \times \right. \right. \\ &\left. \left. \times P_2(\mu) - \frac{1}{R} \frac{\partial \Phi^{(0)}}{\partial \theta} \frac{\partial P_2(\mu)}{\partial \theta} \right) \right) R^2 \sin \theta d\theta = 0. \end{aligned}$$

Последовательно решая эти задачи аналогично тому, как это было проделано в [25], получим уравнение для потенциала электрического поля, хорошо согласующееся с решением (9).

#### РАСЧЕТ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ ИНДУЦИРОВАННОГО ОДНОРОДНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ ЗАРЯДА НА ПОВЕРХНОСТИ СПЛЮСНУТОГО СФЕРОИДА В СФЕРИЧЕСКИХ КООРДИНАТАХ

В проводящем сфероиде, находящемся во внешнем электрическом поле, индуцируются поверхностные разноименные заряды. Отметим,

что вектор напряженности электрического поля  $\vec{E}_0$  направлен по оси симметрии сфероида от отрицательного заряда  $q_-$  к положительному  $q_+$ . Распределение индуцированных внешним электрическим полем зарядов по поверхности осесимметричного сплюснутого сфероида  $r(\theta)$  характеризуется поверхностной плотностью  $\nu(r, \theta)$ .

Рассчитаем  $\nu(r, \theta)$  при помощи известного выражения:

$$\begin{aligned} \nu(r, \theta) &= \frac{E_n(r, \theta)}{4\pi} \Big|_{r=r(\theta)} = \\ &= -\frac{1}{4\pi} (\vec{n}(r, \theta), \nabla \Phi(r, \theta)) \Big|_{r=r(\theta)}, \end{aligned} \quad (16)$$

где единичный вектор нормали  $\vec{n}(r, \theta)$  согласно формуле (14) имеет вид:

$$\vec{n} = \vec{e}_r + \frac{1}{3} \frac{R}{r} e^2 \frac{\partial P_2(\mu)}{\partial \theta} \vec{e}_\theta, \quad (17)$$

где  $\vec{e}_r$  и  $\vec{e}_\theta$  – радиальный и полярный орты сферической системы координат.

В итоге, подставляя в (16) выражения для электрического потенциала (9) и орта нормали (17), определим поверхностную плотность индуцированных зарядов в первом приближении по  $e^2$ :

$$\nu(\theta) = \frac{3E_0}{4\pi} \cos \theta \left( 1 + e^2 \left( \frac{3}{5} - \cos^2 \theta \right) \right). \quad (18)$$

Заметим, что в случае  $e^2 = 0$  поверхностная плотность индуцированных зарядов, распределенных на осесимметричной сфере, имеет вид  $\nu(\theta) = \frac{3E_0}{4\pi} \cos \theta$ .

Для иллюстрации на рис. 2 приведены зависимости поверхностной плотности  $\nu$  индуцированного заряда от величины полярного угла  $\theta$  и напряженности внешнего электрического поля  $E_0$ , рассчитанные по (18).

Видно, что при изменении полярной координаты  $\theta$  функция  $v$  имеет гармоническую зависимость, а с ростом напряженности поля  $E_0$  поверхностная плотность заряда  $v$  увеличивается по линейному закону.

ПЕРЕХОД ОТ ВЫРАЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ ЗАРЯДА, ПОЛУЧЕННОГО В СФЕРОИДАЛЬНЫХ КООРДИНАТАХ, К ВЫРАЖЕНИЮ, ЗАПИСАННОМУ В СФЕРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

Распределение индуцированных зарядов по поверхности проводящего сфероида во внешнем поле, направленного вдоль оси  $z$ , задается равенством [19, с. 47]:

$$v = -\frac{1}{4\pi} \frac{\partial \Phi}{\partial n} \Big|_{\xi=0} = -\frac{1}{4\pi h_1} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} = E_0 \frac{v_z}{4\pi n(z)}, \quad (19)$$

где коэффициент деполяризации определяется в виде:

$$n(z) = \left(2 - \frac{c^2}{a^2}\right) \left(1 - \frac{c^2}{a^2}\right)^{-3/2} \times \left(\sqrt{1 - \frac{c^2}{a^2}} - \operatorname{arctg} \sqrt{1 - \frac{c^2}{a^2}}\right) \quad (20)$$

и введено обозначение:

$$v_z = \frac{z}{2c^2 h_3} \Big|_{\xi=0}. \quad (21)$$

В (21) элемент длины вдоль направления нормали выражается через эллипсоидальные координаты  $\zeta, \eta$ :

$$h_3 \Big|_{\xi=0} = \frac{\sqrt{\zeta \eta}}{2a^2 c}. \quad (22)$$

В случае равенства двух полуосей сфероида  $a = b$  координата  $\zeta$  заменяется на постоянную величину  $\zeta = -a^2$ , а координата  $\eta$  находится по формуле:

$$\eta = \frac{1}{4} \left( \sqrt{\left(\rho + \sqrt{a^2 - c^2}\right)^2 + z^2} - \sqrt{\left(\rho - \sqrt{a^2 - c^2}\right)^2 + z^2} \right)^2 - a^2. \quad (23)$$

В результате подстановка в исходную формулу (19) соотношений (20)–(23) с учетом выражений для полуосей сфероида  $a, c$  (7) и координат  $z, \rho$  (8) дает поверхностную плотность индуцированных зарядов в сферической системе координат с точностью до слагаемых первого порядка малости:

$$v(r, \theta) = \frac{3E_0}{4\pi} \frac{r}{R} \cos \theta \left(1 + \frac{1}{2} e^2 \left(\frac{13}{15} - \cos^2 \theta\right)\right). \quad (24)$$

Используя уравнение (1) сплюснутого сфероида  $r(\theta)$ , найдем окончательное выражение поверхностной плотности индуцированных зарядов, совпадающее с результатом (18), полученным непосредственно в сферических координатах.

ВЕЛИЧИНА И ПОЛОЖЕНИЕ ЦЕНТРОВ ИНДУЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЗАРЯДОВ СПЛЮСНУТОГО СФЕРОИДА

Радиусы-векторы  $\vec{R}_{q_{\pm}}$ , задающие положения разноименных индуцированных зарядов, вычисляются по формулам:

$$\vec{R}_{q_{\pm}}(r, \theta) = \frac{1}{q_{\pm}(r, \theta)} \int_{S_{1,2}} \vec{r} dq_{\pm}(r, \theta) = \frac{1}{q_{\pm}(r, \theta)} \int_{S_{1,2}} r \vec{e}_r dq_{\pm}(r, \theta), \quad (25)$$

$$S_1 \equiv \left[ r = r(\theta); 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}; 0 \leq \varphi \leq 2\pi \right],$$

$$S_2 \equiv \left[ r = r(\theta); \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi; 0 \leq \varphi \leq 2\pi \right].$$

В (25) единичный радиальный вектор  $\vec{e}_r$  сферической системы координат разложим по единичным векторам декартовой системы координат:

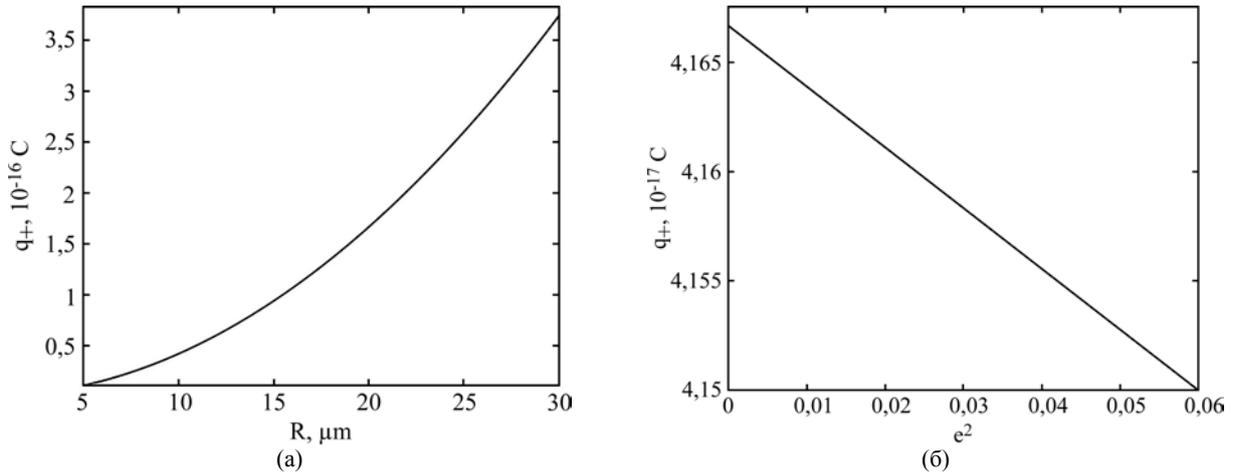
$$\vec{e}_r = \vec{e}_x \sin \theta \cos \varphi + \vec{e}_y \sin \theta \sin \varphi + \vec{e}_z \cos \theta. \quad (26)$$

Ввиду того, что осью симметрии сфероида является ось  $z$ , из (25), (26) имеем:

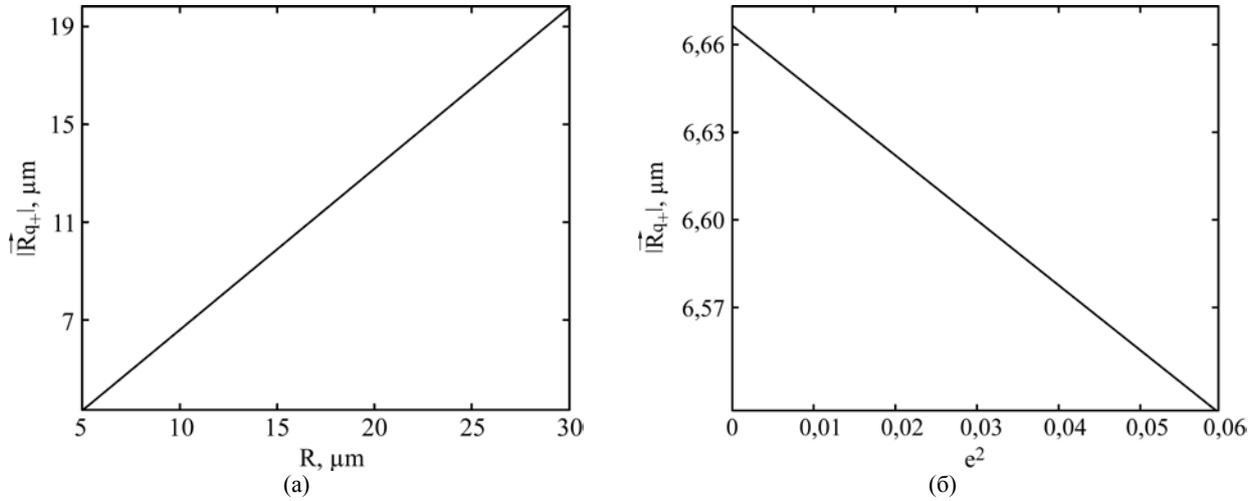
$$\vec{R}_{q_{\pm}}(r, \theta) = \frac{1}{q_{\pm}(r, \theta)} \int_{S_{1,2}} r \cos \theta \vec{e}_z dq_{\pm}(r, \theta) = \frac{1}{q_{\pm}(r, \theta)} \int_{S_{1,2}} v(r, \theta) r^3 \Big|_{r=r(\theta)} \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi. \quad (27)$$

Для отыскания величины индуцированных зарядов  $q_{\pm}$ , распределенных по противоположно заряженным половинкам сфероида  $S_1, S_2$  ( $S_1$  заряжена положительно,  $S_2$  – отрицательно), воспользуемся равенствами:

$$q_{\pm}(r, \theta) = \int_{S_{1,2}} dq_{\pm}(r, \theta) = \int_{S_{1,2}} v(r, \theta) dS_{1,2} = \int_{S_{1,2}} v(r, \theta) r^2 \Big|_{r=r(\theta)} \sin \theta d\theta d\varphi. \quad (28)$$



**Рис. 3.** Зависимость величины положительного индуцированного заряда  $q_+$  сплюснутого сфероида от радиуса  $R$  равновеликой сферы (а), рассчитанная при тех же прочих значениях физических величин, что на рис. 2а, и от квадрата эксцентриситета  $e^2$  (б), рассчитанная при тех же прочих значениях физических величин, что на рис. 3а, и при  $R = 10$  мкм.



**Рис. 4.** Зависимость величины радиуса-вектора  $|\vec{R}_{q_+}|$ , определяющего положение центра положительного индуцированного заряда сплюснутого сфероида, от радиуса  $R$  равновеликой сферы, при  $e^2 = 0,03$  (а) и от квадрата эксцентриситета  $e^2$  (б), рассчитанная при  $R = 10$  мкм.

Подставляя в (28) поверхностную плотность заряда (18), уравнение сплюснутого сфероида (1) и интегрируя получившееся выражение, найдем величины индуцированных зарядов в линейном приближении по  $e^2$ :

$$q_{\pm} = \pm \frac{3}{4} R^2 E_0 \left( 1 - \frac{1}{15} e^2 \right). \quad (29)$$

Из формулы (29) и рис. 3 несложно видеть, что с ростом радиуса сфероида  $R$  значение положительного индуцированного заряда  $q_+$  быстро увеличивается (по параболическому закону), а при увеличении квадрата эксцентриситета  $e^2$  показатель  $q_+$  немного снижается по линейному закону.

В подынтегральное выражение в (27) подставим (1), (18), проинтегрируем и учтем величину заряда (29). В результате, разлагая получившееся соотношение по степеням квадрата эксцентриситета, определим положения индуцированных зарядов на оси симметрии сплюснутого сфероида с точностью до слагаемых порядка  $\sim e^2$ :

$$\vec{R}_{q_{\pm}} = \pm \frac{2}{3} R \left( 1 - \frac{1}{3} e^2 \right) \vec{e}_z. \quad (30)$$

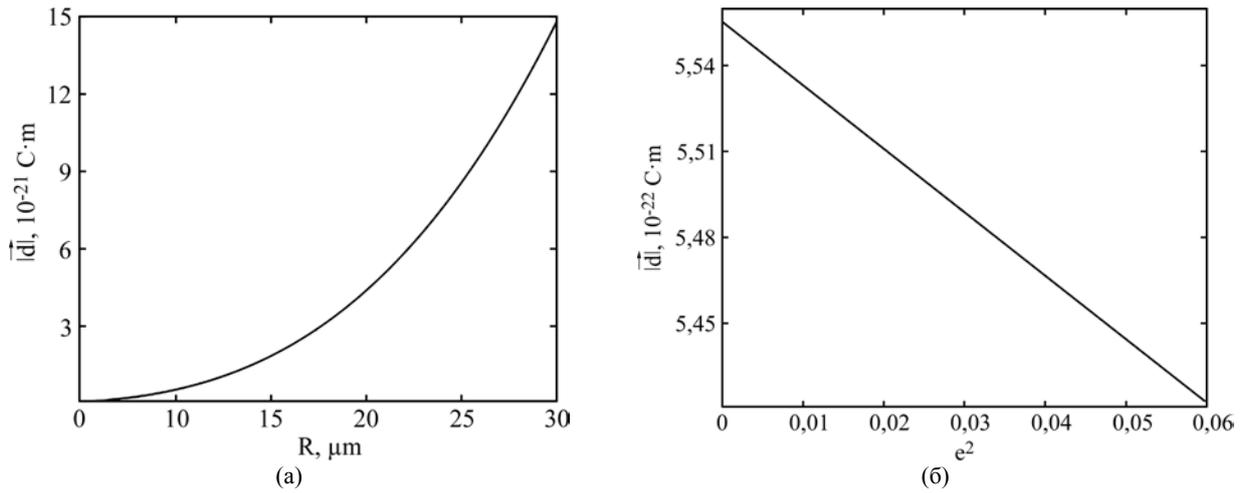
На рис. 4а показано, что увеличение радиуса сфероида  $R$  приводит к линейному возрастанию величины положения центра положительного индуцированного заряда  $|\vec{R}_{q_+}|$ . Из рис. 4б нетрудно заметить, что поведение зависимости  $|\vec{R}_{q_+}|$  от квадрата эксцентриситета  $e^2$  качественно схоже с  $q_+(e^2)$  (рис. 3б).

При использовании (29), (30) для дипольного момента (2) будет справедливо соотношение:

$$\vec{d} = R^3 E_0 \left( 1 - \frac{2}{5} e^2 \right) \vec{e}_z. \quad (31)$$

Легко убедиться, что уравнение (31) совпадает с решением, полученным по общей формуле [19, с. 44]:

$$\vec{d} = E_0 \frac{V}{4\pi n^{(z)}} \vec{e}_z,$$



**Рис. 5.** Зависимость величины дипольного момента  $|\vec{d}|$  сплюснутого сфероида от радиуса  $R$  равновеликой сферы (а), рассчитанная при тех же прочих значениях физических величин, что на рис. 2а, и от квадрата эксцентриситета  $e^2$  (б), рассчитанная при тех же прочих значениях физических величин, что на рис. 3б.

где  $V = \frac{4\pi}{3}R^3$  – объем равновеликой сферы, коэффициент деполяризации  $n^{(z)} = \frac{1}{3} + \frac{2}{15}e^2$  в приближении  $e^2 \ll 1$  [19, с. 46].

Данное обстоятельство подтверждает хорошее согласование результатов расчетов, выполненных двумя методами: путем перехода от сфероидальных координат в сферическую систему координат и прямым решением краевой электрической задачи.

Из (31) и рис. 5а следует, что при увеличении радиуса сфероида  $R$  величина дипольного момента  $|\vec{d}|$  весьма быстро растет: при возрастании  $R$  в два раза  $|\vec{d}|$  увеличивается на порядок. На рис. 5б проиллюстрирована зависимость  $|\vec{d}|$  от квадрата эксцентриситета  $e^2$ , качественно повторяющая кривые, приведенные на рис. 3б и 4б. При этом зависимости характеристик эквивалентного диполя  $q_+$ ,  $|\vec{d}|$  от напряженности электрического поля  $E_0$  видны из приведенных аналитических выражений (29), (31) и аналогичны поведению  $v(E_0)$  (рис. 2б).

Следует заметить, что полученные аналитические выражения (9), (17), (18), (29)–(31) отличаются от аналогичных решений для вытянутого вдоль поля проводящего сфероида только знаком при  $e^2$  [25].

Обратим внимание, что коэффициенты деполяризации вдоль оси симметрии сплюснутого и вытянутого сфероидов (в случае малых отклонений сферической формы от сфероидальной) имеют противоположные знаки при слагаемом  $\sim e^2$  [19, с. 46]. Ввиду этого, учитывая результаты работы [25], *a priori* в уравнении для дипольного момента (31) можно предсказать

знак стационарной деформации  $e^2$ . Однако для определения характеристик сплюснутого сфероида (а именно знака при  $e^2$ ) данный вывод может носить лишь предварительный качественный характер, требующий проведения строгих математических расчетов.

Таким образом, используемая методика решения, проведенная в рамках теории возмущений при малых деформациях сфероида, может быть успешно применена для реальных физических задач, в которых равновесная форма капли во внешнем поле, заряженной собственным или индуцированными электрическим полем зарядами, моделируется сфероидом для любой степени сплюснутости (величины квадрата эксцентриситета).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В асимптотической процедуре первого порядка малости по квадрату эксцентриситета получены аналитические выражения величины и положений индуцированных внешним электрическим полем зарядов проводящего сплюснутого сфероида, а также величина дипольного момента. Найдены аналитические выражения электрического потенциала вблизи сплюснутого сфероида и поверхностной плотности зарядов в сферических координатах в линейном приближении по квадрату эксцентриситета путем перехода от известных соотношений в сфероидальных координатах. Такие же выражения получены решением краевой электрической задачи.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет, что у нее нет конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стерлядкин, В.В., Натурные измерения колебаний капель осадков, *Изв. АН СССР. ФАО*, 1988, т. 24, № 6, с. 613.
2. Качурин, Л.Г., Кармов, М.И., Медалиев, Х.Х., Основные характеристики радиоизлучения конвективных облаков, *Изв. АН СССР. ФАО*, 1974, т. 10, № 11, с. 1163.
3. Мазин, И.П., Хргиан, А.Х., Имянитов, И.М., *Облака и облачная атмосфера. Справочник*. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 647 с.
4. Грин, Х., Лейн, В., *Аэрозоли – пыли, дымы и туманы*, Л.: Химия, 1969. 428 с.
5. Jones, D.M., The shape of raindrops, *J. Meteorology*, 1959, vol. 16, № 5, p. 504.
6. Ausman, E.L. and Brook, M., Distortion and disintegration of water drops in strong electric fields, *J. Geophys. Res.*, 1967, vol. 72, no. 24, p. 6131.
7. Pruppacher, H.R. and Piter, R.L., A semi-empirical determination of the shape of cloud and rain drop, *J. Atm. Sci.*, 1971, vol. 28, no. 1, p. 86.
8. Macky, W.A., Some investigations on the deformation and breaking of water drops in strong electric fields, *Proc. Roy. Soc. (London)*, 1931, vol. A133, no. 822, p. 565.
9. Шкадов, В.Я., Шутов, А.А., Деформация капель и пузырьков в электрическом поле, *Изв. АН СССР. МЖГ*, 2002, № 5, с. 54.
10. Torza, S., Cox, R.G. and Mason, S.G., Electrohydrodynamic deformation and burst of liquid drops, *Phil. Trans. R. Soc. (London)*, 1971, vol. A269, p. 295.
11. Александров, М.Л., Галль, Л.Н., Иванов, В.Я., Николаев, В.И., Расчет свободной поверхности проводящей жидкости, находящейся в сильном электрическом поле, *Изв. АН СССР. МЖГ*, 1983, № 6, с. 165.
12. Шутов, А.А., Форма капли в постоянном электрическом поле, *ЖТФ.*, 2002, т. 72, вып. 12, с. 15.
13. Григорьев, А.И., Неустойчивости заряженных капель в электрических полях (обзор), *ЭОМ*, 1990, № 6, с. 23.
14. Григорьев, А.И., Колбнева, Н.Ю., Ширяева, С.О., Об акустическом излучении слабо заряженных капель, осциллирующих во внешнем однородном электростатическом поле, *Изв. РАН. МЖГ*, 2022, № 5, с. 80.
15. Григорьев, А.И., Колбнева, Н.Ю., Ширяева, С.О., Капиллярные волны и дипольное электромагнитное излучение, создаваемое нелинейными осцилляциями незаряженной капли во внешнем однородном электростатическом поле, *Коллоидн. журн.*, 2022, т. 84, № 2, с. 141.
16. Natarajan, R. and Brown, R.A., Third-order resonance effects and the nonlinear stability of drops oscillations, *J. Fluid Mech.*, 1987, vol. 183, p. 95.
17. Trinch, E. and Wang, T.G., Large amplitude free and driven drop-shape oscillations: experimental observations, *J. Fluid Mech.*, 1982, vol. 122, p. 315.
18. Ширяева, С.О., Григорьев, А.И., Колбнева, Н.Ю., Асимптотический расчет интенсивности дипольного электромагнитного излучения от осциллирующей в электростатическом поле незаряженной капли, *ЭОМ*, 2017, т. 53, № 4, с. 28.
19. Ландау, Л.Д., Лифшиц, Е.М., *Электродинамика сплошных сред*. М.: Наука, 1957. 532 с.
20. Батыгин, В.В., Топтыгин, И.Н., *Сборник задач по электродинамике*. М.: Наука, 1970. 503 с.
21. Григорьев, А.И., Ширяева, С.О., Критические условия неустойчивости сплюснутой сферической сильно заряженной капли, *ЖТФ*, 1999, т. 69, вып. 7, с. 10.
22. Щекин, А.К., Варшавский, В.Б., Равновесная форма, химический потенциал и работа образования диэлектрической капли в электрическом поле диполя ядра конденсации, *Коллоидн. журн.*, 1996, т. 58, № 4, с. 564.
23. Варшалович, Д.А., Москалев, А.Н., Херсонский, В.К., *Квантовая теория углового момента*. Л.: Наука, 1975. 436 с.
24. Ландау, Л.Д., Лифшиц, Е.М., *Теоретическая физика. Т. 2. Теория поля*. М.: Наука. 1973. 504 с.
25. Колбнева, Н.Ю., Ширяева, С.О., Кузьмичев, Ю.Б., О величине поляризационных зарядов и электростатического диполя вытянутого сфероида, расположенного коллинеарно однородному электростатическому полю, *ЭОМ*, 2017, т. 53, № 1, с. 9.

## Summary

The values of the surface induced charges, the positions of their centers and the value of the equivalent dipole of an oblate conducting spheroid are determined by transition from spheroidal coordinates to a spherical system of coordinates in the analytical asymptotic calculations of the first order of smallness with respect to the squared eccentricity. The characteristics of the equivalent dipole are obtained depending on the value of the electrostatic field strength, squared eccentricity, and the radius of an equal sphere.

*Keywords:* oblate spheroidal drop, electrostatic field, electrostatic potential, centers of induced charges, dipole

# Поляриметрические характеристики полимера PEPC, легированного фотоизомеризуемым хромофорным азокрасителем SY3

Е. А. Акимова, В. Г. Абашкин\*, А. Ю. Мешалкин, К. С. Лошманский, В. С. Ботнарь

*Институт прикладной физики, Молдавский государственный университет,  
г. Кишинев, MD-2028, Молдова  
\*e-mail: [yabaskin48@yahoo.com](mailto:yabaskin48@yahoo.com)*

Поступила в редакцию 03.04.2023

После доработки 31.05.2023

Принята к публикации 07.06.2023

Синтезированы азополимеры PEPC-Solvent Yellow3 при различных их концентрациях (10–50 мас. %) в полимере с азогруппами в боковой цепи. Методом стержневого покрытия с микрометрическим контролем толщины получены однородные по толщине пленки на стеклянных подложках. Лазер с длиной волны 473 нм из спектральной области поглощения использовался для индуцирования анизотропии. Для измерения изменений поляриметрических параметров (эллиптичности и азимута, параметров Стокса) линейно поляризованного зондирующего луча гелий-неонового лазера использовали цифровой поляриметр. Пошаговое изменение направления поляризации лазера накачки производилось с помощью полуволновой пластины. Исследована фотоиндуцированная зависимость азимутального угла зондирующего луча и двулучепреломления от падающих углов поляризации луча накачки для образцов PEPC-SY3 (10 и 30 мас. %). Установлено, что фотоиндуцированное линейное двулучепреломление определяется углом между поляризациями луча накачки и зондирующего луча, которое достигает максимального значения при угле 90° между ними.

*Ключевые слова:* поляризационная голография, азополимеры, динамический и геометрический фазовый сдвиг, поляриметрия, анизотропия

УДК 681.785.552

<https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.4.33>

## ВВЕДЕНИЕ

Состояние поляризации, одного из наиболее важных параметров для описания световых волн, изучается и широко применяется в оптической микроскопии, нелинейном взаимодействии света с веществом, биологической характеристике, модуляции светового поля и т. д. [1–3]. Возможность управления поляризацией луча, а также точное и полное измерение состояний поляризации светового поля имеет большое значение как для теоретических, так и для прикладных исследований в области оптики.

Поляризационная голография, впервые описанная Ш. Д. Какичашвили еще в 1972 г. [4], позволяет регистрировать и восстанавливать не только амплитуду и фазу света, как в обычной (скалярной) голографии, но и его поляризацию. В отличие от обычных фазовых или амплитудных голограмм поляризационные голограммы действуют путем локального изменения состояния поляризации световых волн, проходящих через них. Благодаря этой особенности поляризационная или векторная голография также позволяет создавать усовершенствованные дифракционные опти-

ческие элементы, называемые оптикой четвертого поколения (4G), в которой двойное лучепреломление среды пространственно модулируется по поверхности оптического элемента. Специфическая функция этих компонентов получается путем модуляции ориентации оси анизотропии в плоскости двулучепреломления среды.

Волновой фронт света, проходящего через среду, регулируется за счет изменения длины оптического пути, которая для изотропной среды определяется как произведение показателя преломления материала и расстояния, пройденного в среде. Фазовый сдвиг, возникающий в результате изменения этого пути, называется динамическим фазовым сдвигом, так как этот параметр напрямую влияет на время распространения волны через среду. Управляемое изменение динамической фазы лежит в основе методов формирования светового поля, реализуемых традиционными оптическими компонентами. Динамические фазовые изменения, влияющие на распространение света в среде, были успешно применены для количественной фазовой визуализации и фазочувствительных измерений в целях

наблюдения за слабопоглощающими биологическими образцами [5] и измерения топографии поверхности [6].

Геометрический фазовый сдвиг, наоборот, возникает в результате распространения световой волны в анизотропном пространстве. Этот сдвиг зависит только от геометрии пути через анизотропную среду, преобразующую параметры световой волны. Источниками геометрического фазового происхождения являются молекулярная анизотропия и наноструктуры, вызывающие анизотропное рассеяние, в которых фазовый сдвиг прошедшей световой волны прямо пропорционален ориентации эффективной оптической оси, форме анизотропных рассеивающих частиц или тому и другому.

В современной оптике управление светом через геометрическую фазу также становится важным благодаря новым оптическим технологиям 4G [7, 8]. Исключительные характеристики технологии 4G открывают совершенно новые пути для развития различных направлений оптики.

Одним из перспективных материалов для реализации полностью управляемых дифракционных оптических элементов среди трех основных типов поляризационных голографических материалов являются азополимерные материалы [9]. Они отличаются от других светочувствительных полимеров наличием обратимой *trans-cis*-фотоизомеризации азокромофоров, что сопровождается молекулярной переориентацией полимерной матрицы. Это позволяет динамически изменять амплитудно-фазовые переходы.

Азосодержащие материалы обладают эффектом фотоиндуцированного двулучепреломления и дихроизма, что дает возможность использовать их в качестве динамически изменяющегося материала, управляющего распределением компонентов электрического поля пучков с поляризационными особенностями. Перед началом освещения записывающим/накачивающим лучом азополимер содержит асимметричные молекулы, которые по своей природе анизотропны. Поскольку они ориентированы хаотично и все ориентации равновероятны, вся пленка азополимера изотропна. При облучении линейно поляризованным светом азополимеры претерпевают циклы *trans-cis-trans*-изомеризации. После нескольких таких циклов избыток хромофоров выравнивается перпендикулярно поляризации лазера, что приводит к макроскопическому фотоиндуцированному двойному лучепреломлению ( $\Delta n$ ) в образце.

Фотоиндуцированное двойное лучепреломление увеличивается с повышением дозы экспозиции до достижения определенного уровня насыщения.

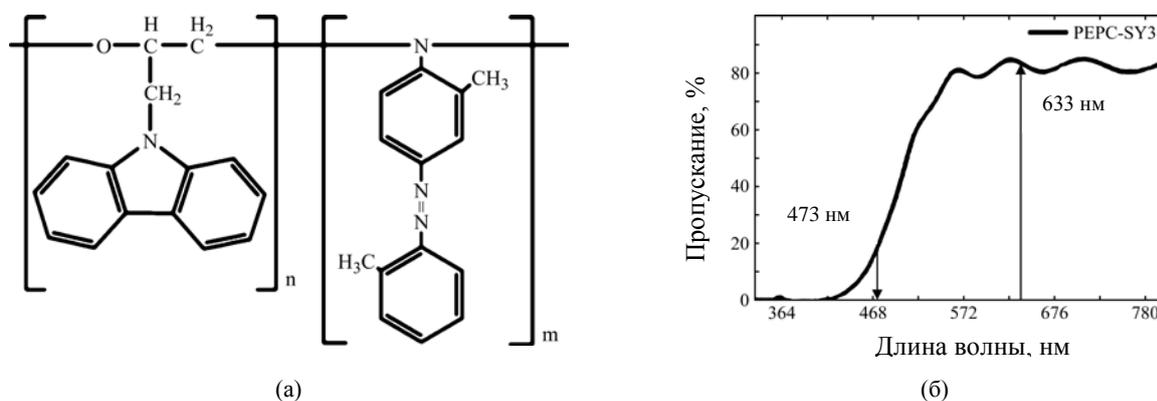
Одной из основных особенностей азополимеров является поляризационно-зависимый процесс фотоизомеризации [10]. Вероятность реакции фотоизомеризации между стержнеобразной *trans*-формой и изогнутой метастабильной *cis*-формой зависит от угла между направлением поляризации луча накачки и дипольным моментом азомолекулы. Поскольку полосы поглощения *trans*- и *cis*-конфигураций перекрываются, циклы *trans-cis-trans*-фотоизомеризации и селективного по углу поглощения фотонов непрерывно повторяются при освещении и приводят к ориентации азомолекул перпендикулярно направлению поляризации падающего света. Для создания оптических элементов 4G необходимы среды не только с двойным лучепреломлением, но и с модуляцией ориентации осей анизотропии.

Цель данной работы – исследование фотоиндуцированной модуляции ориентации осей анизотропии и фотоиндуцированного двулучепреломления в тонких пленках азополимеров путем измерения изменений поляриметрических параметров (эллиптичности и азимута, параметров Стокса) линейно поляризованного зондирующего луча. Для исследования наведенной анизотропии в тонких пленках азополимеров последние будут освещаться лазерным лучом накачки, поляризация которого будет вращаться пошагово.

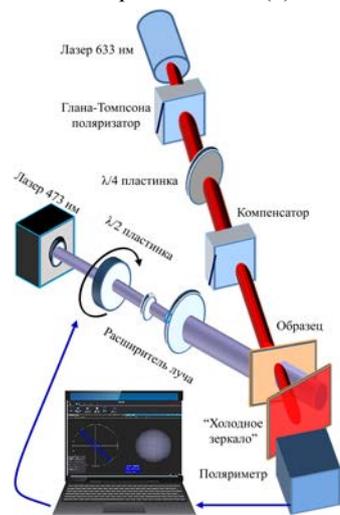
## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### *Синтез азополимеров и изготовление тонких пленок*

Светочувствительный азополимер был синтезирован полимеризацией poly-N-(2,3-ерохурролу) carbazole (PEPC) с хромофором азокрасителя Solvent Yellow 3 (SY3). SY3 (4'-amino-2,3'- dimethylazobenzene) с содержанием красителя 90% был приобретен в компании Sigma-Aldrich и использован без дополнительной очистки. Азополимеры PEPC-SY3 с различной концентрацией SY3 (10, 20, 30, 40 и 50%) получали растворением 1,0 г PEPC и соответствующих навесок SY3 (0,1; 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5 г) в толуоле. Затем раствор кипятили с помощью обратного холодильника в течение 8 часов при температуре 220 °С. Реакция присоединения азокрасителя к полимерной матрице PEPC осуществлялась через эпоксидную



**Рис. 1.** Химическая структура синтезированного PEPC-SY3 – азополимера SY3 (а); спектр пропускания синтезированной тонкой пленки азополимера PEPC-SY3 (б).



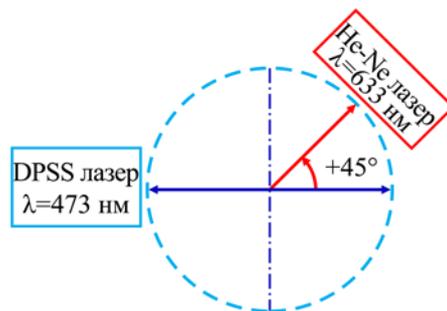
**Рис. 2.** Оптическая установка для контроля анизотропии: He-Ne лазер (633 нм, мощность 1 мВт, многомодовый), поляризатор Глана-Томпсона, волновая пластина  $\lambda/4$ , компенсатор Солей-Бабинэ SBC-VIS, «холодное» зеркало FM04, поляриметр PAX1000VIS, лазер DPSS (473 нм, мощность – 75 мВт), волновая пластина  $\lambda/2$  внутри поворотного модуля K10CR1/M, расширитель луча BE5x (все комплектующие производства Thorlabs).

группу, которая вскрывалась первичным амином азокрасителя.

По окончании реакции раствор азополимера охлаждали до комнатной температуры и пропускали через целлюлозный фильтр (номинальное содержание золы 0,015%). Эта последняя операция проводилась для разделения возможных и нежелательных неполимеризованных кристаллических частиц азокрасителя. Химическая структура PEPC-SY3 представлена на рис. 1а. Согласно спектру пропускания, представленному на рис. 1б, для длины волны 473 нм коэффициент пропускания составляет 19%, а для длины волны 633 нм – более 80%.

Изготовление тонких пленок на основе азополимера осуществлялось путем нанесения покрытия с помощью стержня, движущегося относительно подложки (с использованием изготовленного программируемого устройства для нанесения покрытия). Этот метод обеспечивает однородность, а также регулируемое расстояние между стержнем и

**Рис. 3.** Поляризационные состояния лазеров. Начальное положение однорежимного лазера DPSS составляет  $0^\circ$ , а направление вращения – по часовой стрелке, как показано; фиксированная ориентация поляризации He-Ne лазера  $+45^\circ$  для контроля на поляриметре.



стеклянной подложкой пленки (микрометрический винт с градуировкой в десятые доли нанометра), что приводит к осаждению тонких слоев в нанометрическом диапазоне толщин. Образцы всех толщин высушивали в течение 12 часов при комнатной температуре.

#### Поляриметрические измерения

Двулучепреломление определяется как разница между показателями преломления в двух взаимно ортогональных направлениях. В случае, когда двулучепреломление вызвано освещением линейно-поляризованным светом, оно выражается уравнением для линейного двулучепреломления  $\Delta n = n_{\perp} - n_{\parallel}$ , где  $n_{\perp}$  и  $n_{\parallel}$  – показатели преломления вдоль и перпендикулярно направлению поляризации записывающего луча.

Оптическая установка для измерения фотоиндуцированной анизотропии в тонких полимерных пленках показана на рис. 2. В нашей

установке использовались два лазера. Неактиничный многомодовый неполяризованный зондирующий гелий-неоновый лазерный луч с длиной волны 633 нм был поляризован кальцитовым поляризатором Глана–Томпсона (коэффициент экстинкции – 100000:1). Параксиальный гауссов зондирующий пучок проходит через этот линейный поляризатор, ориентированный под углом  $45^\circ$  к вертикальной оси, и его мощность на образце составляет менее 1 мВт. В качестве волновой пластины применена плавно регулируемая волновая пластина нулевого порядка компенсатора Солей–Бабине. Он был отрегулирован в положение волновой пластины  $\lambda/2$  с ориентацией  $45^\circ \pm 0,05^\circ$  и эллиптичностью  $\pm 0,05^\circ$ . Следует отметить, что компенсатор поддерживает однородное замедление по апертуре луча при заданной настройке. Из-за того, что длина волны находится вне полосы поглощения азополимера (см. рис. 2), и малой мощности зондирующего луча он не создает и не влияет на фотоиндуцированную анизотропию в образце. Этот луч нормально падает на поверхность образца и входную апертуру поляриметра.

Важнейшим параметром поляриметрических измерений является стабильность зондирующего луча, величину которой необходимо контролировать. Поляриметр в режиме осциллографа отображает данные в виде графиков для выбранного набора параметров поляризации, которые постоянно обновляются на экране по мере получения значений. Долговременные оптические параметры, которые были в наших экспериментах, записывались и контролировались:

- нормализованные параметры Стокса:  $S_1, S_2, S_3$ ;
- параметры эллипса поляризации: азимут и эллиптичность;
- степень поляризации;
- общая интенсивность:  $S_0$ .

Зондирующий луч проходит через освещенное лазером накачки пятно на образце. Параметры выходной эллиптичности  $\chi$  и азимута  $\psi$  выходного зондирующего луча регистрируются в режиме реального времени с помощью системы поляризационного анализа PAX1000VIS (Thorlabs), называемой «поляриметр». Зная состояние поляризации падающего света и измеряя параметры Стокса, можно определить фотоиндуцированное двулучепреломление.

Одномодовый лазер DPSS с лучом накачки на длине волны 473 нм использовался для индуцирования анизотропии в азополимерных пленках. Волновая пластина  $\lambda/2$  устанавливалась

внутри отверстия в поворотном модуле, что приводило к пошаговому вращению состояния поляризации пучка накачки. Диаметр луча был расширен в 5 раз на поверхности образца с помощью фиксированного расширителя пучка. За счет увеличения диаметра пучка достигается более равномерное распределение интенсивностей в апертуре. Это важно для получения однородных свойств образца под лазерным пятном во время измерений. Лучи накачки и зондирования пересекаются в перпендикулярной плоскости и под углом  $13^\circ$  на тонкой пленке. Поляриметр всегда предварительно настраивали, так как регулировка имеет решающее значение для точных поляриметрических измерений. Мы отрегулировали положение поляриметра относительно входа зондирующего луча, а именно: центрирование входной апертуры и нормальное падение зондирующего луча. Опция программного обеспечения «Индикатор считывания выравнивания» очень помогает выполнить этот шаг настройки для устранения артефактов.

Дихроичное зеркало для длинноволновой области спектра пропускания использовалось для предотвращения влияния на показания поляриметра прямого и рассеянного света лазерного луча накачки. Этот компонент («холодное» зеркало FM04) устанавливался под углом падения  $45^\circ$  с лучом He-Ne лазера перед поляриметром. Оптическое пропускание зеркалом длины волны 633 нм составляет более 85%, а отражение – более 90% для длины волны 473 нм.

Измерения проводились при повороте плоскости поляризации луча лазера накачки от  $0$  до  $180^\circ$  (рис. 3) с шагом  $10^\circ$  и облучении материала излучением с длиной волны 473 нм после времени экспозиции 6 мин, определенного в нашей работе [11]. Таким образом, для каждого образца регистрировались временные и угловые значения азимута, эллиптичности и двулучепреломления в зависимости от угла плоскости поляризации лазера накачки. Данные с поляриметра сохраняются и обрабатываются специализированным программным обеспечением. Величина интенсивности света на образце составляет примерно  $450 \text{ мВт/см}^2$ .

#### *Спектрофотометрическое измерение*

Спектры пропускания UV-VIS регистрировали на двухлучевом спектрофотометре Specord UV/Vis при комнатной температуре в спектральном диапазоне длин волн от 300 до 800 нм. В двухлучевом

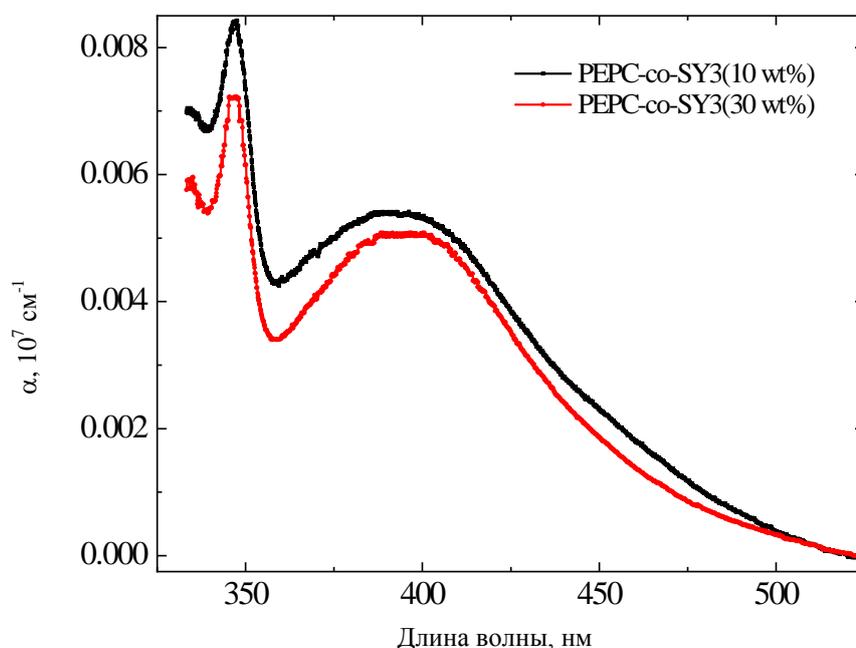


Рис. 4. Спектральное распределение коэффициента поглощения азополимеров PEPC-SY3 с 10 и 30 мас.% азокрасителя SY3.

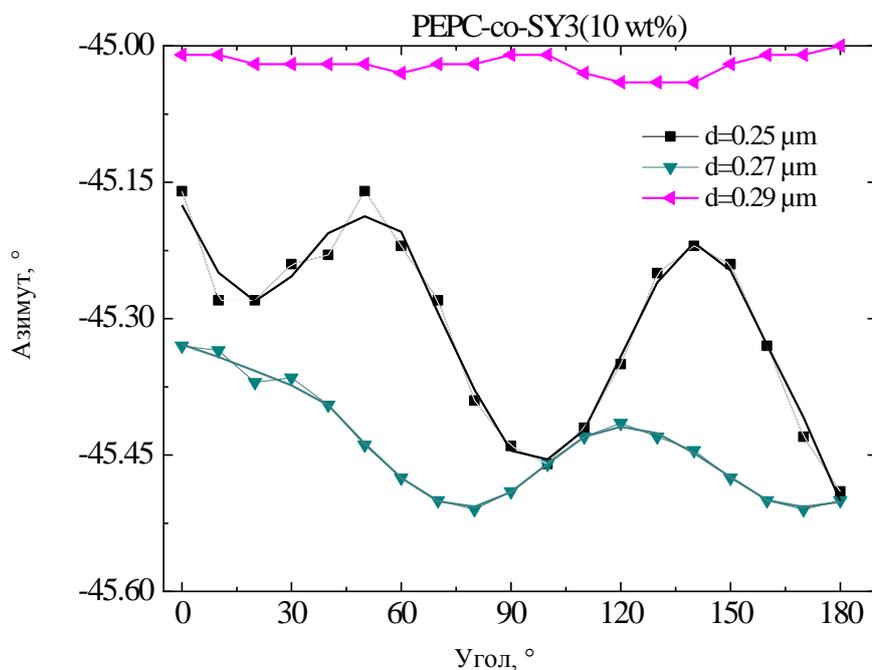


Рис. 5. Зависимость азимутального угла зондирующего луча от угла падающей поляризации луча накачки для образцов PEPC-SY3 (10 мас. %).

спектрофотометре один луч падает на образец, нанесенный на исследуемую стеклянную подложку, а второй – только на эталонную стеклянную подложку. Спектрометр был значительно модифицирован софтом, имеющим графический интерфейс пользователя и драйвер (Visual Basic). Графический интерфейс отображает спектры пропускания и отражения, фон и линию 100% в одном окне. Спектры пропускания  $T(\lambda)$  и отражения  $R(\lambda)$ , полученные непосредственно с прибора, затем пересчитывались в спектры коэффициента поглощения  $\alpha(\lambda)$ .

Очень важно знать толщину пленки  $d$ , чтобы правильно сравнивать коэффициенты поглощения пленок. Толщину полученных пленок определяли с помощью модифицированного цифрового интерференционного микроскопа МИИ-4 в режиме отражения с увеличением 530x и разрешением по глубине 10 нм [10]. Смещение интерференционных полос света, отраженного от области осажденного азополимера и области стеклянной подложки, регистрировалось и затем обрабатывалось. Для расчета толщины образца по интерферограмме применялась разработанная программа Optic Meter [12].

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Спектр коэффициента поглощения ( $\alpha(\lambda)$ ) азополимеров РЕРС-SY3 с различными концентрациями азокрасителя представлен на рис. 4. Спектр коэффициента поглощения получен из спектров пропускания и отражения по закону Бугера–Ламберта:

$$\alpha(\lambda) = -\frac{1}{d} \ln(I_T - I_R) / I_0, \text{ где } I_T, I_R, I_0 -$$

интенсивности пропускания, отражения и падения света и  $d$  – толщина пленки. Спектр поглощения для обеих концентраций азокрасителей (10 и 30 мас.%) имеет два максимума поглощения. Один максимум находится около 345 нм, что связано с электронным переходом *trans*-изомеров. Максимум около 390 нм можно отнести к *cis*-переходу азополимеров. Отметим, что концентрация азокрасителя не сильно влияет на спектр поглощения в диапазоне длин волн 500–650 нм. По этому спектру мы определили, что интенсивность света с длиной волны 473 нм затухает в  $e$  раз на толщине пленки примерно 1 мкм, а свет с длиной волны 633 нм не поглощается исследуемым азополимером. Таким образом, тонкие пленки толщиной от 250 до 750 нм, использованные в наших экспериментах, поглощают свет накачки практически равномерно по всей толщине. Интересно, что поглощение на длине волны 473 нм у образцов с 30 мас.% азокрасителя ниже на 30%, чем у образцов с 10 мас.%. Возможным объяснением этого может быть увеличение рассеяния с увеличением количества азокрасителя.

С помощью оптической установки, описанной в разделе 2.2, были определены зависимости выходного азимутального угла поворота ( $\psi$ ) зондирующего луча от угла падающей поляризации (относительно горизонта) луча накачки для азополимерных тонких пленок РЕРС-SY3 с содержанием SY3 от 10 до 30% и различной толщиной пленки в диапазоне 250–800 нм. Все точки данных получены при насыщении в конце воздействия луча накачки, которое составляет 6 мин. Было подтверждено, что фотоиндуцированные изменения достигают насыщения за это время экспозиции. По истечении 6 мин производились измерения. Результаты этого эксперимента для образцов с 10 мас. % SY3 представлены на рис. 5. Из него видно, что азимут зондирующего луча очень слабо зависит от угла поляризации луча накачки для более толстых пленок ( $d = 0,29$  мкм,  $\psi \sim 0,04^\circ$  и  $d = 0,29$  мкм,  $\psi \sim 0,135^\circ$ ). Для более тонких образцов ( $d = 0,25$  мкм,  $\psi \sim 0,34^\circ$ ,

$d = 0,27$  мкм,  $\psi \sim 0,2^\circ$ ) азимут следует повороту угла поляризации луча накачки и достигает своего максимального значения при угле примерно  $0^\circ$  между азимутом и углом поляризации луча накачки. При этом минимальное значение азимутального угла при угле между ними равно около  $45^\circ$ . Хотя видно, что азимутальное вращение для этих образцов невелико. Независимость положения азимута от угла поляризации линейно поляризованного луча накачки свидетельствует в пользу того, что фотоиндуцированные изменения показателя преломления лежат только в поперечной плоскости образца и эти изменения не имеют продольной составляющей. Это согласуется с известным фактом, что линейно поляризованный пучок возбуждает линейное фотоиндуцированное двулучепреломление.

Для проверки поведения фотоиндуцированного двулучепреломления были измерены зависимости фотоиндуцированного двулучепреломления от угла поляризации пучка накачки. Фотоиндуцированное двулучепреломление ( $\Delta n$ ) мы рассчитывали по следующей формуле из [13]:

$$\Delta n = \frac{\lambda}{2\pi d} \arctan\left(\frac{S_3}{S_2}\right),$$

где  $\lambda$  – длина волны зондирующего лазера;  $d$  – толщина пленки;  $S_2$  и  $S_3$  – компоненты вектора Стокса ( $S_0, S_1, S_2, S_3$ ).

Зависимость наведенного в образце двулучепреломления после освещения лучом лазера накачки от угла ориентации поляризации луча накачки показана на рис. 6. Из него видно, что фотоиндуцированное двулучепреломление колеблется от  $\Delta n = 0$  до  $\Delta n = \pm 0,017$  в зависимости от угла между направлениями поляризации зондирующего и накачивающего пучков с одинаковой амплитудой при комнатной температуре. Обращает внимание тот факт, что максимальные отклонения имеют место при том же угле между этими поляризациями, что и максимальные отклонения азимутального положения  $\sim 0^\circ + 90^\circ$  и  $\sim 45^\circ + 90^\circ$ .

Как видно из рис. 6, влияние толщины пленки на отклонения  $\Delta n$  пренебрежимо мало в диапазоне толщин 0,25–0,30 мкм. Угловые положения азимутов максимума и минимума достаточно хорошо совпадают с толщинами полученных образцов полимера.

Для образцов составов РЕРС-SY3 (30 мас. %) кривые поведения на рис. 7 по форме колебаний угла азимута аналогичны поведению образцов РЕРС-SY3 (10 мас. %).

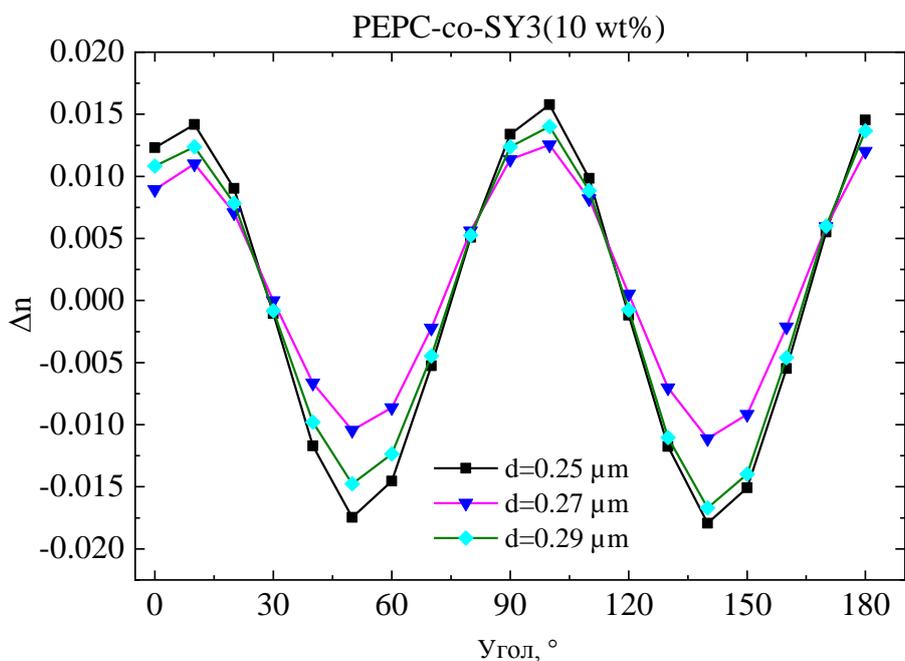


Рис. 6. Зависимость двулучепреломления образца по зондирующему лучу от угла падающей поляризации луча накачки для образцов PEPC-SY3 (10 мас. %).

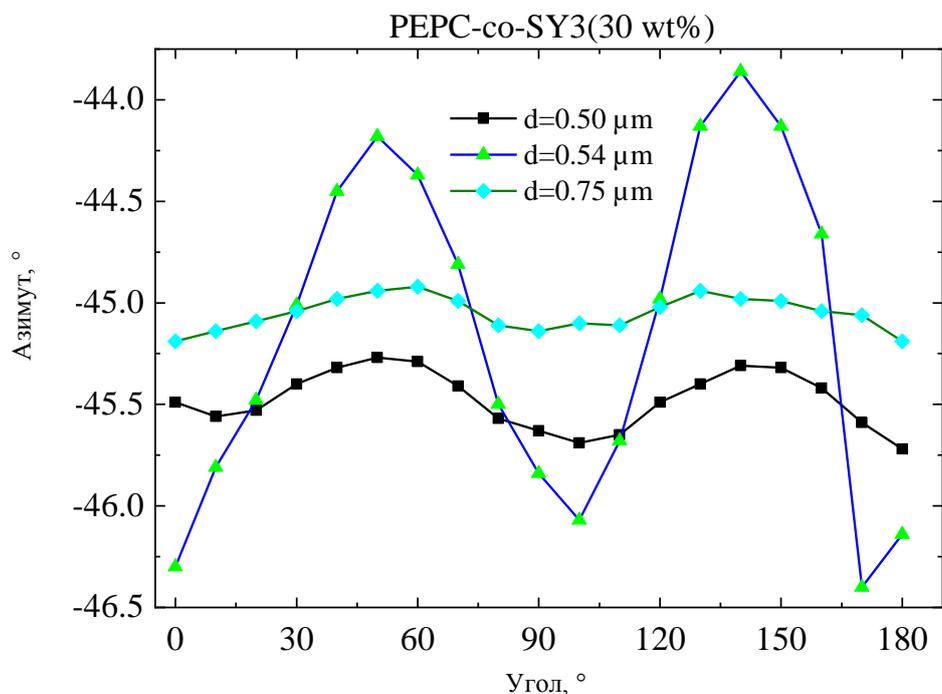


Рис. 7. Зависимость индуцированного азимута зондирующего луча от угла падающей поляризации луча накачки для образцов PEPC-SY3 (30 мас. %).

Через 6 мин облучения при достижении насыщения (первые точки) значения  $\Delta n$  лежат в диапазоне  $0,008 \div 0,0075$ . Эти значения очень близки к данным, полученным для образцов состава PEPC-SY3 (10 мас. %), а именно  $\Delta n = 0,008 \div 0,0125$  (см. рис. 6). Видно, что для более толстых пленок изменения азимута максимальны для обоих полимерных составов.

Известно, что азополимеры обладают значительным линейным фотоиндуцированным двулучепреломлением, вызванным линейно

поляризованным световым излучением за счет *trans-cis-trans*-изомеризации и последующей ориентации хромофоров внутри азополимерной пленки. Позднее было обнаружено, что в азополимерах также индуцируется круговое двулучепреломление, но при освещении эллиптически поляризованным светом, пропорциональное повороту азимута света, проходящего через оптически активную среду [14]. Этот эффект объясняет образование хиральных групп в химической структуре аморфных азополимеров.

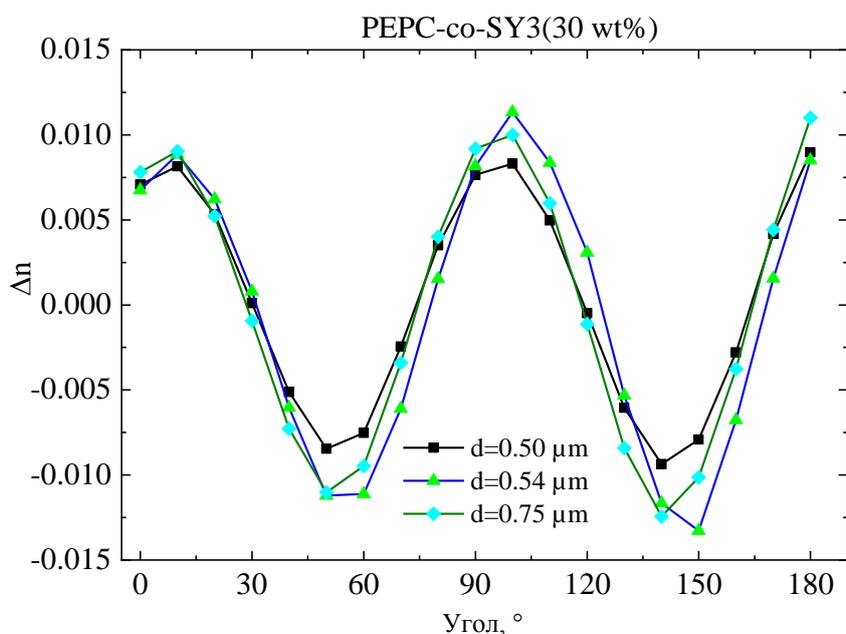


Рис. 8. Зависимость двулучепреломления образца зондирующего луча от угла падающей поляризации луча накачки для образцов PEPC-SY3 (30 мас. %).

Однако в работе [15] было показано, что при прохождении параксиального гауссова пучка через карбазолсодержащий азополимер вектор Пойнтинга (рассеивающая сила) состоит в основном из продольной составляющей, распределение которой полностью повторяет интенсивность пучка. Почти вся световая энергия в этом случае направлена вдоль оптической оси. Различия между лучом с круговой поляризацией и лучом с линейной поляризацией в этой модели незначительны. В работе [16] установлено, что характер деформации, индуцированной продольной составляющей, сильно зависит от толщины пленки полимера, а сила оптического градиента, действующая не на боковую цепь азокрасителя, а на основную цепь полимера, способствует полимерному движению. Можно предположить, что *trans-cis-trans*-изомеризация с последующей ориентацией молекул азополимера перпендикулярно поляризации падающего света является причиной «плоскостного» линейного фотоиндуцированного двойного лучепреломления. Продольная составляющая падающего светового поля влияет на полимерную матрицу карбазола, что проявляется в виде азимутального вращения [17].

Следует отметить, что поведение кривых  $\Delta n$  для образцов PEPC-co-SY3 (10 мас. %) и PEPC-co-SY3 (30 мас. %) сходно как по форме, так и по величине.

## ВЫВОДЫ

Обобщая полученный результат, можно заключить, что анизотропия, фотоиндуци-

рованная в PEPC-co-SY3 при освещении линейно поляризованным актиничным светом, имеет некоторые особенности. Наблюдаемые азимутальные повороты зондирующего луча мало зависят от угла между линейной поляризацией накачивающего луча и линейной поляризацией зондирующего луча, в то время как он существенно отличается для разных толщин азополимерных пленок. Поведение фотоиндуцированного линейного двулучепреломления PEPC-co-SY3 определяется углом между линейной поляризацией луча накачки и линейной поляризацией зондирующего луча, достигающего максимального значения при угле  $90^\circ$  между линейными поляризациями луча накачки и зондирующим лучом.

Нами показано, что геометрическая фаза анизотропных карбазолсодержащих азополимеров, в отличие от динамической, может быть измерена поляриметрическим методом без привлечения методов интерферометрии. Это возможно потому, что геометрическая фаза не определяется разностью оптических путей, а является результатом анизотропии внутри пленки за счет фотоиндуцированного изменения ее пространственной структуры. В случае азополимеров можно предположить, что геометрическая фаза образована не только азокрасителем, но и полимерной матрицей.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа частично поддержана проектом The National Agency for Research and Development of Moldova (ANCD20.80009.5007.03) и International Project of Program ERA.NetRusPlus (ANCD21.80013.5007.1M).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

- Ippolito, S., Polarized high-resolution imaging, *Nat. Photonics*, 2008, vol. 2, no. 5, p. 273.
- Garcia, M., Edmiston, C., Marinov, R., Vail, A., et al., Bio-inspired color-polarization imager for real-time in situ imaging, *Optica*, 2017, vol. 4, no. 10, p. 1263.
- Li, P., Zhang, Y., Liu, S., Ma, C., et al., Generation of perfect vectorial vortex beams, *Opt. Lett.*, 2016, vol. 41, no. 10, p. 2205.
- Kakichashvili, Sh.D., On polarization recording of holograms, *Opt. Spectrosc.*, 1972, no. 33, p. 324.
- Park, Y., Depeursinge, C. and Popescu, G., Quantitative phase imaging in biomedicine, *Nat. Photonics*, 2018, no. 12, p. 578.
- De Groot, P., Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography, *Adv. Opt. Photonics*, 2015, no. 7, p. 1.
- Escuti, M.J., Kim, J. and Kudenov, M.W., Geometric-phase holograms, *Opt. Photonics News*, 2016, no. 27, p. 22.
- Lee, Y.-H., Recent progress in Pancharatnam–Berry phase optical elements and the applications for virtual/augmented realities, *Opt. Data Process Storage*, 2017, no. 3, p. 79.
- Zhai, Y., Cao, L., Liu, Y. and Tan, X., A Review of polarization-sensitive materials for polarization holography, *Materials* (Basel), 2020, vol. 13, no. 23, p. 5562.
- Bagatur, S., Schlesag, M. and Fuhrmann-Lieker, T., Polarization dependent photoinduced supramolecular chirality in high-performance azo materials, *Molecules*, 2021, no. 26, no. 10, p. 2842.
- Losmanschii, C., Achimova, E., Abashkin, V., Botnari, V., et al., Photoinduced anisotropy in azopolymer studied by spectroscopic and polarimetric parameters, Proc. ICNBME-2021 “5th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering”, I. Tiginyanu et al. (eds.). Springer Nature Switzerland AG2022, 2022, vol. 87, p. 314.
- Мешалкин, А.Ю., Андриеш, И.С., Абашкин, В.Г., Присакар, А.М. и др., Цифровой метод измерения толщины нанометровых пленок на базе микроинтерферометра МИИ-4, *ЭОМ*, 2012, т. 48, № 6, с. 114.
- Nikolova, L. and Ramanujam, P.S., *Polarization Holography*, Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- Meshalkin, A., Robu, S., Achimova, E., Abashkin, V., et al., Direct photoinduced surface relief formation in carbazole-based azopolymer using polarization holographic recording, *J. Optoelectron. Adv. Mat.*, 2016, vol. 18, nos. 9–10, p. 763.
- Azzam, R.M.A. and Bashara, N.M., *Ellipsometry and Polarized Light*, North-Holland, Amsterdam, 1977.
- Khonina, S.N., Ustinov, A.V., Volotovskiy, S.G., Ivliev, N.A., et al., Influence of optical forces induced by paraxial vortex Gaussian beams on the formation of a microrelief on carbazole-containing azopolymer films, *Appl. Optics*, 2020, vol. 59, no. 29, p. 9185.
- Ishitobi, H., Nakamura, I., Kobayashi, T., Hayazawa, N., et al., Nanomovement of azo polymers induced by longitudinal fields, *ACS Photonics*, 2014, no. 1, p. 190.

## Summary

Photo-induced anisotropy measurements were carried out in thin films of azopolymers PEPC with Solvent Yellow 3, with the concentrations of 10 wt% and 30 wt% of polymers with azo groups in their side-chain. The experimental dependences of the azimuths of the probe beam at the pump beam angles for samples were studied. The photoinduced dependence of the sample birefringence of the probe beam at the incident polarization angle of the pump beam was carried out by the polarimetric method for the studied samples. The geometric phase of anisotropic carbazole-containing azopolymers, in contrast to the dynamic phase, can be measured by the proposed polarimetric method without involving interferometry methods. This is possible because the geometric phase is not controlled by the difference in optical paths but is the result of a change of polarization inside the films due to photoinduced changes in its spatial structure.

**Keywords:** polarization holography, azopolymers, dynamic and geometric phases shift, polarimetry

# Электроактивация – передовой метод обработки молочной сыворотки со средним содержанием белка

И. В. Паладий<sup>а,\*,\*\*</sup>, Е. Г. Врабие<sup>а</sup>, М. К. Болога<sup>а</sup>, В. Г. Врабие<sup>б</sup>,  
Т. Г. Степурина<sup>а</sup>, А. А. Поликарпов<sup>а</sup>, К. Г. Спринчан<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт прикладной физики, МолдГУ, г. Кишинев, MD-2028, Молдова,

\*e-mail: [irina.paladii@ifa.usm.md](mailto:irina.paladii@ifa.usm.md), \*\*e-mail: [paladii-irina@mail.ru](mailto:paladii-irina@mail.ru)

<sup>б</sup>Институт физиологии и санокреатологии, МолдГУ, г. Кишинев, MD-2028, Молдова

Поступила в редакцию 19.04.2023

После доработки 30.06.2023

Принята к публикации 05.07.2023

Представлены результаты исследований электроактивации молочной сыворотки (МС) – передового метода безотходной переработки вторичных молочных продуктов со средним содержанием белка для выделения белков сыворотки и получения белково-минерального концентрата (БМК). Переработку МС проводили в электролизерах с различным соотношением объема обрабатываемой молочной сыворотки к поверхности электрода/катода с разными конструктивно-геометрическими параметрами, влияющими на удельные энергозатраты на единицу объема. Основная цель – максимальное извлечение сывороточных белков в БМК при низких энергозатратах. Проанализирована степень выделения сывороточного белка в зависимости от значений pH, окислительно-восстановительного потенциала и температуры при электроактивации, что дает возможность оптимизировать технические параметры электролизеров для молочной сыворотки со средним содержанием белка.

*Ключевые слова:* электроактивация, электролизеры, вторичные молочные продукты, сывороточные белки, конструктивно-геометрические параметры, молочная сыворотка

УДК 637.344.2(637.024), 637.344.8

<https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.4.42>

## ВВЕДЕНИЕ

Первичная переработка молока позволяет производить различные виды сыров и творожных продуктов, в результате чего получают вторичные молочные продукты – молочная сыворотка (МС), пахта, обезжиренное молоко, казеинат, ультрафильтрат и др. с различным содержанием сухих веществ и ценным пищевым составом [1–3]. Мировое количество получаемой сыворотки оценивается в  $180\text{--}190 \times 10^6$  т/год, из которых перерабатывается около 50% [4–6].

Молочная промышленность ежегодно производит огромное количество МС, переработка которой создает глобальную экологическую проблему [7]. Разработка новых технологий безотходной переработки вторичных молочных продуктов, таких как МС, становится все более мотивированной, актуальной и перспективной [5, 8].

Сухой остаток МС (7–8%) составляет 50–70% от массы исходного молока и включает более 200 компонентов [9]. В сыворотку переходят практически вся лактоза и наиболее ценные белковые фракции (20% от общего содержания белка в молоке), которые не сохраняются в молочных продуктах при первичной переработке

молока, а также ряд макро- и микроэлементов, некоторые липиды и витамины [10–12].

Сывороточные белки МС являются натуральными белками наилучшего качества, они содержат четыре основные белковые фракции:  $\beta$ -лактоглобулин ( $\beta$ -Lg), составляющий 50% содержания белка в сыворотке, форма А и В;  $\alpha$ -лактальбумин ( $\alpha$ -La) представляет собой 25% сывороточных белков МС; иммуноглобулины (Ig); бычий сывороточный альбумин (BSA), который составляет 10–15% от содержания сывороточных белков МС [12–14]. Лактоферрин (LF), лактопероксидаза (LP) и протеазо-пептоны (PP) являются минорными белками МС (табл. 1) [15, 16].

Сывороточные белки имеют компактную глобулярную структуру, что объясняет их растворимость, в отличие от казеинов, которые существуют в виде мицеллярной суспензии с относительно однородным распределением неполярных, полярных и заряженных аминокислотных групп. Аминокислотные профили сывороточных белков отличаются от профилей казеина, эти белки дефосфорилированы, легко денатурируются под действием температуры, нечувствительны к действию ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и склонны к образованию внутримолекулярных связей через

**Таблица 1.** Химические и физико-химические свойства сывороточных белков МС [2, 20, 21]

	$\beta$ -Lg	$\alpha$ -La	BSA	Ig	PP	GMP	LF	LP
Содержание, %	30,0–55,0	20,0–25,0	5,0–10,0	10,0	12,0	10,0–15,0	1,0–2,0	0,5
Молекулярная масса, kDa	18,4	14,2	66,5	$\geq 145$	4,0–22,0	6,8	78,0	89,0
Количество аминокислот	162	123	582	–	135	–	700	612
Температура денатурации, °C	78	62	64	72	Стабильные при нагревании до 95 °C в течение 30 мин	Термически стабильные	Термостабильны при pH 4,0 и 90 °C в течение 5 мин	Выдерживает HTST*, инактивируется при 78 °C в течение 15 с
Изоэлектрическая точка, (ИЭТ)	5,2/5,4	4,5–4,8	4,7–4,9/5,5	5,5–8,3	3,7	4,3–4,6	7,0–9,0	9,5

\* HTST – высокотемпературная кратковременная пастеризация.

**Таблица 2.** Сравнительный состав разных видов МС [21]

	Содержание воды, %	Лактоза, %	Белки, %	Липиды, %	Зола, %	pH
Сладкая МС	94–98	69–76	11–14	0,5–2	6–9	6–6,8
Кислая МС	93–97	65–69	7–9	–	9–12	4,2–5
Казеиновая МС	93–98	64–68	9–11	–	10–13	4,0–4,8

дисульфидные мостики между сульфгидрильными группами цистеина [17–19].

Переработка МС часто приводит к неэффективным методам утилизации, таким как сброс в водоемы и на поля или простая переработка в малоценные порошкообразные товары, которые продолжают ограничиваться экологическими нормами. Безотходное использование сухого состава МС с использованием всех компонентов является приоритетом в разработке новых процессов и технологий на международном уровне [22–25]. Хотя сыворотка является богатым источником белков с различными питательными свойствами для пищевых, биологических и функциональных целей, коммерческое использование этих белков не получило широкого распространения из-за ограниченной базы применения, отсутствия жизнеспособных промышленных технологий фракционирования белков и непостоянства качества продукта. Эти недостатки устраняются за счет разработки новых технологий переработки МС, новых продуктов, включающих фракции сывороточного белка МС, и использования их в различных пищевых рецептурах [25, 26]. Состав МС варьирует в зависимости от способа первичной обработки молока, технологии переработки и используемого оборудования.

При получении различных видов сыров и творожных продуктов содержание казеина во

многочисленно предопределяет вид вторичного молочного продукта (кислая или сладкая МС). Вода в сыворотке составляет 93–95% и по формам связей находится в свободном физико-химическом или химическом состоянии. Содержание небелковых азотистых веществ колеблется в зависимости от способа производства первичных молочных продуктов. В незначительных количествах содержатся арабиноза, лактулоза, амилоид – продукты первичной молочной продукции [27–29]. Основные отличия заключаются в содержании кальция, фосфатов, молочной кислоты и лактата, которых в кислой МС больше, чем в сладкой МС (табл. 2).

Благодаря биологическим и питательным свойствам сывороточные белки представляют повышенный интерес для использования как в пищевой, так и в фармацевтической промышленности. Высокий потенциал МС как ценного сырья для получения из нее пищевых и биологически активных веществ с добавленной стоимостью порождает новые направления в разработке технологий повторного использования побочных продуктов молочной промышленности [27, 30, 31].

Безотходная переработка и валоризация содержания сывороточных белков представляет собой сложную задачу с технической и технологической точек зрения. Переработка сыворотки разнообразна и включает разные

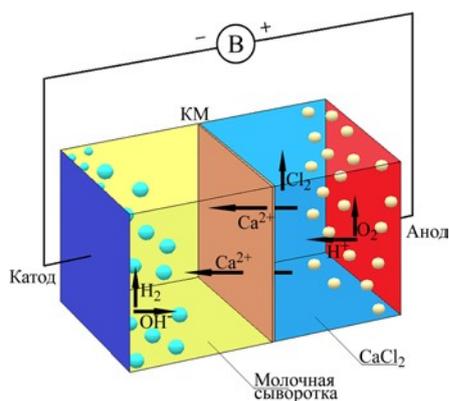


Рис. 1. Принципиальная схема электролизеров EDP-2 и EDP-4.

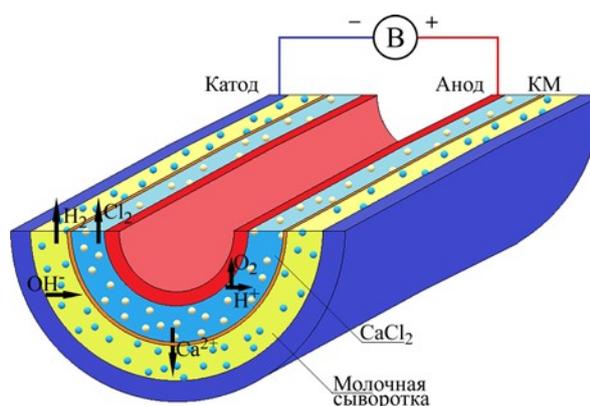


Рис. 2. Принципиальная схема электролизеров EDC-3 и EDC-pilot.

Таблица 3. Основные конструктивные характеристики электролизеров

Конструктивные характеристики	EDP-2	EDP-4	EDC-3	EDC-pilot
Расстояние между катодом и анодом С-А, $l_1$ , мм	18	18	30	20
Расстояние между катодом и мембраной С-М, $l_2$ , мм	10	10	15	10
Расстояние между мембраной и анодом М-А, $l_3$ , мм	8	8	15	10
Соотношение $V/S$ , мл/см <sup>2</sup>	1,4	1,0	2	0,75

методы, что позволяет извлечь все полезные фракции. Основными технологическими процессами и методами переработки являются: термические, химические, физико-химические, биотехнологические, электрофизические [32–34].

Электроактивация считается перспективным методом и предусматривает исключение прямого использования химических реагентов, снижение выбросов, что приводит к повышению качества конечных продуктов, сокращению продолжительности обработки, повышению эффективности и упрощению технологических процессов [35–37]. Она используется и при обработке высокоэффективных и экологически чистых технологий получения различных биологических сред [38].

Комплексная технология электроактивации МС заключается в извлечении сывороточных белков и получении белково-минеральных концентратов (БМК) с высокой биологической ценностью, она исключает прямое использование химических реагентов и представляет собой эффективный процесс, обеспечивающий безотходную обработку.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Электроактивация МС, полученной после изготовления творога с содержанием жира 5% (поставляется АО JLC, Кишинев, РМ) и позже определяемой как МС со средним содержанием белка (ССБ), накладывает определенные ограничения на технические требования к обеспечению управления технологическим

процессом и его контроля, которые приведены на схеме диафрагменного электролизера (рис. 1, 2) [39].

Результаты исследований по установлению факторов, влияющих на электроактивацию молочной сыворотки, понимание физико-химических и биохимических процессов, происходящих при прохождении электрического тока через дисперсную среду со сложной биологической структурой, такую как сыворотка, позволили разработать принципы и конструктивные схемы ряда электролизеров различной геометрической конфигурации, адаптированных к особенностям и технологическим требованиям переработки вторичных молочных продуктов с выделением БМК и одновременной изомеризацией лактозы в лактулозу. Рассмотрены различные типы электролизеров (условно называемые EDP-2, EDP-4, EDC-3, EDC-pilot) с определенными геометрическими параметрами, позволяющими осуществлять безотходную переработку сыворотки (табл. 3). Электролизеры EDP-2 и EDP-4 в виде параллелепипеда (рис. 1) имеют одинаковое расстояние между электродами и электродами и мембраной, но разное соотношение ( $V/S$ , мл/см<sup>2</sup>) обрабатываемого объема сыворотки ( $V$ , мл) к поверхности электрода ( $S$ , см<sup>2</sup>), так что для EDP-2 это отношение равно 1,4, а для EDP-4 – 1,0 (табл. 3).

Электролизеры EDC-3 и EDC-pilot предназначены для переработки МС (рабочая жидкость) в периодическом и непрерывном режимах подачи МС и вторичной жидкости

(анодной жидкости). Электролизеры содержат полуцилиндрический диэлектрический корпус с анодной и катодной ячейками, мембрану, расположенную на полуцилиндрическом корпусе, электроды: катод и анод, впускной и выпускной клапаны катодной и анодной жидкости; имеют разные расстояния между электродами и электродами и мембраной. Отношение объема перерабатываемой сыворотки ( $V$ , мл) к поверхности электрода ( $S$ ,  $\text{см}^2$ ) для EDC-3 составляет  $2,0 \text{ мл}/\text{см}^2$ , а для электролизера EDC-pilot –  $0,75 \text{ мл}/\text{см}^2$  (табл. 3).

Электроактивацию МС проводили в различных электролизерах при плотностях электрического тока  $10$  и  $20 \text{ мА}/\text{см}^2$  в течение всего периода обработки. Режим подачи рабочей жидкости (различные виды сыворотки в катодной камере) и вторичной жидкости ( $2\%$  раствор  $\text{CaCl}_2$ ) в анодной камере носит периодический характер. БМК собирали через определенные периоды обработки. Переработанную сыворотку отводили в виде пены, перемешивали для ее разрушения, разделяли на БМК и депротеинизированную сыворотку (ДС) как надосадочную жидкость в поле массовых сил. Вторичная жидкость из анодной ячейки подвергалась рециркуляции.

Содержание белка определяли методом Варбурга на спектрофотометре СФ-56 (стандартный раствор – бычий сывороточный альбумин BSA, калибровочный коэффициент  $k = 1,72$ ) [40].

Количество белка, извлекаемого в БМК (степень извлечения белка в БМК –  $Q$ , %), рассчитывали по разнице между содержанием белка в исходной молочной сыворотке (ИМС) и оставшимся в ДС:

$$Q = Q_{\text{ИМС}} - Q_{\text{ДС}}, \% \quad (1)$$

где  $Q$  – содержание белка в БМК;  $Q_{\text{ИМС}}$  – содержание белка в ИМС;  $Q_{\text{ДС}}$  – содержание белка в ДС.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

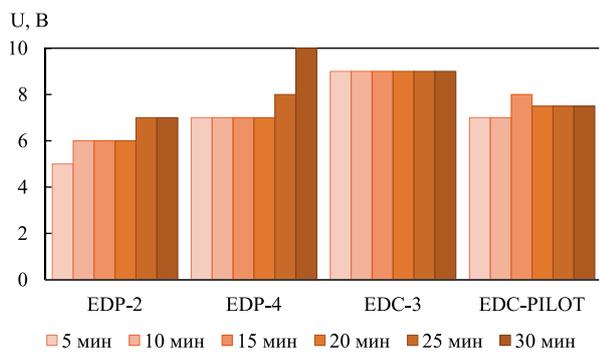
Основными электрическими параметрами при электроактивации МС являются плотность электрического тока ( $j$ ) и напряжение. Значение напряжения менялось во время опытов, что свидетельствовало о проводимости обрабатываемой среды, обусловленной многими факторами: расстоянием между электродами, типом используемой мембраны – МК-40, объемом перерабатываемой сыворотки, содержанием вторичной жидкости. Повышение проводимости или уменьшение сопротивления обрабатываемой среды приводило к снижению удельного расхода энергии при электроактивации МС.

Изменение напряжения в процессе электроактивации МС ССБ в стационарном режиме (периодическая подача МС) при плотностях электрического тока  $10$  и  $20 \text{ мА}/\text{см}^2$  в различных электролизерах в значительной степени зависит от объема обрабатываемой сыворотки (соответственно отношение  $V/S$ ), конструктивно-геометрических параметров (с параллелепипедным или полуцилиндрическим каркасом), сухого содержания белка исходной МС, объема вторичной жидкости (анодной жидкости) и концентрации ионов кальция  $v(\text{Ca}^{2+})$ , моль/л.

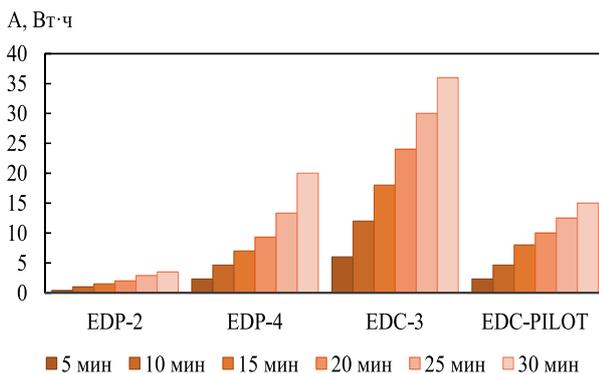
Для электролизеров с геометрической конфигурацией в виде параллелепипеда – EDP-2 и EDP-4 характерны более низкие значения изменения напряжения, с меньшим отношением  $V/S$  –  $1,4$  и  $1,0$  соответственно, и асимметричные расстояния между электродами и электродами и мембраной. В электролизерах с полуцилиндрическим корпусом EDC-3 и EDC-pilot, имеющих симметричное расстояние между электродами и электродами и мембраной и соотношением  $V/S$  –  $2,0$  и  $0,75$  соответственно, регистрируется незначительное повышение напряжения, но, имея в виду большой объем перерабатываемой сыворотки (особенно EDC-3), не превышает такой же вариации по сравнению с электролизерами EDP-2 и EDP-4. Содержание сухих веществ, особенно белков и минералов, влияет на проводимость среды и соответственно на изменение напряжения, которое в EDC-3 при  $j = 10 \text{ мА}/\text{см}^2$  остается постоянным практически в течение всего периода обработки (рис. 3). При  $j = 20 \text{ мА}/\text{см}^2$  фиксируются повышенный прирост напряжения и сохранение стабильной проводимости при обработке сыворотки в EDC-pilot (рис. 4).

Энергозатраты при электроактивации МС ССБ при плотности тока  $10$  и  $20 \text{ мА}/\text{см}^2$  в периодическом режиме подачи рабочей и вторичной жидкости в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-3 и EDC-pilot показаны на рис. 5, 6.

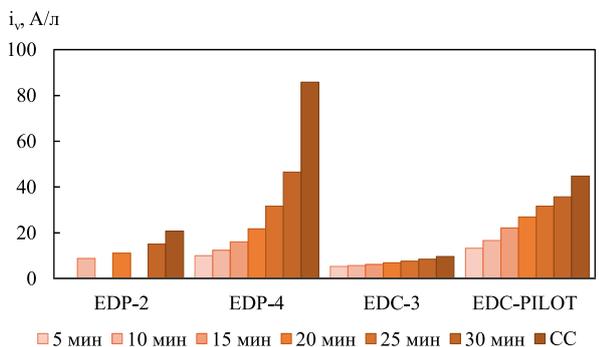
Обработка МС в EDP-4 в виде параллелепипеда и несимметричных катодных и анодных камер существенно не отличается от обработки МС в электролизере EDC-pilot с полуцилиндрическим корпусом и симметричными камерами, оба электролизера имеют одинаковое расстояние между электродами и электродами и мембранами, однако различаются объемом перерабатываемой сыворотки. Высокое значение энергозатрат фиксируется при обработке в диафрагменном электролизере EDC-3 (с полуцилиндрическим корпусом), что связано с большим объемом перерабатываемой сыворотки, симметричностью катодной и анодной ячеек,



**Рис. 3.** Изменение напряжения в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-3, EDC-pilot от длительности обработки при электроактивации МС ССБ,  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$ .



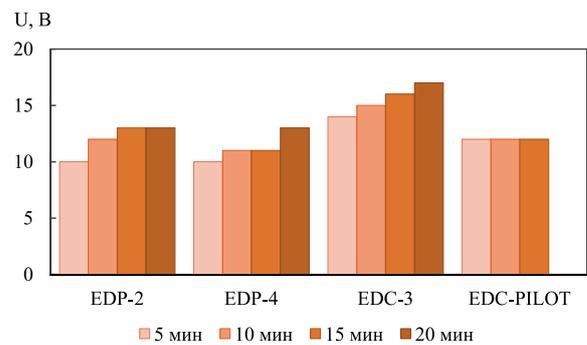
**Рис. 5.** Изменение расхода энергии в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-3, EDC-pilot от длительности обработки при электроактивации МС ССБ,  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$ .



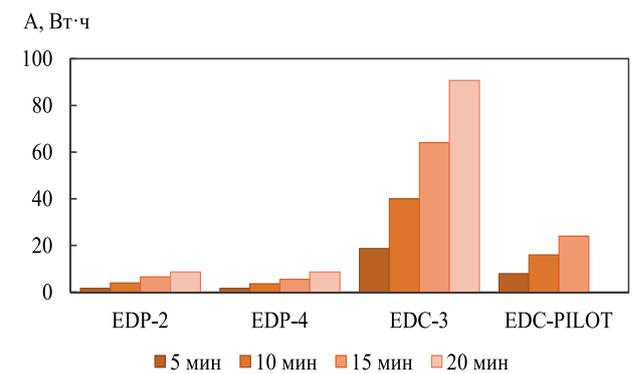
**Рис. 7.** Изменение объемной плотности электрического тока  $i_v$ , (A/l) от длительности обработки при электроактивации МС ССБ,  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$  в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-3, EDC-pilot, СС – содержание МС в катодной камере.

соотношением  $V/S = 2 \text{ мл/см}^2$ , однако обработка в этом электролизере позволяет более эффективно извлекать как белковые фракции в БМК, так и увеличивать количество выделенного БМК. Использование электролизера EDC-pilot с полцилиндрическим корпусом и оптимизированными конструктивными параметрами свидетельствует о значительно меньшем энергопотреблении по сравнению с EDC-3 (рис. 5 и 6).

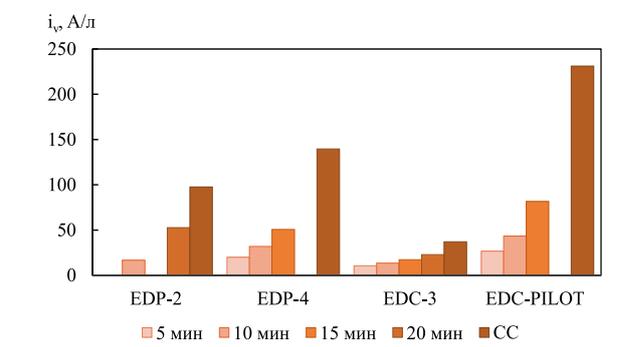
Исследование изменения объемной плотности электрического тока ( $i_v$ , A/l) при электроактивации МС ССБ в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-3, EDC-pilot при  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$  указывает на рентабельность использования



**Рис. 4.** Изменение напряжения в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-3, EDC-pilot от длительности обработки при электроактивации МС ССБ,  $j = 20 \text{ mA/cm}^2$ .



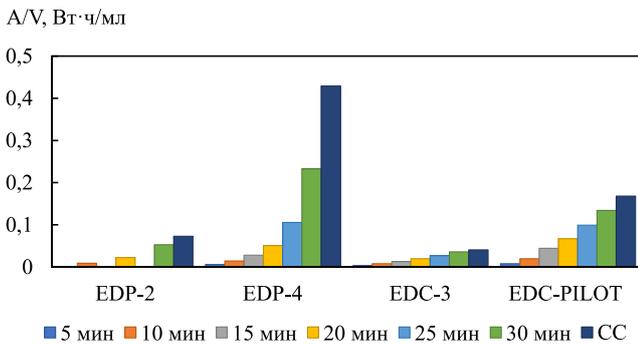
**Рис. 6.** Изменение расхода энергии в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-3, EDC-pilot от длительности обработки при электроактивации МС ССБ,  $j = 20 \text{ mA/cm}^2$ .



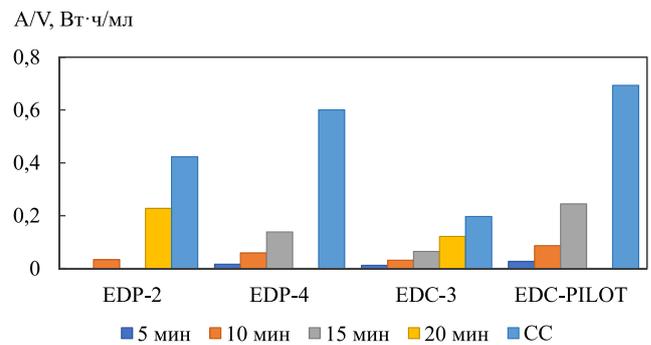
**Рис. 8.** Изменение объемной плотности электрического тока  $i_v$ , (A/l) от длительности обработки при электроактивации МС ССБ,  $j = 20 \text{ mA/cm}^2$  в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-3, EDC-pilot, СС – содержание МС в катодной камере.

электролизера EDC-3 при периодической подаче МС, оно продемонстрировало влияние объема перерабатываемой сыворотки и необходимость обработки МС в больших объемах, что выгодно и при непрерывной обработке МС в промышленных условиях (рис. 7, 8).

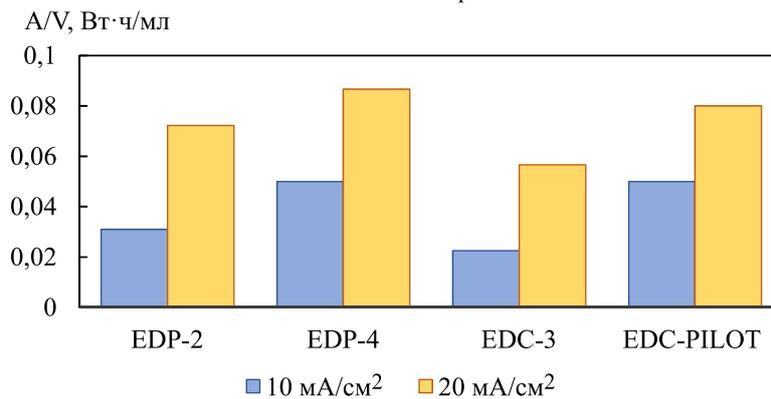
Удельный расход энергии на единицу объема  $A/B$  (Вт·ч/мл) при электроактивации МС ССБ при  $j = 10$  и  $20 \text{ mA/cm}^2$  в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-3, EDC-pilot сохраняет характер вариации, как и в случае изменения объемной плотности, и в значительной степени зависит не только от конструктивно-



**Рис. 9.** Изменение удельного расхода энергии на единицу объема  $A/B$  (Вт·ч/мл) в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-3, EDC-pilot от длительности обработки при электроактивации МС ССБ,  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$ , СС – содержание МС в катодной камере.



**Рис. 10.** Изменение удельного расхода энергии на единицу объема  $A/B$  (Вт·ч/мл) в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-3, EDC-pilot от длительности обработки при электроактивации МС ССБ,  $j = 20 \text{ mA/cm}^2$ , СС – содержание МС в катодной камере.



**Рис. 11.** Изменение общего удельного расхода энергии на единицу объема  $A/B$  (Вт·ч/мл) при электроактивации МС ССБ в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-3, EDC-pilot при  $i_c$ , равных 10 и 20  $\text{mA/cm}^2$  в периодическом режиме.

геометрических параметров аппаратов, расстояния между электродами и электродами и мембраной, от симметрии или асимметрии рабочих и вторичных ячеек, но и от обрабатываемого объема (рис. 9, 10).

Изменение общего удельного расхода энергии на единицу объема  $A/B$  (Вт·ч/мл) при электроактивации ССБ в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-3, EDC-pilot при плотности тока 10 и 20  $\text{mA/cm}^2$  свидетельствует об эффективности использования электролизера EDC-3 в периодическом режиме обработки (рис. 11).

Порог термической денатурации сывороточных белков составляет 55–60 °С, а их выделение в БМК предполагает соблюдение определенных режимов обработки.

Электроактивация МС в различных электролизерах требует надлежащего управления условиями обработки, что обусловлено джоулевым нагревом, зависящим от электропроводности обрабатываемой среды. Необходимыми условиями снижения сопротивления системы являются: обеспечение наличия носителей заряда (в зависимости от содержания сухого вещества), снижение сопротивления мембраны, соблюдение оптимального расстояния между электродами, а также между электродами и мембраной (в зависимости от содержания и состава вторичной жидкости).

Электроактивация сыворотки позволяет выделить две фракции: белковые концентраты, которые собираются в виде пены и разделяются центрифугированием для получения БМК и ДС. Обработка МС в катодной камере происходит путем образования двух фаз: пенной и жидкой, что дает возможность регистрировать температуру в жидкой и пенной фазах.

Повышение температуры при электроактивации МС ССБ в стационарном режиме обработки при плотности электрического тока 10  $\text{mA/cm}^2$  в различных электролизерах обусловлено эффектом Джоуля, который в значительной степени зависит от энергии, сообщаемой обрабатываемой среде, и ее проводимости. Геометрическая конфигурация диафрагменного электролизера EDC-3 подтверждает рентабельность его использования и с точки зрения более медленного повышения температуры, что особенно важно для сывороточных белков, имеющих температуру денатурации 55 °С (рис. 12).

Повышение температуры при электроактивации МС ССБ в стационарном режиме обработки при  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$  в различных электролизерах носит более медленный характер роста по сравнению с обработкой при  $j = 20 \text{ mA/cm}^2$ , что также подтверждает

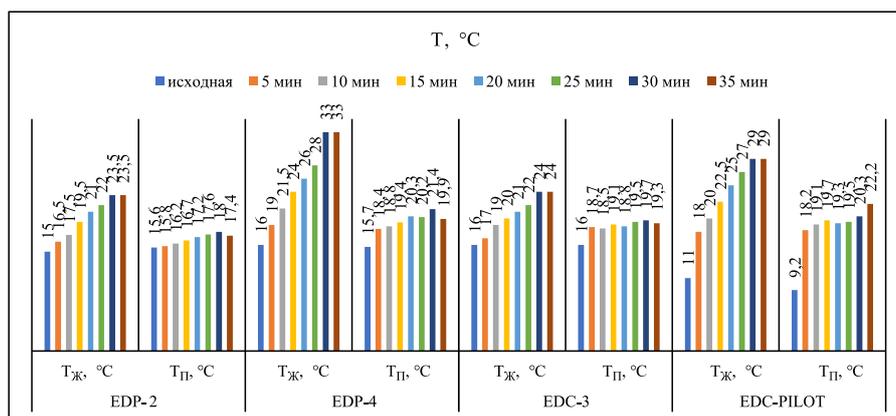


Рис. 12. Изменение температуры жидкой ( $T_{ж}$ , °C) и пенной ( $T_{п}$ , °C) фаз в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-3, EDC-pilot при электроактивации МС ССБ,  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$ .

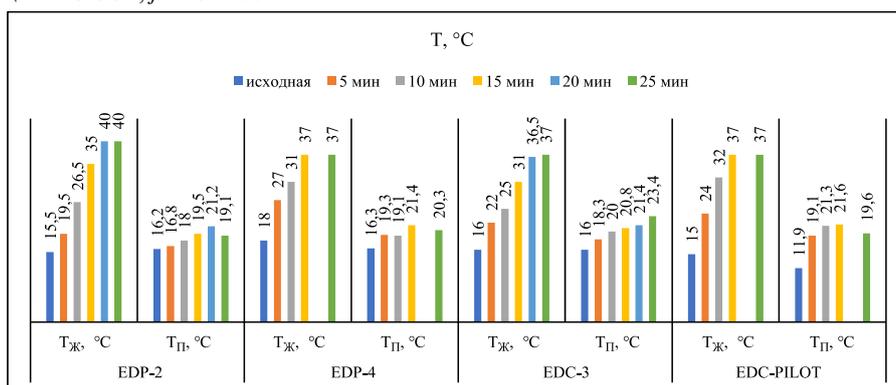


Рис. 13. Изменение температуры жидкой ( $T_{ж}$ , °C) и пенной ( $T_{п}$ , °C) фаз в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-3, EDC-pilot при электроактивации МС ССБ,  $j = 20 \text{ mA/cm}^2$ .

рентабельность использования электролизера EDC-3, имеющего возможность перерабатывать больший объем сыворотки по сравнению с другими электролизерами (рис. 13).

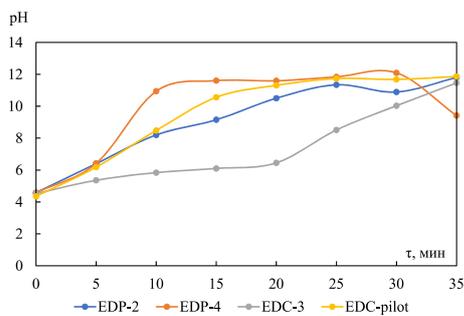
Основные физико-химические параметры – значения pH и окислительно-восстановительный потенциал ( $E$ , мВ) при электроактивации МС ССБ в разных электролизерах изменяются из-за характерных реакций процесса разложения воды в катодной и анодной камерах на поверхности электродов и влияют на физико-химические и биохимические характеристики изменения сыворотки.

Обработка МС происходит в основной рабочей ячейке – катодной камере, а анодная камера играет роль вторичной ячейки, цель которой поддерживать проводимость системы.

Белки, содержащиеся в сыворотке в нативном виде, имеют глобулярную структуру. Белковая глобула образована таким образом, что большая часть поляризованных аминокислот с гидрофильными боковыми радикалами ориентирована на поверхность глобулы и контактирует с растворителем, а большая часть неполярных (гидрофобных) аминокислот ориентирована внутрь глобулы и остается изолированной от взаимодействия с водой. Находящиеся на поверхности ионные радикалы

аминокислот проявляют кислотно-щелочные свойства, обуславливая амфотерность и заряд белковой молекулы. В зависимости от реакции обрабатываемой среды и соотношения кислых или щелочных радикалов аминокислот белки имеют положительный или отрицательный заряд [41].

В растворах молекула белка окружена гидратирующей (сольватной) пленкой ориентированной по периметру гидрофильными радикалами диполей воды. Белки в растворе сохраняются в нативном состоянии за счет факторов устойчивости, представленных зарядом молекулы и пленкой вокруг нее, предохраняющей молекулу белка от слияния. Удаление этих факторов приводит к коагуляции и осаждению белков. Повреждение гидратирующей пленки сывороточных белков при электролизе воды в результате электроактивации сыворотки в катодной области подталкивает их к коагуляции и извлечению в БМК с первых минут обработки. Кроме того, активация нековалентных связей под действием электрического тока, поддерживающих глобулярную структуру белков, и активация боковых ионных радикалов аминокислот приводят к образованию новых связей и,



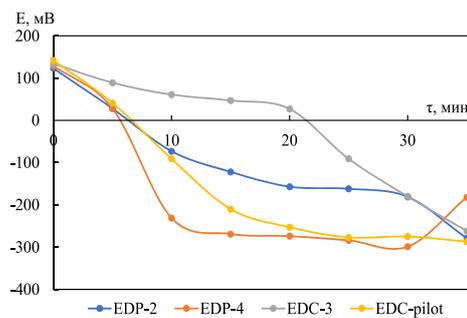
**Рис. 14.** Изменение pH в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-3, EDC-pilot от длительности обработки при электроактивации МС ССБ,  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$ .

следовательно, к агрегации или преобразованию белковых молекул [41].

Одновременно при электроактивации происходит электролиз воды на катоде и образование гидроксильных ионов, что характеризует щелочную среду, а также выделение газообразного водорода, вызывающего ионную флотацию через пенообразование, одновременно сопровождающееся высаливанием белков за счет миграции двухвалентных ионов кальция из анодной ячейки, что активизирует процесс вспенивания и «разворачивания» белковых молекул. Аминогруппы, в свою очередь, интенсифицируют щелочную среду, вызывая быстрое увеличение pH в катодной камере, что способствует прохождению белковых фракций через их изоэлектрическую точку и значительному снижению окислительно-восстановительного потенциала, характеризующегося интенсивными восстанавливающими реакциями. Повышение pH при электроактивации дисперсных сред также сопровождается преобразованием аквакомплексов, где лигандами служат поляризованные молекулы воды, сохраняющие коллоидную структуру раствора, в гидрокомплексы, в которых в качестве лигандов выступают гидроксильные ионы [41].

В зависимости как от содержания белка в сыворотке, так и от геометрической формы электролизера и обрабатываемого объема жидкости переход аквакомплексов в гидрокомплексы происходит по-разному. Также по-разному осуществляется и снижение потенциала ( $E$ , мВ), который характеризует окислительно-восстановительные реакции, имеющие интенсивно отрицательные значения в катодной ячейке, где соответственно и протекают редокс-реакции, присущие обрабатываемой среде.

Увеличение pH и соответственно снижение значений параметров окислительно-восстановительного потенциала ( $E$ , мВ) в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-pilot при электроактивации



**Рис. 15.** Изменение  $E$ , мВ в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-3, EDC-pilot, от длительности обработки при электроактивации МС ССБ,  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$ .

МС ССБ при  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$  подтверждает более быстрый переход аквакомплексов в гидрокомплексы в отличие от обработки МС в EDC-3, где этот переход более медленный. Значения окислительно-восстановительного потенциала при электроактивации сыворотки при  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$  свидетельствуют о более высокой скорости образования активных восстановителей при обработке в EDP-2, EDP-4, EDC-pilot по сравнению с EDC-3, который отличается более медленным переходом, ускоряющийся только после 20 мин обработки и характеризующим восстановительные реакции, протекающие в катодной камере EDC-3 (рис. 14, 15).

Изменение pH в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-pilot при электроактивации МС ССБ при  $j = 20 \text{ mA/cm}^2$  свидетельствует о быстром переходе аквакомплексов в гидрокомплексы, а для EDC-3 этот переход практически сокращается вдвое по сравнению с обработкой при  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$ . Снижение окислительно-восстановительного потенциала протекает также в два раза быстрее в этих условиях обработки (рис. 16, 17).

Выделение сывороточных белков в БМК ( $Q$ , %) из ИМС варьирует в зависимости от содержания сухих веществ в сыворотке, режима обработки (разные плотности тока, количество обрабатываемой МС), изменения электрических, термических, физико-химических параметров во время обработки МС. Интенсивное пенообразование в первые минуты свидетельствует об интенсивном высаливании белковых фракций, что приводит к образованию белково-минеральных соединений. Высаливание сывороточных белков при электроактивации является одним из многочисленных механизмов, способствующих выделению белковых фракций в БМК.

Изменение степени извлечения ( $Q$ , %) сывороточных белков МС в БМК при электроактивации МС ССБ при  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$  в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-3, EDC-pilot указывает, что оптимизация технических характеристик электролизера EDC-pilot по

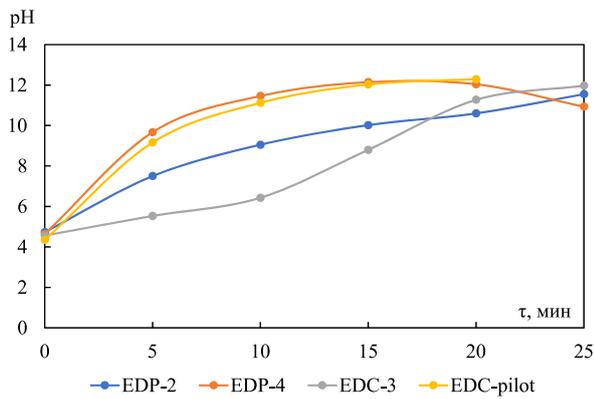


Рис. 16. Изменение pH в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-3, EDC-pilot от длительности обработки при электроактивации MC ССБ,  $j = 20 \text{ mA/cm}^2$ .

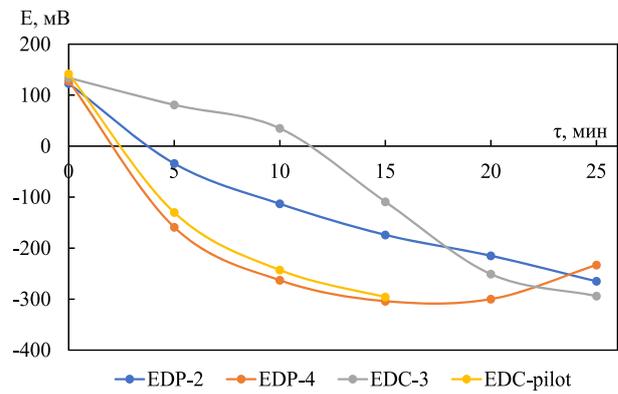


Рис. 17. Изменение  $E$ , мВ в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-3, EDC-pilot от длительности обработки при электроактивации MC ССБ,  $j = 20 \text{ mA/cm}^2$ .

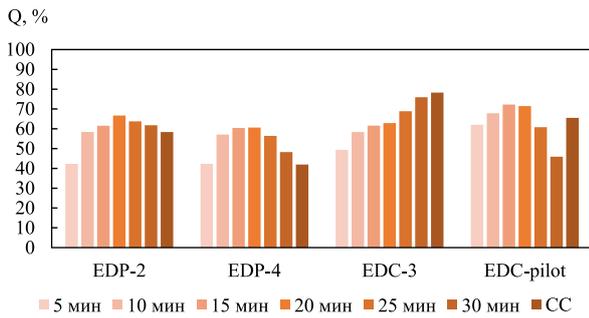


Рис. 18. Изменение степени выделения сывороточных белков в БМК ( $Q$ , %) от длительности обработки при электроактивации MC ССБ при  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$  в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-3, EDC-pilot, СС – содержание MC в катодной камере.

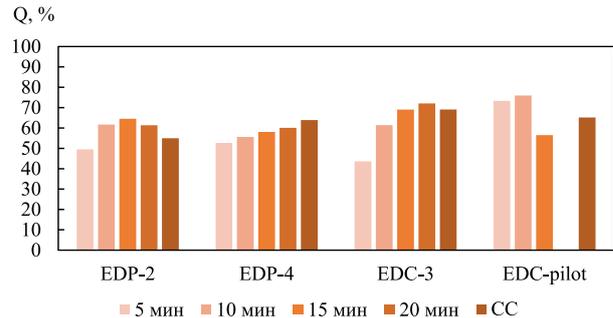


Рис. 19. Изменение степени выделения сывороточных белков в БМК ( $Q$ , %) от длительности обработки при электроактивации MC ССБ при  $j = 20 \text{ mA/cm}^2$  в электролизерах EDP-2, EDP-4, EDC-3, EDC-pilot, СС – содержание MC в катодной камере.

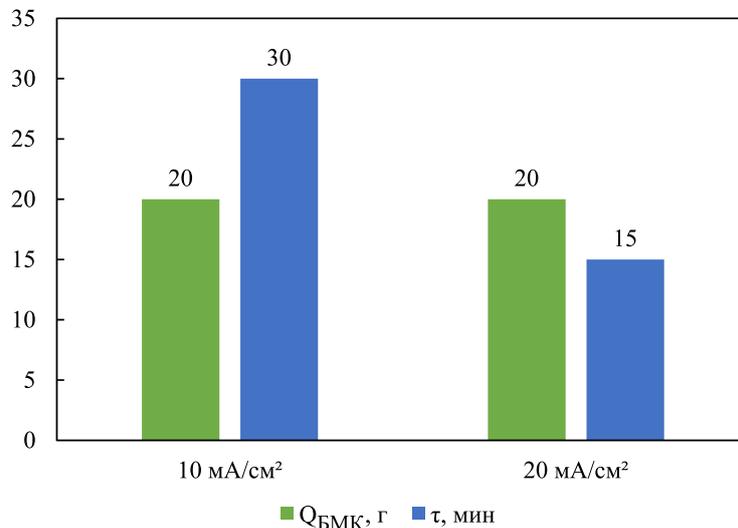


Рис. 20. Количественное извлечение сывороточных белков в БМК ( $Q_{\text{БМК}}$ , г) при электроактивации MC ССБ в диафрагменном электролизере EDC-3,  $j = 10$  и  $20 \text{ mA/cm}^2$ .

сравнению с EDC-3 обоснована для обоих режимов обработки ( $j = 10$  и  $20 \text{ mA/cm}^2$ ). Степень выделения сывороточных белков в первые 5–10 мин обработки достигает около 75%. Электроактивация MC в EDC-3 показывает максимальное выделение сывороточных белков в БМК при  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$  к концу процесса (30 мин обработки) – в пенной фазе (около 75%), а в жидкой фазе в катодной камере содержание

сывороточных белков в БМК составляет около 78% (рис. 18, 19).

Количественное извлечение сывороточных белков в БМК ( $Q_{\text{БМК}}$ , г), при электроактивации MC ССБ при плотностях электрического тока  $j = 10$  и  $20 \text{ mA/cm}^2$  в диафрагменном электролизере EDC-3 одинаково для обоих режимов, но продолжительность обработки сокращается практически в два раза при  $20 \text{ mA/cm}^2$  (от 30 до 15 мин) (рис. 20).

Различное и неоднородное извлечение сывороточных белков в БМК при электроактивации МС ССБ в разных электролизерах обусловлено, в первую очередь, свойствами каждой отдельной фракции белков МС, исходным содержанием сухих веществ, особенно белков, конструктивно-геометрическими параметрами, режимами обработки, электрическими, термическими, физико-химическими параметрами, что свидетельствует о необходимости обеспечения оптимальных технических и технологических условий обработки.

Важно корректировать технико-технологические параметры по характеристикам удельных энергозатрат на единицу объема и объемной плотности тока для достижения максимальной эффективности выделения сывороточных белков и рентабельности электроактивации различных видов вторичных молочных продуктов.

### ВЫВОДЫ

1. В работе представлены результаты исследования электроактивации МС ССБ с целью выделения белков сыворотки в белково-минеральные концентраты.

2. Показано, что основными факторами, влияющими на электроактивацию МС ССБ, являются: конструктивно-геометрические параметры электролизеров, объем переработанной сыворотки и соотношение  $V/S$ ; расстояние между электродами и электродами и мембраной; плотность электрического тока; содержание сухих веществ в исходной молочной сыворотке; объем вторичной жидкости (анодной).

3. Установлено, что основные электрические параметры – напряжение ( $U$ , В), потребление энергии ( $A$ , Вт·ч), удельный расход энергии на единицу объема ( $A/V$ , Вт·ч/мл), объемная плотность электрического тока ( $i_v$ , А/л) в значительной степени зависят от объема перерабатываемой сыворотки (соотношение  $V/S$ ), от формы (с параллелепипедным или полуцилиндрическим корпусом), сухого содержания исходной сыворотки, объема вторичной жидкости (анодной).

4. Повышение температуры при электроактивации МС ССБ в различных электролизерах и режимах обработки зависит от проводимости и энергии, сообщаемой обрабатываемой среде в результате джоулевого нагрева. Геометрическо-конструктивные параметры аппаратов подтверждают рентабельность использования электролизера EDC-3 за счет более медленного повышения температуры в них, что особенно важно для

сывороточных белков, имеющих низкую предельную температуру денатурации – 55 °С.

5. Значения рН и окислительно-восстановительного потенциала ( $E$ , мВ) при электроактивации МС ССБ в электролизерах с разными конструктивно-геометрическими параметрами изменяются за счет характерных реакций процесса электролиза воды на поверхностях электродов в катодной и анодной камерах, что и влияет на физико-химические и биохимические превращения основного состава МС. Повышение рН сопровождается переходом аквакомплексов (где лигандами служат поляризованные молекулы воды, сохраняющие коллоидную структуру, совместно с белками) в гидрокомплексы, имеющие в качестве лигандов гидроксильные ионы.

6. Снижение окислительно-восстановительного потенциала ( $E$ , мВ) при электроактивации в катодной камере свидетельствует о скорости образования активных восстановителей, а также о многократных превращениях основных компонентов сыворотки, в первую очередь, выделении белковых фракций в БМК, а также о состоянии активации аминокислот, которая зависит от энергии сообщаемой системе.

7. Различное и неоднородное извлечение сывороточных белков в БМК при электроактивации МС ССБ в разных электролизерах обусловлено свойствами каждой отдельной фракции, исходным содержанием сухих веществ (особенно содержанием белка и минералов), наличием двухвалентных щелочноземельных металлов, конструктивно-геометрическими характеристиками электролизеров, режимами обработки, электрическими, термическими, физико-химическими параметрами, что требует индивидуального подхода к обработке разных типов МС.

8. Максимальная степень извлечения сывороточных белков в БМК ( $Q$ , %) при электроактивации МС ССБ составляет около 80% в EDC-3 при  $j = 10$  мА/см<sup>2</sup> и около 75% в электролизере EDC-pilot при значительных пониженных энергетических затратах, что позволяет оптимизировать технические параметры опытного электролизера EDC-pilot по сравнению с EDC-3 и сократить время обработки исходной молочной сыворотки.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках проекта ANCD 20.80009.5007.06 (2020–2023) «Интенсификация процессов переноса и обработки в электрических, электромагнитных, кавита-ционных полях; практичность».

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

- Guo, M. and Wang, G. History of whey production and whey protein manufacturing. *Whey protein production, chemistry, functionality, and applications*. Mingruo Guo (Ed.). John Wiley & Sons Ltd, 2019, p. 1. <https://doi.org/10.1002/9781119256052.ch1>.
- Mehra, R., Kumar, H., Kumar, N., Ranvir, S., et al., Whey proteins processing and emergent derivatives: An insight perspective from constituents, bioactivities, functionalities to therapeutic applications, *Journal of Functional Foods*, 2021, vol. 87, p. 1. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104760>.
- Minj, S. and Anand, S., Whey proteins and its derivatives: bioactivity, functionality, and current applications, *Dairy*, 2020, vol. 1, no. 3, p. 233. <https://doi.org/10.3390/dairy1030016>.
- Israni, N., Venkatachalam, P., Gajaraj, B., Varalakshmi, K.N., et al., Whey valorization for sustainable polyhydroxyalkanoate production by *Bacillus megaterium*: Production, characterization and in vitro biocompatibility evaluation, *J. Environ. Manage.*, 2020, vol. 255, p. 1. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109884>.
- Bintsis, T. and Papademas, P., Sustainable Approaches in Whey Cheese Production: A Review, *Dairy*, 2023, vol. 4, no. 2, p. 249. <https://doi.org/10.3390/dairy4020018>.
- Kazimierowicz, J., Zieliński, M., Bartkowska, I. and Dębowski, M., Effect of acid whey pretreatment using ultrasonic disintegration on the removal of organic compounds and anaerobic digestion efficiency, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2022, vol. 19, p. 1. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811362>.
- Buchanan, D., Martindale, W., Romeih, E. and Hebshy, E., Recent advances in whey processing and valorisation: Technological and environmental perspectives, *Int. J. Dairy Technol.*, 2023, vol. 76, no. 2, p. 291. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12935>.
- Pires, A.F., Marnotes, N.G., Rubio, O.D., Garcia, A.C., et al., Dairy by-products: a review on the valorization of whey and second cheese whey, *Foods*, 2021, vol. 10, no. 5, p. 1. <https://doi.org/10.3390/foods10051067>.
- Ahmed, M.E., Ahmed, H. and Ahmed R.A.H., Therapeutic benefits and applications of whey protein, *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.*, 2020, vol. 9, no. 7, p. 337. <https://doi.org/10.20546/ijemas.2020.907.036>.
- Panghal, A., Patidar, R., Jaglan, S., Chhikara, N., et al., Whey valorization: current options and future scenario – a critical review, *Nutrition & Food Science*, 2018, vol. 48, no. 3, p. 520. <https://doi.org/10.1108/NFS-01-2018-0017>.
- Ganju, S. and Gogate, P.R., A review on approaches for efficient recovery of whey proteins from dairy industry effluents, *J. Food Eng.*, 2017, vol. 215, p. 84. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.07.021>.
- Chen, G.Q., Qu, Y., Gras, S.L., et al., Separation technologies for whey protein fractionation, *Food Eng. Rev.*, 2023, vol. 15, no. 1, p. 1. <https://doi.org/10.1007/s12393-022-09330-2>.
- Paladii, I.V., Vrabie, E.G., Sprinchan, K.G., et al., Part 1: Classification, composition, properties, derivatives, and application, *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, 2021, vol. 57, p. 579. <https://doi.org/10.3103/S1068375521050112>.
- Batista, M.A., Campos, N.C. and Silvestre, M.P., Whey and protein derivatives: Applications in food products development, technological properties and functional effects on child health, *Cogent Food & Agriculture*, 2018, vol. 4, p. 1. <https://doi.org/10.1080/23311932.2018.1509687>.
- Hirsch, D.B., Martínez Álvarez, L.M., Urtasun, N., Baieli, M.F., et al., Lactoferrin purification and whey protein isolate recovery from cheese whey using chitosan mini-spheres, *Int. Dairy J.*, 2020, vol. 109, p. 1. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104764>.
- Faraji, N., Yan, Z. and Ajay, K.R., Optimization of lactoperoxidase and lactoferrin separation on an ion-exchange chromatography step, *Separations*, 2017, vol. 4, no. 2, p. 1. <https://doi.org/10.3390/separations4020010>.
- Božanić, R., Barukčić, I., Jakopović, K.L. and Tratnik, L., Possibilities of whey utilization, *Austin J Nutri Food Sci*, 2014, vol. 2, no. 7, p. 1.
- Naclerio, F., Alkhatib, A. and Jimenez, A., Effectiveness of whey protein supplement in resistance trained individuals, *J. Sports Med. Doping Stud.*, 2013, vol. 3, no. 3, p. 1. doi: 10.4172/2161-0673.1000130.
- Lavoisier, A., Vilgis, T.A. and Aguilera, J.M., Effect of cysteine addition and heat treatment on the properties and microstructure of a calcium-induced whey protein cold-set gel, *Current research in food science*, 2019, vol. 1, p. 31. <https://doi.org/10.1016/j.crf.2019.10.001>.
- Verruck, S., Sartor, S., Marendra, F.B., et al., Influence of heat treatment and microfiltration on the milk proteins properties, *Adv. Food. Technol. Nutr. Sci. Open J.*, 2019, vol. 5, no. 2, p. 54. doi: 10.17140/AFTNSOJ-5-157
- Chavan, R.S., Shraddha, R.K., Kumar, A. and Nalawade, T., Whey based beverage: Its functionality, formulations, health benefits and applications, *J. Food Process. Techno.*, 2015, vol. 6, no. 10, p. 1. doi: 10.4172/2157-7110.1000495.
- Papademas, P. and Paschalia K., Technological utilization of whey towards sustainable exploitation, *J. Adv. Dairy Res.*, 2019, vol. 7, p. 1. doi: 10.35248/2329-888X.19.7.231.
- Lappa, I.K., Papadaki, A., Kachrimanidou, V., Terpou, A., et al., Cheese whey processing: Integrated biorefinery concepts and emerging food applications,

- Foods*, 2019, vol. 8, no. 8, p. 1. doi: 10.3390/foods8080347.
24. Barba, F.J., An integrated approach for the valorization of cheese whey, *Foods*, 2021, vol. 10, no. 3, p. 1. <https://doi.org/10.3390/foods10030564>.
  25. Arab, S.A., Kaemipoor, M., Alkhaleel, R. and Mahdian, A., Recent trends in developing whey products by advanced technologies, *Sch. Acad. J. Biosci.*, 2023, vol. 11, no. 2, p. 74. doi: 10.36347/sajb.2023.v11i02.006
  26. Shinde, G., Kumar, R., Chauhan, S., et al., Whey proteins: A potential ingredient for food industry – A review. *Asian J. Dairy & Food Res.*, 2018 vol. 37, no. 4, p. 283. doi: 10.18805/ajdfr.DR-1389.
  27. Tsermoula, P., Khakimov, B., Nielsen, J.H. and Engelsen, S.B., Whey – The waste-stream that became more valuable than the food product, *Trends Food Sci. Technol.*, 2021, vol. 118, p. 230. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.025>
  28. Nishanthi, M., Vasiljevic, T. and Chandrapala, J., Properties of whey proteins obtained from different whey streams. *Int. Dairy J.*, 2017, vol. 66, p. 76. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2016.11.009>.
  29. Nishanthi, M., Chandrapala, J. and Vasiljevic, T., Compositional and structural properties of whey proteins of sweet, acid and salty whey concentrates and their respective spray dried powders, *Int. Dairy J.*, 2017, vol. 74, p. 49. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2017.01.002>.
  30. Sima, K., Mir, M.S., Nina, E. and Parvin, D., Whey: characteristics, applications and health aspects, *International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJBR)*, 2016, vol. 7, no. 2, p. 1383.
  31. Guo, M., *Human Milk Biochemistry and Infant Formula Manufacturing Technology*, Cambridge: Elsevier, 2014. p. 397.
  32. Paladii, I.V., Vrabie, E.G., Sprinchan, K.G., et al., Whey: Review. Part 2. Treatment processes and methods, *Surf. Engin. Appl. Electrochem*, 2021, vol. 57, p. 651. <https://doi.org/10.3103/S1068375521060119>.
  33. Goyal, C., Dhyani, P., Rai, D.C., Tyagi, S., et al., Emerging trends and advancements in the processing of dairy whey for sustainable biorefining, *J. Food Process. Preserv.*, 2023, vol. 2023, p. 1. <https://doi.org/10.1155/2023/6626513>
  34. Aslam, M., Khalid, A., Tahir, G. and Mukhtar, H., Recent developments in purification techniques for whey valorization, *J. Biomed. Res. Environ. Sci.*, 2021, vol. 2, no. 9, p. 876. doi: 10.37871/jbres1326.
  35. Ramos O.L., Pereira R.N., Rodrigues R.M., Teixeira J.A., et al., Whey and Whey Powders: Production and Uses. In: Caballero, B., Finglas, P., Toldrá, F. *The Encyclopedia of Food and Health vol. 5*, Oxford: Academic Press, 2016. p. 498.
  36. Sprinchan E.G., Optimization of technological regimes for obtaining protein-mineral concentrated products from secondary milk raw materials, *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, 2009, vol. 45, no. 1, p. 63.
  37. Бахир, В.М., Электрохимическая активация: ключ к экологически чистым технологиям водоподготовки, *Водоснабжение и канализация*, 2012, № 1–2, с. 89.
  38. Kareb, O., Goma, A., Champagne, C., Jean, J., et al., Electro-activation of sweet defatted whey: Impact on the induced Maillard reaction products and bioactive peptides, *Food Chem.*, 2017, vol. 221, p. 590. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.11.134.
  39. Vrabie, E., Bologa, M., Paladii, I., Stepurina, T., et al., Electrical processing of whey. Role of construction, technological and energy characteristics of reactors, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2019, vol. 55, p. 197. <https://doi.org/10.3103/S1068375519020145>
  40. Ressler, N., Gahkoff, M. and Fischinger, A., Improved method for determining serum protein concentration in the far ultraviolet, *Clin. Chem.*, 1976, vol. 22, no. 8, p. 1355.
  41. Vrabie, E., Bologa, M., Stepurina, T., Bologa, Al., et al., Peculiarities of the electric activation of whey, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2011, vol. 47, p. 66. ISSN 1068-3755.

### Summary

The results of the studies of electroactivation, an emerging method of non-waste processing of secondary dairy products, namely, whey with a medium protein content, in order to recover whey proteins into protein mineral concentrates, are presented. Processing was carried out in electrolyzers with different ratios of the volume of the processed whey to the surface of the electrode/cathode with different constructive and geometric parameters, which influences the specific energy consumption per unit volume. The main purpose was the maximum recovery of whey proteins into protein mineral concentrates at low energy costs, and the exclusion of "dead" / inefficient zones of diaphragm electrolyzers. The degree of the recovery of whey protein depending on the pH values, the redox potential, and the temperature during electroactivation was analysed. This justifies the optimization of the technical parameters of electrolyzers for whey with a medium protein content.

**Keywords:** electroactivation, electrolyzers, secondary dairy products, whey proteins, constructive and geometrical parameters, whey

# Промышленное применение метода алмазно-электрохимического хонингования

С. В. Усов<sup>a,\*</sup>, И. П. Точилин<sup>b,\*\*</sup>, А. В. Жданов<sup>c,\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Московский лазерный технологический центр, г. Москва, 140704, Россия, \*e-mail: [usovsv5@mail.ru](mailto:usovsv5@mail.ru)

<sup>b</sup>ФГБОУ ВО «Высшая школа экономики», г. Москва, 101990, Россия, \*\*e-mail: [wayne1976@mail.ru](mailto:wayne1976@mail.ru)

<sup>c</sup>ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых», г. Владимир, 600000, Россия, \*\*\*e-mail: [zhav33@mail.ru](mailto:zhav33@mail.ru)

Поступила в редакцию 15.08.2022

После доработки 18.05.2023

Принята к публикации 30.05.2023

Представлены исследования изменения шероховатости поверхности, остаточных напряжений и других параметров в зависимости от выбранных режимов алмазно-электрохимического хонингования (АЭХХ) для деталей из сталей 30ХГСА, 30ХН2МФА, 35ХН2МФАШ, 23ХГС2МФАЛУ, Ст.50А. Приведена конструкция инструмента-хона; решен вопрос о геометрических характеристиках катодной части, изолирующего покрытия и материала направляющих хона-инструмента. Приведены результаты, демонстрирующие влияние АЭХХ на показатели надежности и долговечности деталей, изготовленных с применением указанного метода. Представлены данные о технико-экономической эффективности созданного промышленного участка АЭХХ.

*Ключевые слова:* алмазно-электрохимическое хонингование, гальваническое хромирование, хон-инструмент, электролит, оборудование, долговечность

УДК 67.05

<https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.4.54>

## ВВЕДЕНИЕ

Метод алмазно-электрохимического хонингования (АЭХХ) [1–5] является финишным методом, обеспечивающим требуемые характеристики шероховатости поверхности, распределение эпюры остаточных поверхностных напряжений, что в конечном счете позволяет сформировать высокопрочные гальванические покрытия. Режимное обеспечение АЭХХ создано на основе исследований, результаты которых приводятся в статье. Выбранные технические показатели системы хон-инструмент–обрабатываемая деталь дают возможность создать приводы АЭХХ оборудования. Выбран оптимальный состав электролита АЭХХ для системы его хранения и подачи.

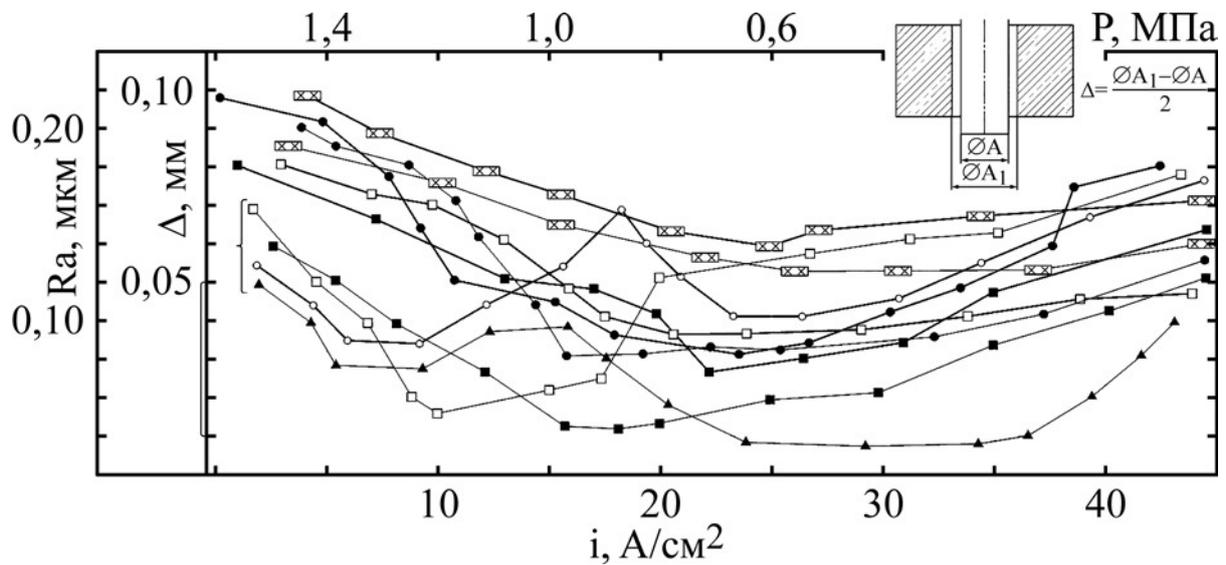
## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ РЕЖИМОВ АЛМАЗНО-ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ХОНИНГОВАНИЯ

Исследование макро- и микрогеометрических показателей поверхностей деталей в ходе метода алмазно-электрохимического хонингования (АЭХХ) сводится к нахождению условий, при которых обеспечивается максимальная интенсивность исправления погрешности, определение величины необходимого припуска. Абразивные и алмазные бруски при одинаковой зернистости близки по своим характеристикам;

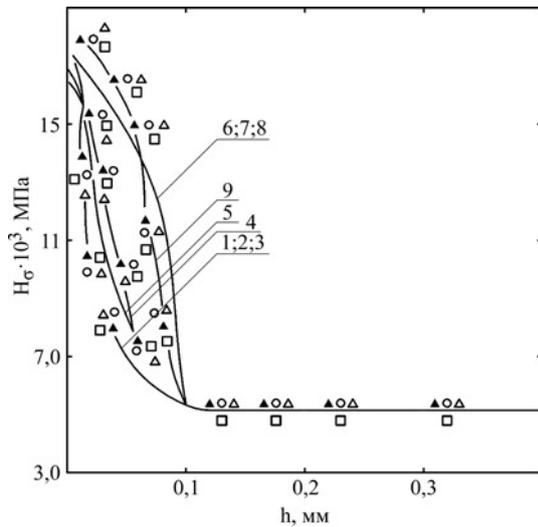
при этом давление разжима брусков способствует стабилизации микрорельефа при определенной плотности тока. Одновременно с этим показано, что наилучшие условия по достижению требуемой макро- и микрогеометрии возникают при реализации соотношений скоростей возвратно-поступательного движения и вращения не менее 0,2–0,3. Отклонения от указанного соотношения приводят, с одной стороны, к росту величины микрорельефа, а с другой – к снижению геометрической точности. При этом достигается геометрическая точность 0,01–0,02 мм, а шероховатость соответствует значениям 0,2–0,4 мкм. Проведенные исследования определили, что в ходе метода АЭХХ осуществляется формирование поверхностного слоя величиной 0,1–0,25 мм. Степень упрочнения последнего определяется природой и зернистостью хонинговальных брусков, величиной удельных давлений, продолжительностью метода, природой материала (рис. 1).

Распределение твердости обеспечивает максимальные значения порядка  $(5–8) \times 10^3$  МПа для всех сталей, кроме Ст50А, имеющей максимальные значения  $(2–3) \times 10^3$  МПа (рис. 2).

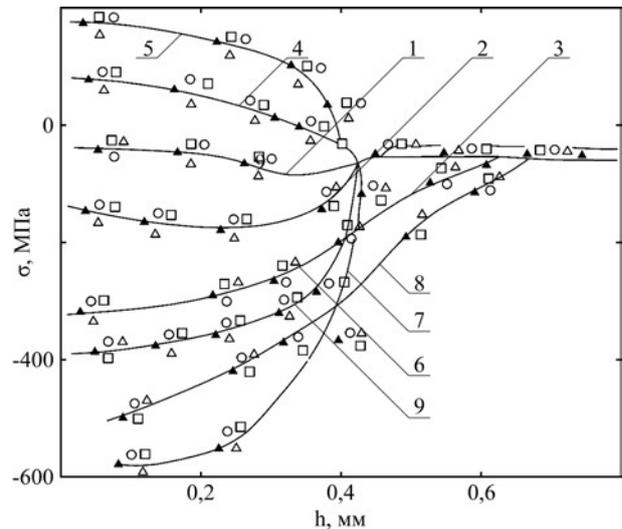
Наследование параметров качества метода АЭХХ определяется сжимающим характером распределения остаточных внутренних напряжений. Диапазон изменения значений вписывается в величины –100...–400 МПа (рис. 3), при



**Рис. 1.** Выбор необходимой величины плотности тока и давления хон-брусков для метода АЭХХ деталей из сталей 30ХГСА, Ст50, 30ХН2МФА:  $\circ$  15% NaNO<sub>3</sub> и TMC-31  $U = 18-20$ В;  $V_{\text{возвратно-поступат.}}/V_{\text{вращен.}} = 0,2$ ; АСР100/80-100%-P9/P11;  $\Delta$  15% NaNO<sub>3</sub> и TMC-31  $U = 18-20$  В;  $V_{\text{вл.}}/V_{\text{вр.}} = 0,3$ ; АСР100/50-100%-P9/P11;  $\bullet$  15% NaNO<sub>3</sub> и TMC-31  $U = 18-20$  В;  $V_{\text{вл.}}/V_{\text{вр.}} = 0,25$ ; АСР100/28-100%-P9/P11;  $\blacktriangle$  15% NaNO<sub>3</sub> и TMC-31  $U = 18-20$  В;  $V_{\text{вл.}}/V_{\text{вр.}} = 0,6$ ; АСР100/63-100%-P9/P11;  $\blacksquare$  15% NaNO<sub>3</sub> и TMC-31  $U = 18-20$ В;  $V_{\text{вл.}}/V_{\text{вр.}} = 0,1$ ; АСР100/63-100%-P9/P11;  $\square$  15% NaNO<sub>3</sub> и TMC-31  $U = 18-20$  В;  $V_{\text{вл.}}/V_{\text{вр.}} = 0,1$ ; АСР100/14-100%-P9/P11;  $\times$  15% NaNO<sub>3</sub> и TMC-31  $U = 18-20$  В;  $V_{\text{вл.}}/V_{\text{вр.}} = 0,2$ ; АСР100/63-100%-P9/P11.



**Рис. 2.** Распределение микротвердости в поверхностном слое образцов из сталей 35ХН2МФАШ, прошедших термообработку, АЭХХ и гальваническое хромирование (70 мкм): 1 – брусок 15АМ50ст1Б;  $P = 0,1$  МПа;  $j = 50$  А/см<sup>2</sup>; 2 – брусок 15АМ50ст1Б;  $P = 0,4$  МПа;  $j = 45$  А/см<sup>2</sup>; 3 – брусок 15АМ50ст1Б;  $P = 0,3$  МПа;  $j = 18$  А/см<sup>2</sup>; 4 – брусок АСР63/50; 100% P9/P11;  $P = 0,5$  МПа;  $j = 40$  А/см<sup>2</sup>; 5 – брусок АСР100/80; 100% P9/P11;  $P = 1,1$  МПа;  $j = 40$  А/см<sup>2</sup>; 6 – брусок АСР40/28; 100% P9/P11;  $P = 0,6$  МПа;  $j = 30$  А/см<sup>2</sup>; 7 – брусок АСР80/63; 100% P9/P11;  $P = 0,4$  МПа;  $j = 28$  А/см<sup>2</sup>; 8 – брусок АСР80/63; 100% P9/P11;  $P = 0,5$  МПа;  $j = 20$  А/см<sup>2</sup>; 9 – брусок АСР80/63; 100% P9/P11;  $P = 0,4$  МПа;  $j = 25$  А/см<sup>2</sup>.

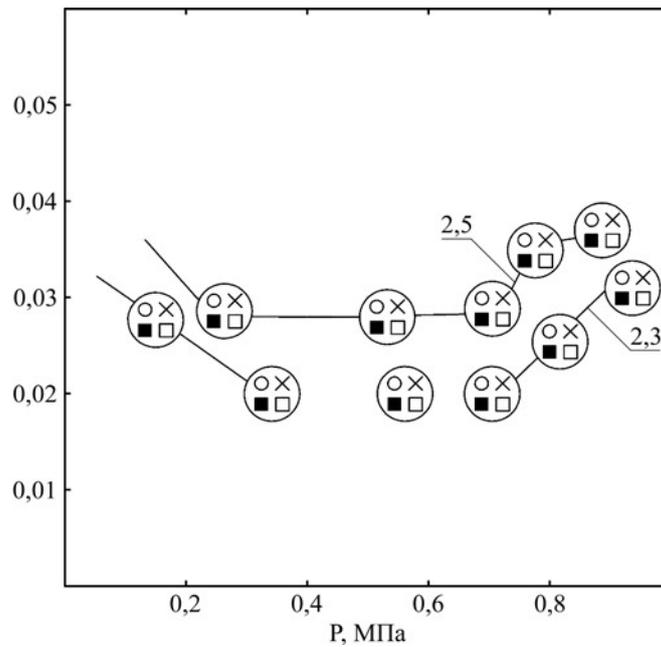


**Рис. 3.** Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое образцов из стали 35ХН2МФАШ, прошедших термообработку, АЭХХ и гальваническое хромирование (70 мкм): 1 – брусок 15АМ50ст1Б;  $P = 0,1$  МПа;  $j = 50$  А/см<sup>2</sup>; 2 – брусок 15АМ50ст1Б;  $P = 0,4$  МПа;  $j = 45$  А/см<sup>2</sup>; 3 – брусок 15АМ50ст1Б;  $P = 0,3$  МПа;  $j = 18$  А/см<sup>2</sup>; 4 – брусок АСР63/50; 100% P9/P11;  $P = 0,5$  МПа;  $j = 40$  А/см<sup>2</sup>; 5 – брусок АСР100/80; 100% P9/P11;  $P = 1,1$  МПа;  $j = 40$  А/см<sup>2</sup>; 6 – брусок АСР40/28; 100% P9/P11;  $P = 0,6$  МПа;  $j = 30$  А/см<sup>2</sup>; 7 – брусок АСР80/63; 100% P9/P11;  $P = 0,4$  МПа;  $j = 28$  А/см<sup>2</sup>; 8 – брусок АСР80/63; 100% P9/P11;  $P = 0,5$  МПа;  $j = 20$  А/см<sup>2</sup>; 9 – брусок АСР80/63; 100% P9/P11;  $P = 0,4$  МПа;  $j = 25$  А/см<sup>2</sup>.

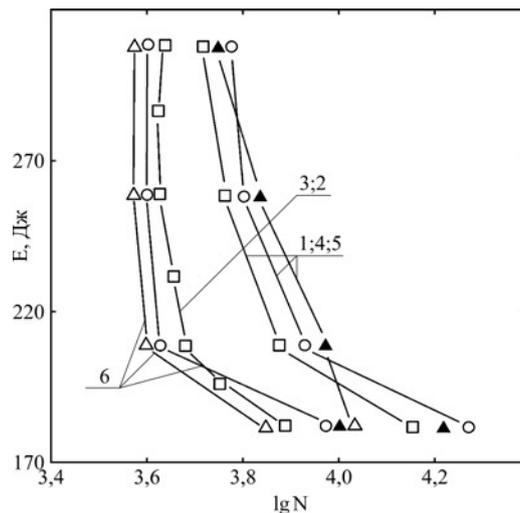
этом границы интервала определяются разнообразием применяемого типа брусков и режимного обеспечения метода (плотность тока, удельное давление, соотношения величин скоростей перемещения хонинговальной головки и др.).

Трибологические испытания поверхностей детали, сформированной посредством АЭХХ

(рис. 4), показывают, что исходя из оптимальных значений режимов АЭХХ достигается минимально возможная величина массового износа  $(0,03-0,35) \times 10^{-3}$  кг (плотность тока 20 А/см<sup>2</sup>, давление разжима брусков 0,3–0,6 МПа). Увеличение или уменьшение значений обеспечивает некоторый прирост значений массового износа, достигая величин  $0,08-0,09 \times 10^{-3}$  кг (рис. 5), что в



**Рис. 4.** Результаты стендовых трибологических испытаний образцов после методов АЭХХ и гальванического хромирования (9–70 мкм): ( $P$  – удельное давление режима брусков, МПа): 1 – колодка Ст50, кольцо 30ХН2МФА; 2 – колодка-ХН2МФА, кольцо 30ХН2МФА.  $\square$   $P = 0,4$  МПа;  $V_{\text{вп}}/V_{\text{вр}} = 0,2$ ;  $P_3 = 6$  МПа;  $\blacksquare$   $P = 0,9$  МПа;  $V_{\text{вп}}/V_{\text{вр}} = 0,6$ ;  $P_3 = 11$  МПа;  $\circ$   $P = 0,5$  МПа;  $V_{\text{вп}}/V_{\text{вр}} = 0,3$ ;  $P_3 = 5$  МПа;  $\times$   $P = 0,6$  МПа;  $V_{\text{вп}}/V_{\text{вр}} = 0,3$ ;  $P_3 = 6$  МПа.

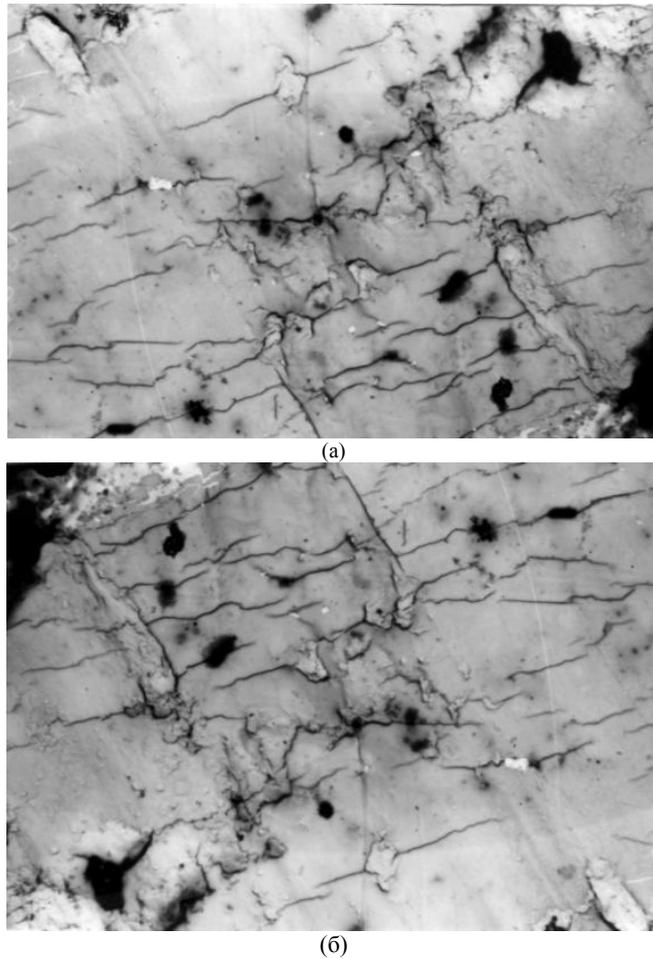


**Рис. 5.** Результаты стендовых испытаний образцов из стали 35ХН2МФАШ в условиях циклического знакопеременного изгиба, подверженных методу алмазно-электрохимического хонингования и гальванического хромирования (70 мкм): 1 – 30 А/см<sup>2</sup>;  $V_{\text{возвратно-поступат}}/V_{\text{вращательн.}} = 0,21$ ; 2 – 15 А/см<sup>2</sup>;  $V_{\text{вр}}/V_{\text{в.п.}} = 0,18$ ; 3 – 40 А/см<sup>2</sup>;  $V_{\text{вр}}/V_{\text{в.п.}} = 0,2$ ; 4 – 20 А/см<sup>2</sup>;  $V_{\text{вр}}/V_{\text{в.п.}} = 0,2$ ; 5 – 25 А/см<sup>2</sup>;  $V_{\text{вр}}/V_{\text{в.п.}} = 0,22$ ; 6 – 35 А/см<sup>2</sup>;  $V_{\text{вр}}/V_{\text{в.п.}} = 0,19$ .

большой степени определяется долевым участием механического съема, анодного растворения.

Аналогичный характер взаимодействия иллюстрируется при изучении фрактограмм (рис. 6) износа поверхностей. Показано, что преобладающими видами изнашивания поверхностей являются когезионно-адгезионные явления, формирующие совокупность светлых и темных зон на поверхности колодки. Отклонение значений режимов метода от установленного диапазона (плотность тока 20–30 А/см<sup>2</sup>, удельное давление режима брусков 0,4–0,5 МПа) (рис. 1) определило ряд закономерностей изменения долговечности образцов в условиях циклического

знакопеременного изгиба (рис. 5). Показано, что наибольшей долговечностью обладают по сравнению со штатным технологическим методом образцы, обеспечивая прирост на 6–10% при изготовлении последних на плотностях тока 20–30 А/см<sup>2</sup>. Выход по значениям плотности тока из установленного интервала снижает долговечность. Наиболее целесообразно для АЭХХ применение алмазного инструмента типа АСР80/63Р9/Р11ТУ037-20077Е. Выделенный режимный диапазон параметров АЭХХ обеспечивает выполнение установленных величин ударной вязкости, что свидетельствует о долговечном стабильном функционировании образцов и деталей, подверженных действию



**Рис. 6.** Фрактограмма образцов, прошедших стендовые трибологические испытания. Поверхность обрабатывалась методом алмазно-электрохимического хонингования и гальванического хромирования ( $\times 460$ ): (а) – АЭХХ (ГХ 70 мкм) –  $j = 25 \text{ A/cm}^2$ ;  $P = 0,5 \text{ МПа}$ ; (б) – АЭХХ (ГХ 70 мкм) –  $j = 18 \text{ A/cm}^2$ ;  $P = 0,3 \text{ МПа}$ .

АЭХХ. Интенсивное сглаживание и наличие эффекта упрочнения определяет работоспособность деталей в диапазоне температур с верхней границей в  $930 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 1).

В результате реализованного комплекса исследований необходимо отметить, что:

- достигнут высокий уровень макро- и микрогеометрической точности (0,01–0,03 мм; 0,2–0,4 мкм);
- сформирован сжимающий характер эпюры внутренних напряжений, максимальные значения которых составляют диапазон  $-100 \dots -400 \text{ МПа}$  при глубине залегания до 0,4 мм;

- распределение твердости оценивается максимальными значениями  $5-8 \times 10^3 \text{ МПа}$  и  $2-3 \times 10^3 \text{ МПа}$  для стали 50А;

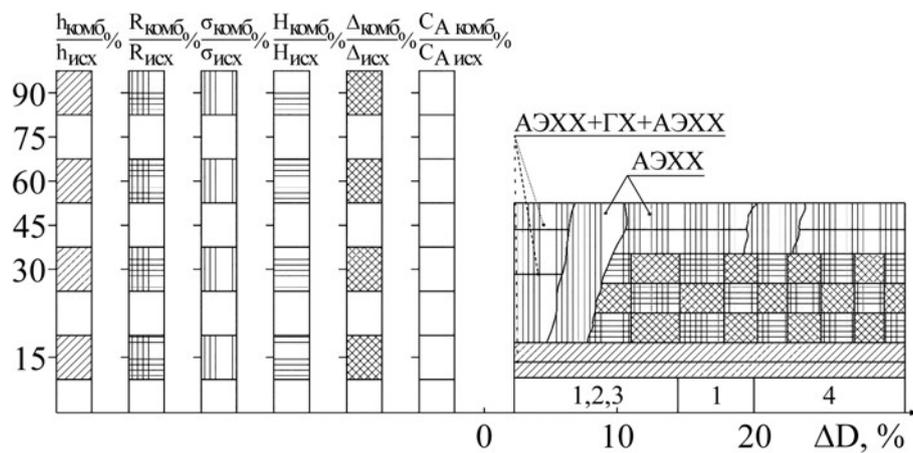
- структурные и фазовые особенности в формировании поверхностного слоя по сравнению с основным материалом не обнаружены, в результате исследований выделены диапазоны режимов, приведенные ниже;

- стендовые трибологические испытания показали повышение износостойкости на 5–10% при совмещенном механизме когезионно-адгезионного изнашивания;

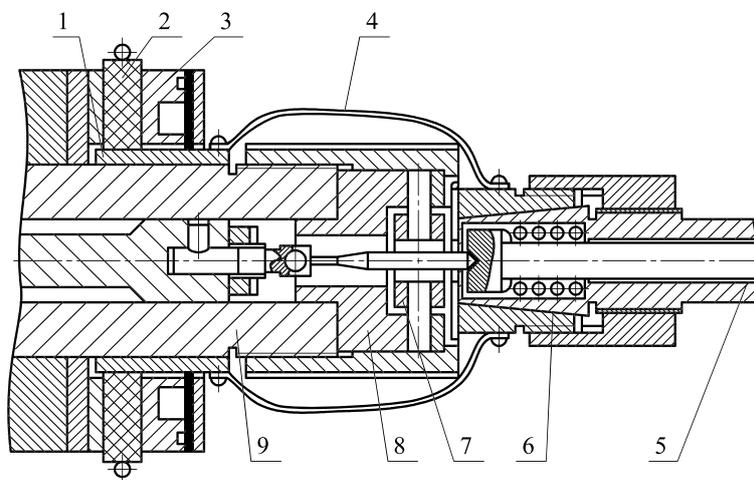
- долговечность в условиях циклического нагружения образцов в среднем повышена на 5–10%, что определяет увеличение последнего в совокупности с обеспечением требуемого интервала значений ударной вязкости, температура  $930 \text{ }^\circ\text{C}$  определяет верхнюю границу надежного функционирования деталей;

- по результатам проведенных исследований получены следующие диапазоны режимов метода АЭХХ: плотность тока – 20–30 А/см, удельное давление разжима брусков – 0,4–0,5 МПа, давление электролита – 6–8 МПа, соотношение скоростей возвратно-поступательного и вращательного движений – 0,2–0,3, алмазный инструмент АСР 80/63Р9/Р11ТУ037-20077Е.

Апробация методов алмазно-электрохимического хонингования и гальванического хромирования осуществлялась для сталей 30ХГСА, 30ХН2МФА, 35ХН2МФАШ, 23ХГС2МФАЛУ, Ст.50А. Диапазоны изменения шероховатости и геометрической точности составляли соответственно 0,2–0,3 мкм и 0,01–0,02 мм. Эти результаты формируются в условиях оптимальных значений плотности тока,



**Рис. 7.** Обобщенный анализ возможностей комбинированного метода АЭХХ и комбинированного метода АЭХХ и гальванического хромирования (ГХ) по результатам экспериментальных исследований ( $D$  – прирост долговечности в %): 1 – испытания в условиях контактного износа; 2 – испытания в условиях циклического знакопеременного изгиба; 3 – термциклические испытания; 4 – испытания по определению осыпаемости гальванического покрытия.



**Рис. 8.** Узел крепления инструмента и подвода к нему тока: 1 – узел крепления инструмента; 2 – кожух; 3 – патрон; 4 – токоподводы; 5 – инструмент; 6 – пружина; 7 – кардан; 8 – полушфута; 9 – шпindelь.

продолжительности метода, удельных давлений разжима брусков, разновидностей применяемых инструментов. Изменение твердости поверхностного слоя и эпюры внутренних остаточных напряжений подтверждают режимные диапазоны выбранных в ходе макро- и микрогеометрических исследований. Получены следующие диапазоны прироста твердости:  $16,6\text{--}17,9 \times 10^3$ . Характер распределения внутренних остаточных напряжений в поверхностном слое  $0,1\text{--}0,4$  мм определяется разновидностью применяемого абразивного инструмента. Наибольшие значения внутренних остаточных напряжений  $\text{--}50\text{--}400$  МПа устанавливаются в условиях применения брусков типа 15AM50Ст1Б. Следует отметить, что абразивные бруски на эластичной связке (P9/P11) с зернистостью 120/80; 80/63 приближают зону внутренних остаточных напряжений к эпюре, образуемой названной разновидностью абразивных брусков. Применяемые зернистости абразивных брусков типа 20/14, 40/28 обеспечивают достижение гораздо меньших значений остаточных напря-

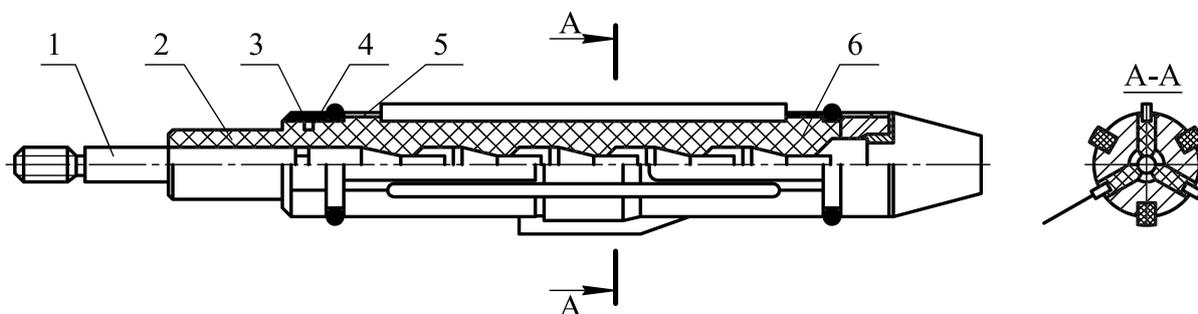
жений, создавая в отдельных областях растягивающие напряжения. Одновременно с этим показано, что наиболее приемлемыми значениями плотностей тока является диапазон  $20\text{--}30$  А/см<sup>2</sup> при величине удельных давлений  $0,3\text{--}0,4$  МПа. Выбор типа абразивного инструмента определяет продолжительность выхаживания, эффективность упрочнения поверхностного слоя. Продолжительность выхаживания при этом оценивается диапазоном 6–8 с. На рис. 7 представлен обобщенный анализ возможностей комбинированного метода АЭХХ и комбинированного метода АЭХХ и гальванического хромирования по результатам экспериментальных исследований ( $D$  – прирост долговечности в %).

#### ПРОМЫШЛЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АЭХХ

Создание промышленного оборудования для АЭХХ [5, 6] базируется на результатах исследований, которых изложены в ряде работ,

**Таблица.** Основные данные вертикально-хонинговальных полуавтоматов, переоборудованных для АЭХХ

№ п/п	Характеристика	3821 (ЭХОИ-1)	3К82У	3М83
1	Наибольший диаметр хонингуемого отверстия, мм	80	125	200
2	Наибольшая глубина хонингуемого отверстия, мм	180	350	400
3	Расстояние от оси шпинделя до стенок камеры, мм: – боковых – передней – задней	300 170 150	300 300 250	
4	Высота камеры, мм	360	500	
5	Частота вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	400; 560; 800	100–630	90–240
6	Скорость возвратно-поступательного движения шпинделя, м/мин	0–16	3–18	
7	Способ раздвижения брусков	по заданной скорости	по заданному давлению	
8	Способ управления короткими ходами хона	ручной	электрический	
9	Контроль снимаемого припуска	по реле времени	по счетчику двойных ходов хона	
10	Система активного контроля размера	по положению частей механизма подачи		
11	Наибольший расход электролита, л/мин	120	200	
12	Наибольшая сила тока, А	1000	1500	
13	Габаритные размеры станка, мм	1950×2200×2400	2350×1210×3440	1660×1580×3812

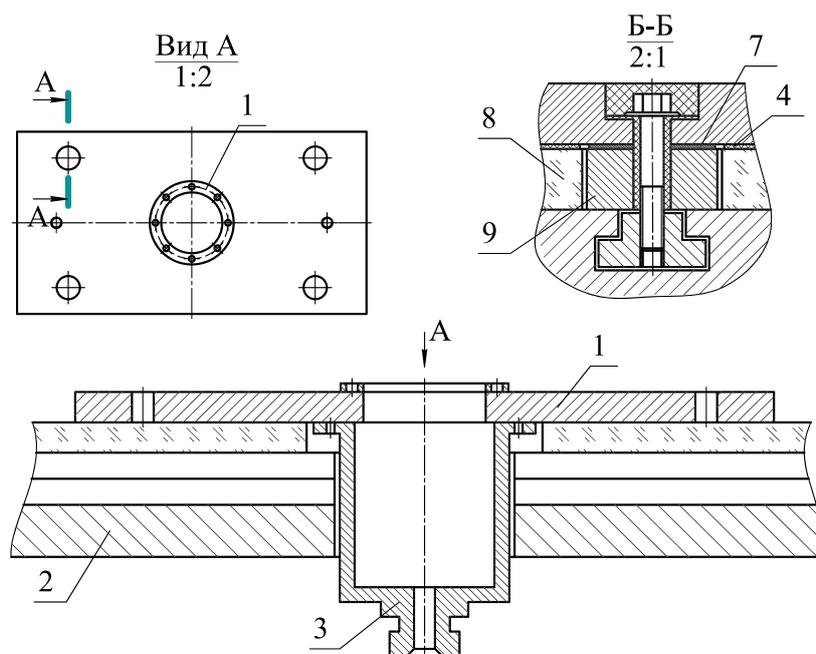


**Рис. 9.** Хон-инструмент. 1 – разжимной конус; 2 – корпус хона; 3 – резиновое кольцо; 4 – держатели брусков; 5 – направляющие; 6 – пружина.

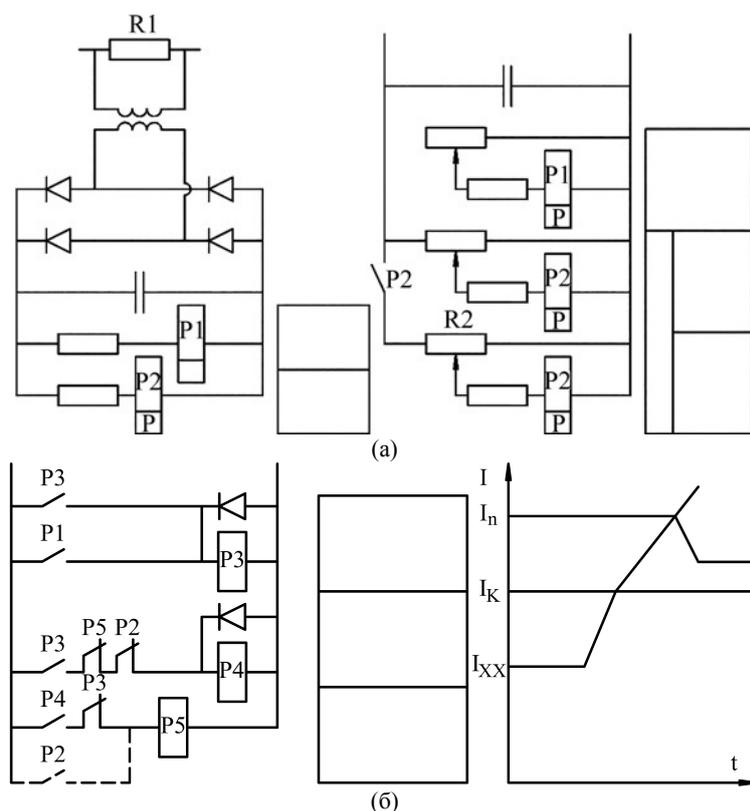
опубликованных в широко известных изданиях. В состав созданного оборудования для реализации АЭХХ входят модернизированные вертикально-хонинговальные полуавтоматы моделей 3М83, 3К82У, 3821, внешний вид модернизации которых защищен свидетельством на промышленный образец. Станки укомплектованы источниками питания серий ВАКГ и ИГЛУ. Оборудование используется по принципу встраивания в действующий технологический маршрут и создания специального участка (см. таблицу). В обоих случаях оборудование обеспечивается необходимой вентиляционной системой,

системой снабжения электролитом, установками для промывки и пассивации деталей. Станки оснащены рабочими камерами из органического стекла, что позволяет вести наблюдение за процессом и сводит к минимуму утечки тока.

Дверь камеры выполнена вращающейся на вертикальных петлях с резиновым уплотнением по периметру. Электролит, стекающий с дверцы при ее открывании, собирается в желобок и отводится на слив. Для простоты смены оснастки в стенках используется подача электролита снизу обрабатываемой детали. При такой схеме необходимо устройство, преграждающее путь потоку электролита из камеры в место отвода из



**Рис. 10.** Плита для установки, базирования и закрепления приспособлений: 1 – плита; 2 – стол; 3 – патрубок подвода электролита; 4 – масса; 5 – эпоксидный клей; 6 – винты; 7 – изоляционные прокладки; 8 – дно камеры; 9 – промежуточные опоры.



**Рис. 11.** Схема управления подачей хонинговальных брусков (а) и циклограммы изменения тока, потребляемого двигателем привода вращения шпинделя (б).  $I_{xx}$ ,  $I_k$ ,  $I_n$  – токи холостого хода срабатывания при касании перегрузки.

нее инструмента. Хорошие результаты дало использование для этой цели гидродинамического уплотнения, основанного на принципе отсечки электролита, движущегося из рабочей зоны вверх, вспомогательным потоком, направленным под углом  $110-130^\circ$  к первому. Для предохранения оборудования от случайных капель электролита, не задержанного

гидродинамическим уплотнением, предназначен быстроразъемный резиновый рукав, ограничивающий пространство между гидрозатвором и шпиндельной бабкой.

Чтобы гофрированный рукав при необходимости не закрывал доступ к узлу крепления инструмента 1 в патроне 3, он выполнен быстроразъемным, с использованием

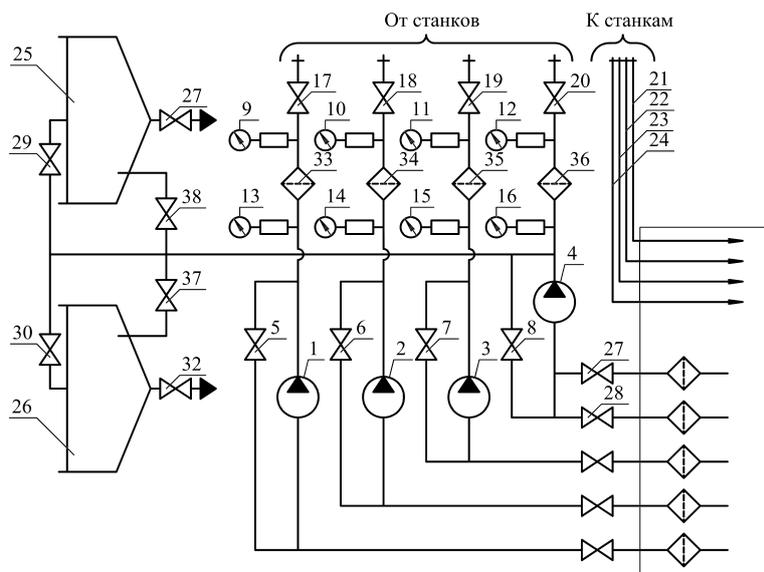


Рис. 12. Схема подачи и очистки электролита участка станков АЭХХ.

байонетного крепления кожуха 2 к корпусу щеткодержателя. Предложенная конструкция уплотнения надежно защищает оборудование от попадания на него электролита и позволяет использовать инструмент разного диаметра (рис. 9).

Для закрепления инструмента 5 (рис. 8) в шпинделе 9 и подвода к нему тока использован шарнирный патрон, соединенный гибкими проводниками 4 с коллектором, работающим в контакте с шестью медно-графитовыми щетками. Для снижения теплового режима работы в корпусе щеткодержателя выполнена кольцевая полость, по которой протекает вода. «Плавание» полумуфты, в которой закрепляется инструмент, обеспечивается ее шарнирным соединением с полумуфтой 8, выполненным в виде кардана 7 с зазорами между деталями 8 и 7, 7 и 6. Щетки установлены в щеткодержателе и прижаты к шпинделю пружинами 6. Медные пластины 4, служащие для подвода тока от источника питания, прикреплены к щеткам винтами. Для установки, базирования и закрепления приспособления (рис. 10) служит плита 1, электрически изолированная от массы станка и выполненная из стали 30Х13. Плита 1 закреплена на столе станка 2 винтами 6 (рис. 10) через промежуточные стальные опоры 9 и изоляционные прокладки 7, проходящие сквозь отверстия в дне камеры 8. Зазор между плитой и дном камеры заполнен массой 4. Не рекомендуется непосредственно устанавливать плиту на дно камеры из-за трудности ее выдержки и снижения жесткости конструкции. На закрепленной плите расточки под винты залиты эпоксидным клеем 5. 0,05 мм в радиальном направлении. Снизу к плите прикреплен патрубок подвода электролита

3, проходящий сквозь отверстие, вырезанное в столе (рис. 10). Подвод тока к заготовке осуществляется через отдельный контактный элемент приспособления, соединенный через гибкий проводник сквозь стенку камеры с кабелем источника питания.

Для АЭХХ со значительными погрешностями формы возникла необходимость в усовершенствовании системы радиальной подачи хонинговальных брусков, имеющейся на станке 3821. Управление подачей брусков на этом станке основано на принципе слежения за током, потребляемым электроприводом вращения шпинделя. При включении станка начинается ускоренное раздвижение брусков. При этом потребляемый ток минимален (рис. 11). В момент касания брусков с заготовкой ток увеличивается и сигнал с шунта R1 на фазе двигателя становится достаточным для срабатывания поляризованного реле P1. Реле P1 своими контактами замыкает цепь реле P3, которое включает реле P4, дающее команду на переход от ускоренной к дозированной ступенчатой радиальной подаче брусков, означающей начало хонингования.

Очистка электролита производится комбинированным способом – фильтрованием и отстаиванием. Химическим реагентом является техническое моющее средство ТМС-31 [6], добавляемое в электролит в количестве 0,02–0,4%, поднявшийся на поверхность шлам удаляется в конце смены (рис. 12).

Каждый из насосов 1–4 снабжает станки электролитом. Давление на выходе насосов регулируется вентилями 5–8 и контролируется по показаниям манометров 9–12. Степень засорения фильтров 33–36 определяется по

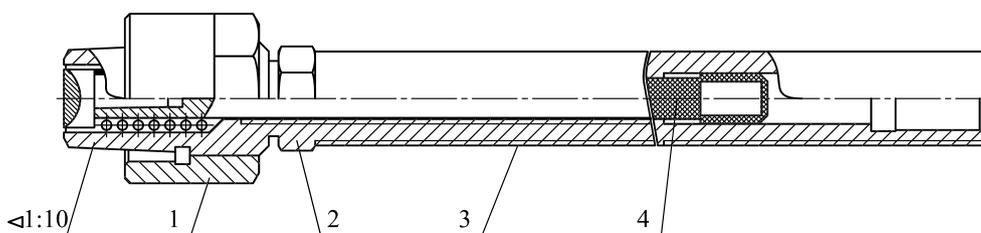


Рис. 13. Оправка для крепления хона-инструмента: 1 – гайка; 2 – штанга; 3 – эпоксидное изоляционное покрытие; 4 – толкатель.

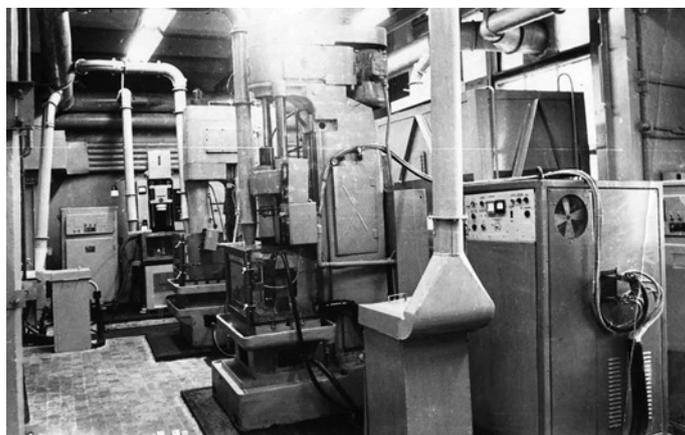


Рис. 14. Общий вид участка станков для АЭХХ.

разности показаний манометров 9–12 и 13–16. Вентили 17–20 могут перекрывать поступление электролита к станкам и регулировать его подачу. Из рабочих камер станков электролит сливается в ванну через трубопроводы 21–24. После накопления в ванне шлама производится перекачка насосом 4 загрязненного раствора из ванны в незаполненный отстойник 25. Для этого закрываются вентили 8, 20, 27, 30 и открываются вентили 28, 29. Заполнение ванны очищенным электролитом производится самотеком из отстойника 26 при открытых вентилях 8, 27, 38. Для удаления осадка служат вентили 31, 32.

Основные данные системы снабжения электролитом:

- объем ванны, м<sup>3</sup> – 2,5;
- объем отстойников, м<sup>3</sup> – 2 × 2,5;
- подача одного насоса, л/мин – 200;
- давление электролита, МПа – 6.

Станки, объединенные с централизованной системой снабжения электролитом и источниками питания, образуют установки, позволяющие работать в наладочном и полуавтоматическом режимах. Наладочный режим предназначен для проведения опытных работ. Он позволяет включать и отключать возвратно-поступательное движение шпинделя и вращение шпинделя.

Подача очищенного электролита производится из отстойника 26 при открытых кранах 8, 27, 38. Для удаления осадка служат вентили 31, 32. Применение метода алмазно-электрохимического хонингования

(в совокупности с технологическим методом гальванического хромирования) применительно к деталям машин типа тел вращения способствуют повышению долговечности изделия на 10%. Такое достижение требуемого уровня долговечности способствует получению более высоких показателей качества поверхностного слоя, а также повышению прочности накладываемого впоследствии гальванического хромового покрытия. На вышеописанных станках применяются специальные инструменты и приспособления, конструкции которых унифицированы и взаимозаменяемы, а режимы представлены в [таблице](#). Инструментом является хон с оправкой ([рис. 13](#)).

Оправка состоит из латунной штанги 2 ([рис. 13](#)) с эпоксидным изоляционным покрытием 3. Применение нержавеющей стали для изготовления штанги нежелательно из-за низкой электропроводности. Коническим хвостовиком штанга устанавливается в патрон и крепится гайкой 1. Толкатель 4 связывает механизм подачи брусков с разжимным конусом хона.

Для предохранения патрона от попадания в него сквозь штангу электролита, находящегося под избыточным давлением в зоне обработки, сопряжение корпус хона 2–разжимной конус 1 уплотнено резиновым кольцом 3 ([рис. 9](#)). Основной расчетной величиной при проектировании хона является длина его катодного участка, выбираемая в соответствии

со справочными данными. Наибольшей прочностью обладает также изоляционное покрытие из терморективного материала АГ-4В на основе фенолформальдегидной смолы и стекловолокна в качестве наполнителя. Покрытие наносится методом литьевого прессования. Для улучшения прочности АГ-4В с деталью на последней рекомендуется выполнять рифления сетчатой накаткой и высверливать отверстия. Покрытие из АГ-4В обладает пределом прочности на изгиб не менее 120 МПа и ударной вязкостью не менее 30 МПа/мм. Ограничители зазора с позиций теории трения и износа желательнее изготавливать из материалов высокой твердости. Однако попытки выполнять ограничители из окисной керамики или поликристаллических сверхтвердых материалов оказались неудачными, так как при контакте ограничителей с обрабатываемой поверхностью на ней образовывались царапины и ухудшалась шероховатость. Поэтому хоны снабжены ограничителями из пластмассы типа «Синтек-2» [5]. Работоспособность хона зависит от точности изготовления и применяемых материалов. Силовые элементы хона (корпус, разжимной конус, клиновые колодки) изготовлены из стали 30Х13, а посадки подвижных соединений выполнены по 7–8 квалитетам точности.

Механические приспособления для АЭХХ спроектированы с учетом особенностей их эксплуатации. За период простоев в зазорах подвижных соединений происходит отложение солей. Чтобы приспособления сохраняли подвижность, в них не применяют точные ходовые посадки, а площадь поверхности сопряжения принимается минимальной. Для защиты контактных поверхностей, находящихся в электролите, приняты следующие меры:

- подвод тока к заготовке осуществляется при помощи легко заменяемого специального контактного элемента, входящего в состав приспособления;

- исключено протекание тока в местах сопряжения приспособления с заготовкой, особенно по базирующим поверхностям.

Участок станков АЭХХ представлен на рис. 14. Участок состоит из двух модернизированных станков 3К82 и двух модернизированных станков 3821. С помощью созданного оборудования для АЭХХ на участке изготавливались детали шести наименований.

## ВЫВОДЫ

Задачи внедрения и оценки технико-экономической эффективности АЭХХ приобретают особую актуальность ввиду острого

дефицита трудовых ресурсов, низкой производительности традиционных технологических методов, в связи с применением высокопрочных, трудно обрабатываемых материалов и сплавов. Эффект от выполнения комплекса работ по созданию, применению АЭХХ для повышения и стабилизации долговечности деталей машин заключается в снижении трудоемкости, повышении производительности труда, высвобождении рабочей силы, сокращении затрат на инструмент, оснастку, потери от брака, материалы, испытания, восстановление деталей машин на всех стадиях их производства. Внедрение АЭХХ обеспечило ликвидацию монотонного, вредного труда в условиях, не отвечающих требованиям техники безопасности. Следует отметить также резкое улучшение условий труда, бытовых помещений, так как проводимая реконструкция участков имела целью создание комфортных условий работы и отдыха операторов и обслуживающего персонала. Все это приводит к созданию необходимых условий сознательного труда для получения высококачественных видов продукции. Внедрение промышленного участка АЭХХ обеспечивает макро- и микрогеометрическую точность (повышение 15–20%), снижение осыпаемости гальванического хромового покрытия на 2–3%, распределение твердости (увеличение на 10–15%), эпюры внутренних остаточных напряжений (увеличение на 5–10%) создают повышение долговечности (на 8–10%) в условиях циклических нагрузок. Применение АЭХХ обеспечивает оптимизацию качественных показателей поверхностей деталей машин, что в конечном итоге определяет повышение и стабилизацию долговечности деталей машин.

Одновременно с решением перечисленных проблем, связанных со снижением затрат по статьям себестоимости, следует указать следующие аспекты их решения:

- улучшены санитарно-экономические условия рабочих мест и условий труда;

- созданы специализированные участки с оригинальным АЭХХ оборудованием;

- внедренные участки оборудованы централизованной системой сбора и утилизации отработанного электролита.

Вышеназванные результаты выполненной работы нашли отражение в реализации следующих показателей:

- достигнуто общее снижение трудоемкости на 7300 нормо-часов;

- обеспечена экономическая эффективность от внедрения АЭХХ в размере 20 млн рублей;

- обеспечено повышение долговечности деталей машин на 5–10 %.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Янюшкин, А.С., *Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей*. Братск: ГОУВПО «БрГУ», 2009. 228 с.
2. Попов, А.И., Свириденко, Д.С., Комаров, Ю.Ю., Комбинирование алмазно-электрохимического хонингования и гальванического хромирования, *Мир транспорта*, 2018, т. 16, № 3, с. 86.
3. Usov, S.V., Davydenko, P.A. and Sviridenko, D.S., General patterns in formation of surface layer of machine parts treated by combined electro-technological methods, In: Radionov, A., Kravchenko, O., Guzeev, V., Rozhdestvenskiy, Y. (eds) *Proc. 5th Int. Conf. on Industrial Engineering (ICIE 2019). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, p. 931. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1\\_99](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_99)
4. Тимофеев, Ю.С., Усов, С.В., Пушкарев, В.А., Китаев, Ю.В., Щербанюк, Г.З., Электролит для электрохимического хонингования, Авторское свидетельство SU 859099, 1981. Бюл. № 30.
5. Usov, S.V., Design principles of combined electro-technological methods and their subsequent industrial applications, *Proceeding of the 9th international symposium for electromashinig*, CIRP, Japan, 1989, p. 163.
6. Усов, С.В., Тимофеев, Ю.С., Пушкарев, В.А., Китаев, Ю.В., Электрохимический хонинго-

вальный станок, Свидетельство на промышленный образец № 10542, 1981. Бюл. № 24.

## Summary

The method of diamond-electrochemical honing (DEH) is a finishing method that provides the required characteristics of the surface roughness, the distribution of the residual surface stress diagrams, which ultimately ensures the formation of a high-strength electroplated coating. This article presents studies of changes in the surface roughness, the residual stresses, and other parameters depending on the selected DEH modes for the parts made of steels 30KhGSA, 30KhN2MFA, 35KhN2MFASH, 23KhGS2MFALU, and St. 50A. The article presents the design of the instrument-honing; with the solution of the issue of the geometric characteristics of the cathode part, the insulating coating and the material of the hone tool guides. The regime support of the DEH was formed on the base of the studies whose results of are given in the article. The selected kinematic-geometric indicators of the hone-tool – a workpiece system make it possible to form the drives of the DEH equipment. The optimal composition of the DEH electrolyte was chosen with the creation of an electrolyte storage and a supply system. The article contains the results that demonstrate the effect of DEH on the reliability and durability of the parts subjected to the use of this method. The data on the technical and economic efficiency of the created industrial site of DEH are presented.

*Keywords:* diamond-electrochemical honing, galvanic chrome plating, hone-tool, electrolyte, equipment, durability

# Влияние параметров прижимной пластины на эффективность электрогидравлического деформирования жестко заземленной заготовки

**В. М. Косенков**

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: [v.m.kosenkov@gmail.com](mailto:v.m.kosenkov@gmail.com)*

Поступила в редакцию 31.08.2022

После доработки 05.06.2023

Принята к публикации 12.06.2023

На основе математического моделирования процесса электрогидравлической листовой штамповки исследовано влияние прижимной пластины на деформирование заготовки, жестко заземленной по ее внешнему контуру. Установлено влияние: толщины прижимной пластины и ее внутреннего диаметра, по отношению к диаметру полости цилиндрической разрядной камеры, на энергию пластического деформирования заготовки и форму ее прогиба; параметров прижимной пластины на давление гидродинамических волн на заготовку, форму ее прогиба и эффективность использования энергии, запасаемой в конденсаторной батарее, для пластического деформирования заготовки.

*Ключевые слова:* электрический разряд в воде, импульсное деформирование листовой заготовки, прижимная пластина, электрогидравлическая штамповка

УДК 621.7.044.4:621.98

<https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.4.65>

## ВВЕДЕНИЕ

На эффективность электрогидравлической штамповки (ЭГШ) листовых металлов влияют многие конструктивные элементы разрядной камеры и штампов [1–15]. Влияние параметров разрядной цепи [1, 2], объема разрядной камеры [3, 4], ее формы [5–7], типа матрицы [8–15] на ЭГШ исследовали в ряде работ, однако влиянию прижимной пластины на ЭГШ уделено недостаточно внимания. По-видимому, только в работе [7] приведена наиболее полная информация о существенном влиянии прижимной пластины на поле давления, действующее на лист металла, лежащий на плите с малыми отверстиями, однако процесс ЭГШ в целом не рассматривали, что определяет актуальность дальнейшего исследования.

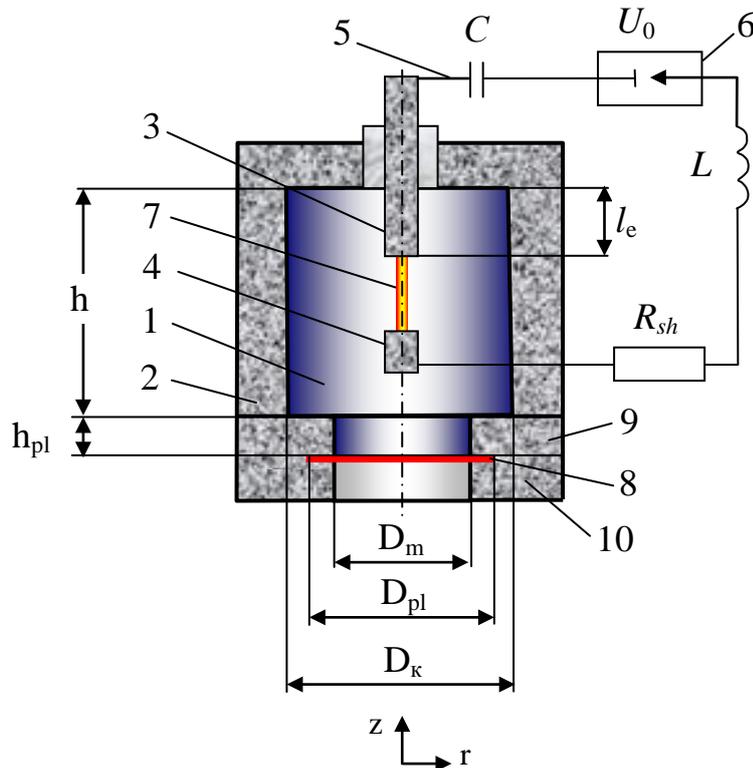
Цель данной работы – изучить влияние параметров прижимной пластины на эффективность процесса ЭГШ листовой заготовки.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Влияние параметров прижимной пластины на ЭГШ исследовали, используя схему, приведенную на рис. 1. Цилиндрическую полость 1 в корпусе разрядной камеры 2 характеризовали диаметром ( $D_k$ ) и высотой ( $h$ ). Оси высоковольтного 3 (длиной  $l_e$ ) и

низковольтного 4 электродов, между которыми формировался канал разряда, совпадают с осью камеры 2, что обеспечивает осевую симметрию поля давления и упрощает процесс его анализа, не препятствуя при этом обобщению полученных результатов.

Полость 1 разрядной камеры с жесткими стенками 2 заполнена водой. Высоковольтный 3 и низковольтный 4 электроды включены в разрядный контур 5, содержащий конденсаторную батарею емкостью  $C$  и воздушный разрядник 6. Элементы разрядного контура 5, кроме канала разряда 7, характеризуются активным сопротивлением  $R_{sh}$  и индуктивностью  $L$ . Конденсаторную батарею заряжали до напряжения  $U_0$ , после которого происходит замыкание цепи через разрядник 6 и напряжение подается на электроды 3 и 4. Под действием напряжения  $U_0$  происходит электрический пробой жидкости между электродами 3 и 4, который инициирует электрический разряд и образование канала разряда 7. Энергия, запасаемая в конденсаторной батарее емкостью  $C$ , выделяется в канале 7 и приводит к его расширению в результате повышения в нем давления. Вследствие этого в воде формируются и распространяются ударные волны, которые испытывают дифракцию на стенках разрядной камеры 2, электродах 3 и 4, а также на деформируемой пластине 8, жестко заземленной между прижимной пластиной 9 и



**Рис. 1.** Схема моделируемой системы: 1 – полость разрядной камеры, заполненная водой; 2 – корпус разрядной камеры; 3 – высоковольтный электрод; 4 – низковольтный электрод; 5 – разрядный контур; 6 – воздушный разрядник; 7 – канал разряда; 8 – деформируемая пластина (заготовка); 9 – прижимная пластина; 10 – матрица;  $C$  – емкость конденсаторной батареи;  $U_0$  – напряжение заряда конденсаторной батареи;  $L$  – индуктивность разрядного контура;  $R_{sh}$  – сопротивление элементов разрядного контура (без канала разряда).

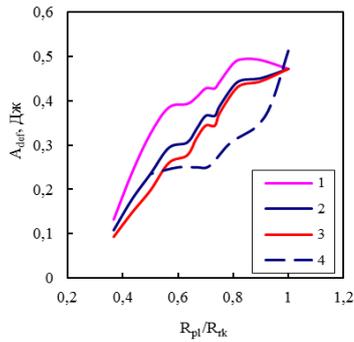
открытой кольцевой матрицей 10 внутренним диаметром  $D_m$ . Внутренний диаметр прижимной пластины толщиной  $h_{pl}$  принимали равным диаметру матрицы  $D_m$ . В результате взаимодействия образовавшейся системы волн происходят их интерференция и дифракция на деформируемой пластине 8, прижимной пластине 9 и канале разряда 7, а впоследствии на парогазовой полости, формируя переменное во времени поле давления в разрядной камере. При таких условиях поле давления в разрядной камере зависит от параметров  $D_m$  и  $h_{pl}$ , а также от прогиба пластины в процессе ее деформации под действием волн давления.

Основная задача данной работы состоит в определении влияния параметров прижимной пластины  $D_m$  и  $h_{pl}$  на энергию пластического деформирования плоской заготовки.

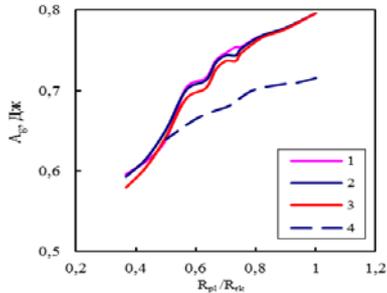
В процессе исследования полагали, что  $h = 120$  мм, а  $D_k$  и  $D_m$  варьировали от 60 до 120 мм. Расстояние между электродами ( $l = 30$  мм) и их диаметр ( $d_e = 16$  мм) оставались неизменными. Также постоянными оставались параметры разрядного контура. Емкость конденсаторной батареи ( $C$ ) равна 10 мкФ, индуктивность разрядной цепи ( $L$ ) – 9,3 мкГн, напряжение заряда батареи ( $U_0$ ) – 30 кВ, активное сопротивление элементов разрядного контура без канала разряда ( $R_{sh}$ ) – 0,09 Ом.

Учитывали, что инициирование разряда выполняли пробоем слоя воды между электродами после приложения к ним разности потенциалов  $U_0$ . Материал заготовки, толщиной 1,4 мм и диаметром  $D_m + 12$  мм, упругопластический с деформационным и скоростным упрочнением, имеющий характеристики высокопрочного сплава DP780. Заготовка жестко закреплена по ее внешнему контуру.

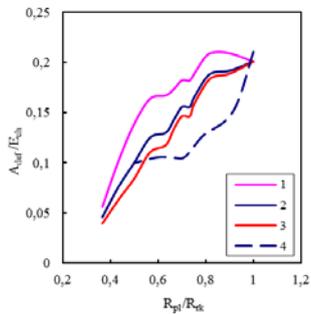
Для исследования использовали математическую модель электрического разряда в воде [16], в которой учтены процессы в разрядном контуре, канале разряда и окружающей его жидкости, заполняющей замкнутую разрядную камеру осесимметричной формы, а также деформирование пластины под действием волн давления в разрядной камере. Сравнение результатов, полученных по математической модели [16], с данными экспериментов [1, 2] показало их удовлетворительное согласование, что свидетельствует об адекватности математической модели [16] физическим явлениям, происходящим при электрическом разряде в воде, и возможности ее использования для решения задачи, поставленной в данной работе.



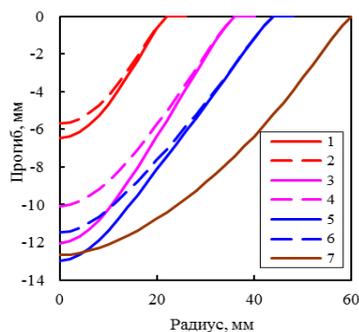
**Рис. 2.** Зависимость энергии пластического деформирования заготовки от относительного радиуса прижимной пластины при фиксированных параметрах: 1 –  $h_{pl} = 0$ ,  $D_k = 120$  мм; 2 –  $h_{pl} = 10$  мм,  $D_k = 120$  мм; 3 –  $h_{pl} = 20$  мм,  $D_k = 120$  мм; 4 –  $h_{pl} = 10$  мм,  $D_m = 60$  мм.



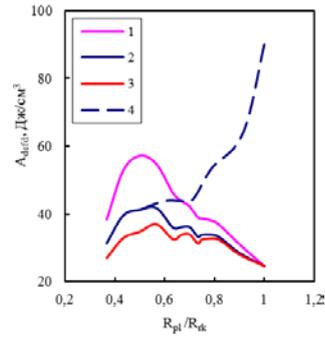
**Рис. 4.** Зависимость гидродинамической энергии расширения канала разряда от относительного радиуса прижимной пластины при фиксированных параметрах: 1 –  $h_{pl} = 0$ ,  $D_k = 120$  мм; 2 –  $h_{pl} = 10$  мм,  $D_k = 120$  мм; 3 –  $h_{pl} = 20$  мм,  $D_k = 120$  мм; 4 –  $h_{pl} = 10$  мм,  $D_m = 60$  мм.



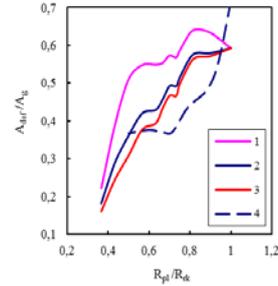
**Рис. 6.** Зависимость энергии пластического деформирования заготовки по отношению к энергии канала разряда от относительного радиуса прижимной пластины при фиксированных параметрах: 1 –  $h_{pl} = 0$ ,  $D_k = 120$  мм; 2 –  $h_{pl} = 10$  мм,  $D_k = 120$  мм; 3 –  $h_{pl} = 20$  мм,  $D_k = 120$  мм; 4 –  $h_{pl} = 10$  мм,  $D_m = 60$  мм.



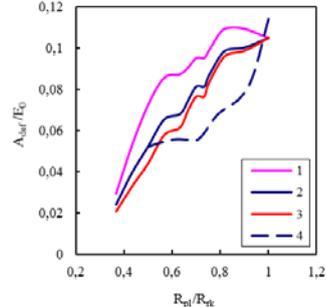
**Рис. 8.** Форма прогиба заготовки в диаметальной плоскости ( $D_k = 60$  мм). Сплошные линии –  $h_{pl} = 0$  мм, а штриховые –  $h_{pl} = 10$  мм. 1 и 2 –  $D_m = 44$  мм; 3 и 4 –  $D_m = 68$  мм; 5 и 6 –  $D_m = 84$  мм; 7 –  $D_m = D_k$ .



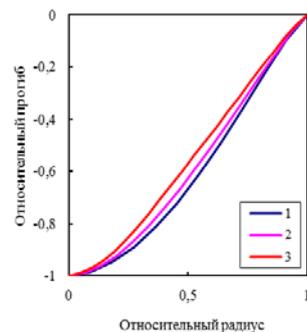
**Рис. 3.** Зависимость плотности энергии пластического деформирования заготовки от относительного радиуса прижимной пластины при фиксированных параметрах: 1 –  $h_{pl} = 0$ ,  $D_k = 120$  мм; 2 –  $h_{pl} = 10$  мм,  $D_k = 120$  мм; 3 –  $h_{pl} = 20$  мм,  $D_k = 120$  мм; 4 –  $h_{pl} = 10$  мм,  $D_m = 60$  мм.



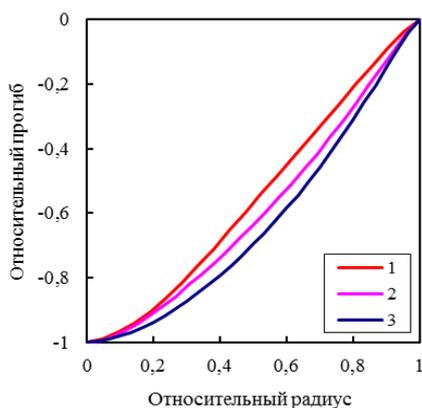
**Рис. 5.** Зависимость энергии пластического деформирования заготовки по отношению к гидродинамической энергии расширения канала разряда от относительного радиуса прижимной пластины при фиксированных параметрах: 1 –  $h_{pl} = 0$ ,  $D_k = 120$  мм; 2 –  $h_{pl} = 10$  мм,  $D_k = 120$  мм; 3 –  $h_{pl} = 20$  мм,  $D_k = 120$  мм; 4 –  $h_{pl} = 10$  мм,  $D_m = 60$  мм.



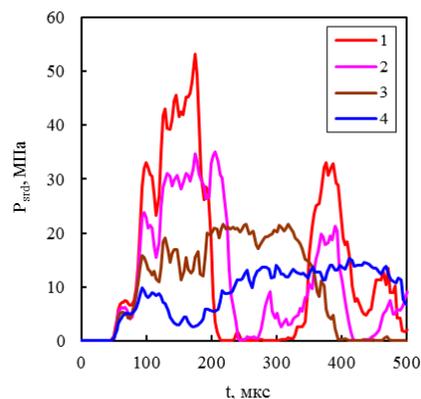
**Рис. 7.** Зависимость энергии пластического деформирования заготовки по отношению к энергии, запасаемой в конденсаторной батарее, от относительного радиуса прижимной пластины при фиксированных параметрах: 1 –  $h_{pl} = 0$ ,  $D_k = 120$  мм; 2 –  $h_{pl} = 10$  мм,  $D_k = 120$  мм; 3 –  $h_{pl} = 20$  мм,  $D_k = 120$  мм; 4 –  $h_{pl} = 10$  мм,  $D_m = 60$  мм.



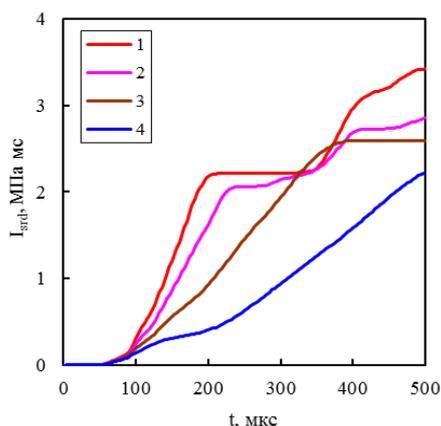
**Рис. 9.** Форма прогиба заготовки в диаметальной плоскости ( $h_{pl} = 10$  мм,  $D_k = 120$  мм). 1 –  $D_m = 44$  мм; 2 –  $D_m = 60$  мм; 3 –  $D_m = 80$  мм.



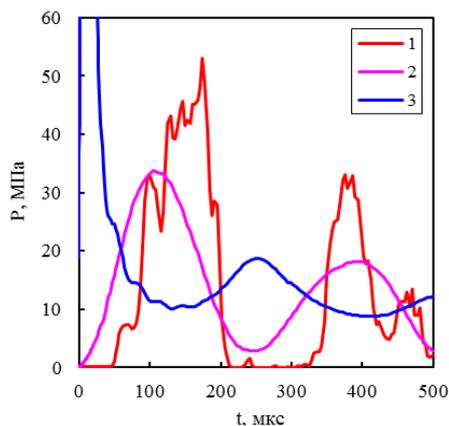
**Рис. 10.** Форма прогиба заготовки в диаметральной плоскости ( $h_{pl} = 10$  мм,  $D_k = 120$  мм). 1 –  $D_m = 80$  мм; 2 –  $D_m = 100$  мм; 3 –  $D_m = D_k$ .



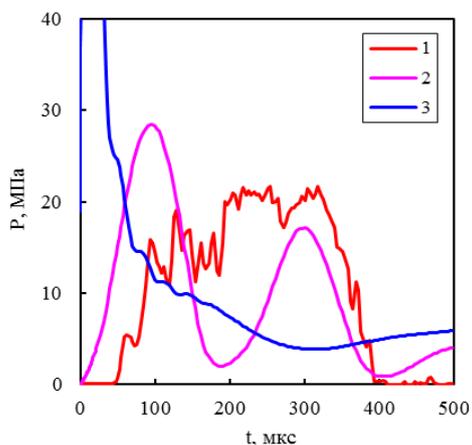
**Рис. 11.** Среднее давление гидродинамических волн на заготовку ( $h_{pl} = 10$  мм,  $D_k = 120$  мм). 1 –  $D_m = 44$  мм; 2 –  $D_m = 60$  мм; 3 –  $D_m = 80$  мм; 4 –  $D_m = D_k$ .



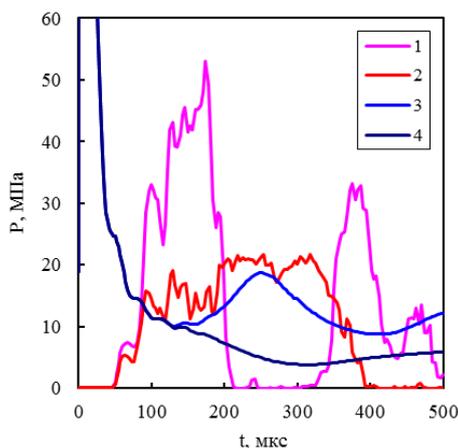
**Рис. 12.** Средний импульс давления гидродинамических волн на заготовку ( $h_{pl} = 10$  мм,  $D_k = 120$  мм). 1 –  $D_m = 44$  мм; 2 –  $D_m = 60$  мм; 3 –  $D_m = 80$  мм; 4 –  $D_m = D_k$ .



**Рис. 13.** Сравнение среднего давления гидродинамических волн на заготовку 1 ( $h_{pl} = 10$  мм,  $D_k = 120$  мм,  $D_m = 44$  мм) со средним давлением в разрядной камере 2 и давлением в канале разряда 3.



**Рис. 14.** Сравнение среднего давления гидродинамических волн на заготовку 1 ( $h_{pl} = 10$  мм,  $D_k = 120$  мм,  $D_m = 80$  мм) со средним давлением в разрядной камере 2 и давлением в канале разряда 3.



**Рис. 15.** Сравнение среднего давления гидродинамических волн на заготовку 1 ( $D_m = 44$  мм) и 2 ( $D_m = 80$  мм) с давлением в канале разряда 3 ( $D_m = 44$  мм) и 4 ( $D_m = 80$  мм).  $h_{pl} = 10$  мм;  $D_k = 120$  мм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование влияния параметров прижимной пластины на характеристики процесса деформирования заготовки наиболее наглядно можно представить в зависимости от относительного радиуса прижимной пластины

$R_{pl}/R_{rk}$  ( $R_{pl} = D_m/2$ ,  $R_{rk} = D_k/2$ ) при прочих фиксированных параметрах.

Увеличение относительного радиуса  $R_{pl}/R_{rk}$  от 0,35 до 1 при  $D_k = 120$  мм приводит к пятикратному увеличению энергии пластического деформирования заготовки ( $A_{def}$ ) (рис. 2). Изменение  $A_{def}$  существенно зависит от

$h_{pl}$ . В наибольшей степени влияние  $h_{pl}$  проявляется при его значениях, близких к нулю (рис. 2, линия 1), когда увеличение  $R_{pl}/R_{rk}$  от 0,35 до 0,55 приводит к изменению  $A_{def}$  в 4 раза, а увеличение  $R_{pl}/R_{rk}$  от 0,55 до 1 повышает  $A_{def}$  только на 20%. Увеличение  $h_{pl}$  до 10 мм и 20 мм приводит к зависимости  $A_{def}$  от  $R_{pl}/R_{rk}$ , которая близка к линейной (рис. 2, линии 2 и 3). При  $D_m = 60$  мм изменение  $R_{pl}/R_{rk}$  происходит за счет изменения  $D_k$ . В таком случае зависимость  $A_{def}$  от  $R_{pl}/R_{rk}$  приобретает вид, показанный на рис. 2 (линия 4). Увеличение  $D_k$  приводит к уменьшению  $A_{def}$  в 2 раза.

Зависимости плотности энергии деформирования заготовки ( $A_{defd}$ ) от  $R_{pl}/R_{rk}$  при фиксированных  $D_k$  и  $D_m$  радикально отличаются (рис. 3). При постоянном  $D_k = 120$  мм зависимость  $A_{defd}$  от  $R_{pl}/R_{rk}$  имеет максимум вблизи  $R_{pl}/R_{rk} = 0,5$ , а при постоянном  $D_m = 60$  мм экстремума нет и  $A_{defd}$  больше до 2 раз по сравнению с постоянным  $D_k = 120$  мм. В первом случае экстремум в зависимости  $A_{defd}$  от  $R_{pl}/R_{rk}$  возникает за счет увеличения объема заготовки с увеличением  $D_m$  при малом изменении плотности энергии в разрядной камере, а во втором случае  $A_{defd}$  увеличивается за счет повышения плотности энергии в разрядной камере при уменьшении  $D_k$ . Уменьшение  $h_{pl}$  от 20 мм до 0 дает увеличение  $A_{defd}$  до 1,5 раза.

Гидродинамическая энергия расширения канала разряда ( $A_g$ ) существенно зависит от  $R_{pl}/R_{rk}$  (рис. 4). Изменение  $R_{pl}/R_{rk}$  от 0,35 до 1 приводит к увеличению объема прогиба заготовки, что обеспечивает больший объем расширения канала разряда и, соответственно, увеличение  $A_g$  на 30%, если  $D_k = 120$  мм, и на 20%, когда  $D_m = 60$  мм. Величина  $A_g$  в малой степени зависит от  $h_{pl}$  при фиксированном соотношении  $R_{pl}/R_{rk}$  (рис. 4). Изменение  $R_{pl}/R_{rk}$  от 0,35 до 1 увеличивает часть энергии  $A_g$ , используемой для  $A_{def}$  от 15 до 70% (рис. 5), и в этом случае величина  $h_{pl}$  существенно влияет на  $A_{def}/A_g$ , уменьшая это соотношение до 1,5 раза при увеличении  $h_{pl}$  от 0 до 20 мм. При этом  $A_{def}$  составляет от 4 до 22% от энергии, выделившейся в канале разряда ( $E_{ch}$ ) (рис. 6) и от 2 до 11% по отношению к энергии, запасаемой в конденсаторной батарее ( $E_0$ ) (рис. 7).

Толщина прижимной пластины  $h_{pl}$  влияет на величину прогиба заготовки и в малой степени изменяет ее форму (рис. 8). Уменьшение  $h_{pl}$  от 10 до 0 мм увеличивает прогиб заготовки вблизи ее полюса до 20%, что приводит к увеличению  $A_{def}$ .

Изменение  $D_m$  влияет на величину прогиба заготовки (рис. 8) и ее форму (рис. 9, 10). С увеличением  $D_m$  возрастает прогиб заготовки и объем ее прогиба (рис. 8). Форма прогиба

заготовки при изменении  $D_m$  от 44 до 80 мм приобретает более заостренный профиль (рис. 9), а изменение  $D_m$  от 80 до 120 мм приводит к более пологому профилю (рис. 10).

Прогиб заготовки и давление гидродинамических волн на ее поверхность взаимозависимы. Увеличение скорости прогиба заготовки приводит к уменьшению давления жидкости на ее поверхность. Изменение  $D_m$  прижимной пластины также влияет на давление жидкости на заготовку, так как изменяет форму и площадь жестких поверхностей разрядной камеры (рис. 11). Когда  $D_m$  намного меньше, чем  $D_k$ , тогда среднее давление на поверхность заготовки состоит из серии импульсов, в промежутке между которыми возникает кавитация воды, при которой давление на заготовку уменьшается до давления насыщенного пара (практически до нуля) (рис. 11, линии 1 и 2). Увеличение  $D_m$  повышает длительность давления на заготовку и уменьшает амплитуду давления. При этом средний импульс давления гидродинамических волн на заготовку возрастает медленнее (рис. 12).

Когда  $D_m$  намного меньше, чем  $D_k$ , тогда среднее давление гидродинамических волн на заготовку согласовано по фазе со средним давлением в разрядной камере и в противофазе с давлением в канале разряда (рис. 13), так как площадь поверхности заготовки намного меньше, чем площадь дна поверхности разрядной камеры. При увеличении  $D_m$  согласование среднего давления на заготовку со средним давлением жидкости в разрядной камере нарушается (рис. 14) вследствие увеличения влияния движения заготовки на гидродинамические процессы в разрядной камере. Среднее давление гидродинамических волн на заготовку согласуется в противофазе с давлением в канале разряда независимо от величины  $D_m$  (рис. 15).

## ВЫВОДЫ

Из проведенного исследования следует, что изменение параметров прижимной пластины  $D_m$  и  $h_{pl}$  (при фиксированных остальных параметрах исследуемой системы) существенно влияет на энергию пластического деформирования плоской заготовки и на профиль ее прогиба. Чем ближе  $D_m$  к  $D_k$  и меньше  $h_{pl}$ , тем больше энергия пластического деформирования заготовки и эффективность использования энергии, запасаемой в конденсаторной батарее. Увеличение  $R_{pl}/R_{rk}$  от 0,35 до 1 при  $D_k = 120$  мм приводит к пятикратному увеличению  $A_{def}$ . Увеличение  $D_k$  от 60 до 120 мм при  $D_m = 60$  мм приводит к уменьшению  $A_{def}$  в 2 раза.

В наибольшей степени влияние  $h_{pl}$  на  $A_{def}$  проявляется при его значениях, близких к нулю, когда увеличение  $R_{pl}/R_{rk}$  от 0,35 до 0,55 приводит к изменению  $A_{def}$  в 4 раза, а увеличение  $R_{pl}/R_{rk}$  от 0,55 до 1 повышает  $A_{def}$  только на 20%. Увеличение  $R_{pl}/R_{rk}$  от 0,35 до 1 вызывает увеличение эффективности использования гидродинамической энергии расширения канала разряда и парогазовой полости в 3 раза, энергии, выделившейся в канале разряда, – в 4 раза и энергии, запасаемой в конденсаторной батарее, – в 5 раз.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Наугольных, К.А., Рой, Н.А., *Электрические разряды в воде*. М.: Наука, 1971. 155 с.
2. Косенков, В.М., Бычков, В.М., Влияние индуктивности электрической цепи на энергетические характеристики разряда в воде и деформирования пластин, *Письма в ЖТФ*, 2017, т. 43, № 16, с. 102. doi: 10.21883/PJTF.2017.16.44939.16706
3. Чачин, В.Н., Шадуя, В.Л., Журавский, А.Ю., Здор, Г.Н., *Электрогидроимпульсное формообразование с использованием замкнутых камер*. Минск: Наука и техника, 1985. 200 с.
4. Косенков, В.М., Влияние объема цилиндрической разрядной камеры с жесткими стенками на поле давления в заполняющей ее воде, *ЭОМ*, 2022, № 2, с. 68. <https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.2.68>
5. Чачин, В.Н., Богоявленский, К.Н., Вагин, В.А., *Электрогидроимпульсная обработка материалов в машиностроении*. Минск: Наука и техника, 1987. 231 с.
6. Косенков, В.М., Влияние параметров конической полости разрядной камеры на эффективность электрогидравлической штамповки, *ЭОМ*, 2022, № 3, с. 55. <https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.3.55>
7. Жовноватюк, Я.С., Пути стабилизации и интенсификации полей нагружения ударными волнами при электрогидроимпульсной штамповке за счет конструктивных решений, *Авиационно-космич. техн. технол.*, 2011, т. 85, № 8, с. 15.
8. Мазуровский, Б.Я., Сизев, А.Н., *Электрогидравлический эффект в листовой штамповке*. Киев: Наукова думка, 1983. 192 с.
9. Mamutov, A.V., Golovashchenko, S.F., Bessonov, N.M. and Mamutov, V.S., Electrohydraulic forming of low volume and prototype parts: Process design and practical examples, *J. Manufact. Mater. Proces.*, 2021, vol. 5, no. 47. <https://doi.org/10.3390/jmmp5020047>
10. Cheng, J., Green, D.E. and Golovashchenko, S.F., Formability enhancement of DP600 steel sheets in electro-hydraulic die forming, *J. Mater. Proces. Technol.*, 2017, vol. 244, p. 178.
11. Mamutov, A.V., Golovashchenko, S.F., Mamutov, V.S. and Bonnen, J.J.F., Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts, *J. Mater. Proces. Technol.*, 2015, vol. 219, p. 84.
12. Hassannejadasl, A., Daniel, E.G., Golovashchenko, S.F., Javad, S., et al., Numerical modelling of electrohydraulic free-forming and die-forming of dp590 steel, *J. Manuf Process.*, 2014, vol. 16, no. 3, p. 391. doi: 10.1016/j.jmapro.2014.04.004.
13. Gillard, A.J., Golovashchenko, S.F. and Mamutov, A.V., Effect of quasi-static prestrain on the formability of dual phase steels in electrohydraulic forming, *J. Manuf. Process.*, 2013, vol. 15, № 2, p. 201. doi: 10.1016/j.jmapro.2012.12.005.
14. Golovashchenko, S.F., Gillard, A.J., Mamutov, A.V., Bonnen, J.F., et al., Electrohydraulic trimming of advanced and ultra high strength steels, *J. Mater. Proces. Technol.*, 2014, vol. 214, no. 4, p. 1027. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.09.003.
15. Косенков, В.М., Влияние способа деформирования листовых алюминиевых сплавов на увеличение пластических деформаций, *Письма о материалах*, 2014, т. 4, № 1, с. 18. doi: 10.22226/2410-3535-2014-1-18-21.
16. Kosenkov, V.M., Gas-vapor cavity effect on pressure field in deformable wall closed discharge chamber, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2022, vol. 58, p. 63. doi: 10.3103/s1068375522010057

#### Summary

On the base of the mathematical modeling of the process of electro-hydraulic sheet forging, a study was made of the influence of the pressure plate on the deformation of a rigidly clamped workpiece. The influence of the thickness of the pressure plate and its inner diameter, in relation to the diameter of the cavity of the cylindrical discharge chamber, on the energy of the plastic deformation of the workpiece and the shape of its deflection was studied. The significant influence of the parameters of the pressure plate on the pressure of hydrodynamic waves on the workpiece, the shape of its deflection and the efficiency of using the energy stored in the capacitor bank for plastic deformation of the workpiece were determined.

*Keywords:* electric discharge in water, pulse deformation of a sheet blank, pressure plate, electro-hydraulic stamping