The background of the cover features a series of overlapping, curved, translucent bands in shades of blue, green, yellow, and purple. In the upper left corner, there is a faint grid of small dots, with some dots highlighted in a light blue color.

СБОРНИК ДОКЛАДОВ XXII КОНФЕРЕНЦИИ ПО ФУНДАМЕНТАЛЬНЫМ И ПРИКЛАДНЫМ ПРОБЛЕМАМ ФИЗИКИ

(молодых ученых, аспирантов
и студентов)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физического материаловедения
Сибирского отделения Российской академии наук

СБОРНИК ДОКЛАДОВ
XXII КОНФЕРЕНЦИИ
ПО ФУНДАМЕНТАЛЬНЫМ
И ПРИКЛАДНЫМ
ПРОБЛЕМАМ ФИЗИКИ
(молодых ученых, аспирантов
и студентов)

Улан-Удэ
Издательство ИМБТ СО РАН
2025

УДК 53
ББК 365.36
С231

Ответственный редактор
доктор физико-математических наук *А. В. Номоев*

Сборник докладов XXII конференции по фунда-
C231 ментальным и прикладным проблемам физики: эл. изд. –
Улан-Удэ: Изд-во ИМБТ СО РАН, 2025. – 48 с.

ISBN 978-5-7925-0678-7

DOI 10.30792/978-5-7925-0678-7-2025-1-48

Содержит доклады молодых ученых, аспирантов и сту-
дентов физических специальностей вузов в области фунда-
ментальных и прикладных проблем физики.

УДК 53
ББК 365.36

ISBN 978-5-7925-0678-7

© ИФМ СО РАН, 2025
© Изд-во ИМБТ СО РАН, 2025
© Кол. авт., 2025

К. В. Артемьева, Ч. Ж. Гулгенов, И. Г. Симаков, С.Б. Базарова

Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АДсорбированной ВОДЫ С ПОМОЩЬЮ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

На границе твердой поверхности и воды образуется тонкий граничный слой, называемый межфазная вода, структура и свойства которой отличаются от объемной воды. Межфазная вода играет важную роль в различных областях науки и техники: микроэлектроника, медицина и др. [1,2]. Особый интерес вызывают диэлектрические свойства межфазной воды, т. к. позволяют получать информацию о ее молекулярной структуре, межмолекулярных взаимодействиях и механизмах молекулярных процессов. Частным случаем межфазной воды является адсорбированная на твердой поверхности вода.

Одним из наиболее перспективных методов исследования диэлектрических свойств адсорбированной воды является акустоэлектрический метод, в основе которого лежит явление распространения поверхностных акустических волн (ПАВ) в слоистой структуре: пьезоэлектрическая подложка – тонкий слой жидкости [3, 4]. Данное явление описывается следующими уравнениями:

$$-\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V_0 - V_s}{V_0} = \left(\frac{\rho_f}{\rho_s} \sqrt{1 - \frac{V_f^2}{V_s^2}} + \frac{\pi K^2 \varepsilon_p \varepsilon'}{(\varepsilon_p + 1)^2} \right) \cdot \frac{h}{\lambda}, \quad (1)$$

$$\alpha = \left(\frac{\beta \rho_f V_f}{\rho_s \sqrt{V_s^2 - V_f^2}} + \frac{\pi \omega K^2}{V_s} \frac{\varepsilon_p \varepsilon''}{(\varepsilon_p + 1)^2} \right) \cdot \frac{h}{\lambda}. \quad (2)$$

где V_0 и V_s – скорость распространения ПАВ на свободной поверхности пьезоэлектрика и в слоистой структуре, ρ_f и ρ_s – плотности

жидкости и твердого тела, ϵ_p - относительная диэлектрическая проницаемость пьезоэлектрика, ϵ' и ϵ'' - действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости жидкости; V_f - скорость звука в жидкости, h - толщина жидкого слоя, λ - длина поверхностной волны, K - коэффициент электромеханической связи, β - коэффициент ослабления звука в жидкости, который учитывает потери на вязкое трение и теплопроводность [Нп/см], $\omega = 2\pi f$ - круговая частота, α - коэффициент затухания ПАВ.

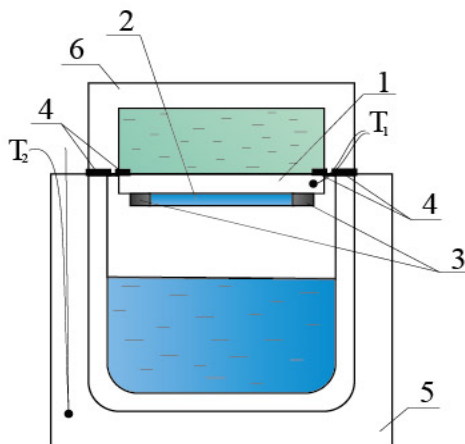


Рис. 1. Измерительная ячейка: 1 - пьезоэлектрическая подложка; 2 - адсорбированный слой воды; 3 - встречно-штыревые преобразователи; 4 - резиновые уплотнители; 5 и 6 - термостаты

Для определения диэлектрических характеристик адсорбированной воды используется измерительная ячейка (рис. 1) [3]. Измерительная ячейка представляет собой термостатированный замкнутый объем, в котором над поверхностью дважды дистиллированной воды размещалась подложка (1) из LiNbO_3 . Температура подложки задавалась и поддерживалась циркуляционным термостатом (6). В результате полимолекулярной адсорбции на поверхности подложки образуется тонкий слой жидкости (2). Толщина слоя h зависит от относительного давления пара p/p_s в зоне адсорбции, температуры и сродства с поверхностью (степени гидрофиль-

ности). Необходимое p/p_s в зоне адсорбции задавали, варьируя разность температур парообразующей жидкости (воды) T_2 и адсорбирующей поверхности T_1 . Для вычисления величины относительного давления пара в зоне адсорбции можно воспользоваться уравнением Клапейрона – Клаузиуса:

$$\ln \frac{p}{p_s} = \frac{Q_L}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)$$

где p_s – давление насыщенного пара в зоне адсорбции при температуре T_2 , Q и R – теплота испарения (конденсации) воды и газовая постоянная.

Регистрации малых возмущений затухания и скорости ПАВ происходит при помощи фазового интерференционного метода [5].

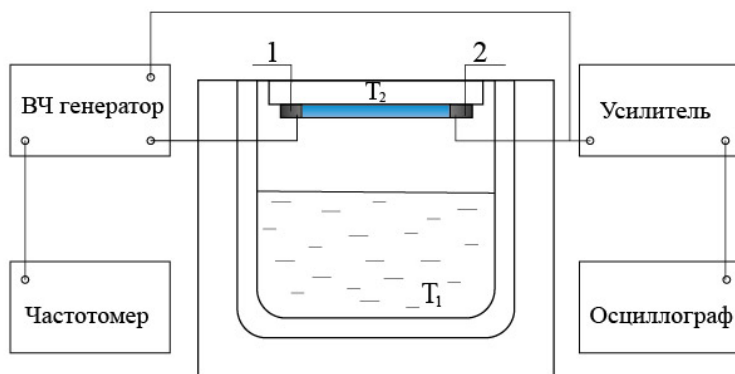


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – излучающий встречно-штыревой преобразователь; 2 – принимающий встречно-штыревой преобразователь

Блок-схема экспериментальной установке изображена на рис. 2. На излучающий преобразователь 1 подается сигнал с выхода генератора высокой частоты. Задержанный сигнал с приемного преобразователя 2 передается на вход усилителя. Одновременно на вход усилителя подается сигнал, ослабленный аттенюатором до амплитуды задержанного сигнала. Суммарный сигнал, пройдя усилитель, попадает на вход. В результате интерференции величина

суммарного сигнала зависит, как от соотношения фаз интерферирующих сигналов, так и соотношения их амплитуд. Баланс амплитуд достигается регулировкой аттенюатора, а баланс фаз перестройкой частоты генератора. Генератор настраивается на частоту интерференционного минимума. В результате адсорбции воды на поверхность звукопровода изменяются условия распространения ПАВ. Вследствие чего изменяется скорость и амплитуда ПАВ, и как следствие частота интерференционного минимума. Изменение частоты интерференционного минимума пропорционально изменению скорости ПАВ $\Delta f/f = \Delta V/V_0$.

Регистрируемые изменения акустических параметров ПАВ связаны с компонентами комплексной диэлектрической проницаемости следующим образом [3]:

$$\varepsilon' = \frac{(\varepsilon_p + 1)^2}{\pi K^2 \varepsilon_p} \left(\frac{\lambda(V_0 - V_s)}{hV_0} - \frac{\rho_f}{\rho_s} \sqrt{1 - \frac{V_f^2}{V_s^2}} \right), \quad (3)$$

$$\varepsilon'' = \frac{V_s(\varepsilon_p + 1)^2}{\pi \omega K^2 \varepsilon_p} \left(\frac{\lambda \alpha}{h} - \frac{\beta \rho_f V_f}{\rho_s \sqrt{V_s^2 - V_f^2}} \right). \quad (4)$$

где ε' и ε'' – действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости.

Таким образом, относительную диэлектрическую проницаемость адсорбированной воды можно определить, регистрируя изменения скорости и затухания поверхностной акустической волны.

Список литературы

1. Анисимкин В.И., Гуляев Ю.В., Анисимкин И.В. Метод поверхностных акустических волн: новые аналитические возможности // Поверхность. 2000. № 8. С. 3–9.
2. M. Bougrini, K. Tahri, Z. Haddi, N. El Bari et al. Aging time and brand determination of pasteurized milk using a multisensor e-nose combined with a voltammetric e-tongue // Materials Science and Engineering. 2014. № 45. P. 348-3583.

3. Симаков И.Г., Гулгенов Ч.Ж. Акустоэлектрические методы исследования жидкостей в граничной фазе. – Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, 2019. – 218 с.

4. Доржин Г.Б., Симаков И.Г. Акустическое исследование адсорбированных слоев жидкостей // Акуст. журн. 2002. Т. 48; № 4. С. 499–503

5. Симаков И. Г., Гулгенов Ч. Ж. Регистрация изменения амплитуды и скорости рэлеевских волн на поверхности пьезоэлектрика // Вестник БГУ. Химия. Физика. 2011. № 3.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ШУМОВ НА ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА НА БЕРЕГУ ОЗ. БАЙКАЛ

При измерении гидроэлектрокинетического эффекта очень важным фактором, влияющим на результаты измерений, является близость источников бытовой электросети.

При измерениях в 2024 года на пляже села Горячинск, в дополнении к традиционному используемому прибору Байкал 7HR [1], для проверки возможностей, был добавлен регистратор Zetlab. Отличием двух приборов заключалось в том, что у Zetlab отсутствует на аппаратном уровне ФНЧ. В то же время Zetlab обладает большим входным сопротивлением (100 кОм против 44 кОм – Байкал 7HR). К преимуществам Zetlab также можно отнести наличие 8 каналов, в то время как Байкал 7HR обладает 6 каналами.

Измерения проводились аналогично работам [2], но в качестве регистратора был использован Zetlab. В ходе пробных измерений, полученные сигналы были сильно зашумлены, что не давало возможности оценки динамики изменения напряжения изучаемого эффекта. Это объясняется наличием инфраструктуры в пляжной зоне, где соответственно присутствуют источники бытовой электросети. Таким образом, часть токов от электросети затекают во входные цепи регистратора. Данное обстоятельство требует дальнейшей постобработки, в частности применения цифровых фильтров

В процессе постобработки был построен спектр сигнала, который и отображает гармоники, являющиеся аддитивной помехой. На рисунке 1 изображен спектр сигнала, снятого с одного из электродов. В данном спектре присутствуют гармоника 50 Гц и нечетные ей (150, 250, 350, 450), которые и являются нежелательными при регистрации электрокинетического эффекта. Следующий шаг – применение цифрового ФНЧ с частотой среза около 38 Гц. Данная

частота выбрана в связи с тем, что такая же частота устанавливается у регистратора Байкал-7HR (при частоте дискретизации 100 Гц). После обработки форма сигнала приняла вид, которые отображает динамику изменения наблюдаемого эффекта.

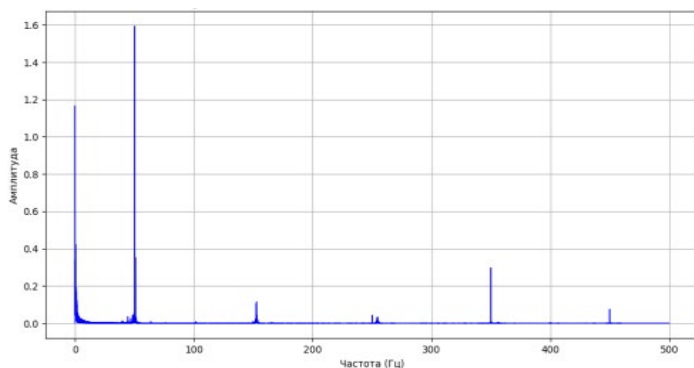


Рис. 1. Спектр сигнала с одного из электродов

Закключение. При измерениях электрокинетических явлениях возможное наложение аддитивной помехи, вследствие наличия бытовой сети вблизи точки измерений. Данный недостаток решается наличием встроенного ФНЧ как у Байкал-7HR. В то же время даже при отсутствии ФНЧ данная задача решается методами цифровой фильтрации на этапе постобработки, благодаря тому, что такого рода помехи носят аддитивный характер.

Список литературы

1. "Seismic signal recorder Baykal – 7 HR. Technical manual", 2011, http://rsensors.ru/1_products/Manuals/BY-7hr_Manual_en.pdf (07 June 2018).
2. Bashkuev Yu. B., Ayurov D. B., Shunkov A. D. "Multichannel recording of the hydroelectrodynamic phenomena on the shoreline of Lake Baikal", Proc. SPIE 11916, 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, 119165M (15 December 2021); <https://doi.org/10.1117/12.2603025>

ДИНАМИКА СПЕКТРОВ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЯЕНИЯ СВЕТА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Введение

Наночастицы металлов обладают рядом свойств благодаря чему применяются в качестве компонента других веществ в таких областях как медицина, биология, электроника и многих других отраслях [1, 2]. Так суспензии на основе наночастиц оксидов металлов могут быть использованы в качестве смазочных материалов с высокой теплопроводностью [3]. Подобный класс технических веществ должен обладать высокой структурной стабильностью в широком диапазоне температур. Также наночастицы металлов применяются и в исследовательской деятельности. Например, для получения гигантского комбинационного рассеяния, которое позволяет получать спектры большей интенсивности по сравнению с его традиционной методикой [4,5]. Одним из методов исследования является спектроскопия комбинационного рассеяния света. Поскольку спектроскопия комбинационного рассеяния является одним из мощнейших неразрушающих оптических способов исследования, она была выбрана как измерительный метод в данной работе.

Экспериментальная часть

Спектральные данные наночастиц серебра и железа были получены благодаря центру коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН на тройном спектрометре комбинационного рассеяния Horiba Jobin Yvon T64000 в геометрии обратного рассеяния. В качестве источника возбуждения использовалось излучение твердотельного лазера на длине волны 532 нм. Спектральное разрешение, при котором были получены спектры комбинационного рассеяния

(КР), 2 см^{-1} для всего исследуемого диапазона частот $180\text{--}3200 \text{ см}^{-1}$. Измерения проводились при изменении температуры в диапазоне $223\text{--}328 \text{ К}$, с точностью стабилизации лучше, чем $0,1 \text{ К}$.

Результаты и обсуждение

Для детального изучения данных к спектрам была применена операция деконволюции. Поскольку спектры простирается в широком диапазоне частот, то для упрощения их обработки данные всех спектров были разделены на несколько областей. Далее мы рассмотрим самые интенсивные и ярко выраженные области спектров.

В спектрах наночастиц серебра наиболее точно можно разделить контур на составляющие в диапазоне частот $2780\text{--}3200 \text{ см}^{-1}$. Поэтому для этой области были построены зависимости положения линий КР от температуры (рис. 1). Как видно из рисунка 1, смещения линий малы и новые линии не появляются. Исчезновение линии на частоте 3019 см^{-1} при температуре 313 К происходит из-за уменьшения ее интенсивности, вследствие чего уровень шума начинает преобладать. Наиболее смещение претерпевает самая высокочастотная составляющая спектра. При повышении температуры и сильного влияния шума определение ее положения имеет погрешность порядка 7 см^{-1} .

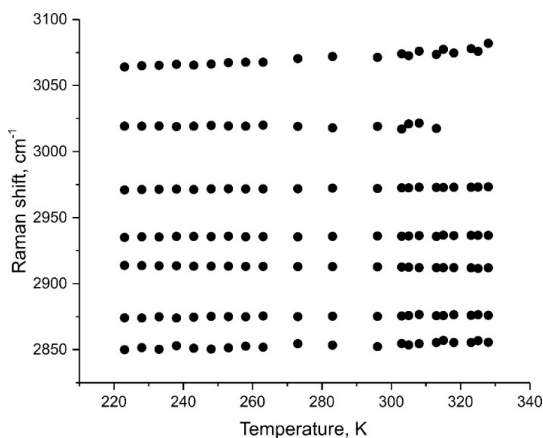


Рис. 1. Зависимость положения спектральных линий КР от температуры

Самые интенсивные линии (рис. 2) соответствуют колебаниям атома углерода [6-8]. Также в результате взаимодействия наночастиц Ag с воздухом, углеродом и их соединениях [9, 10] возникает большое количество дополнительных спектральных контуров. Из-за сильного электростатического взаимодействия между наночастицами исследуемого вещества и обнаруженными элементами [10], линии, соответствующие колебаниям Ag, в чистом виде обнаружить не получается.

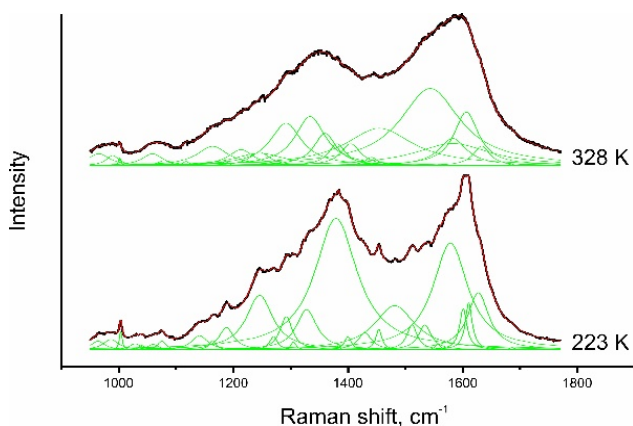


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния наночастиц Ag в частотном диапазоне 950–1770 cm^{-1} (справа от спектров указана температура); черный контур - экспериментальные спектры; зеленый - составные контура; красный расчетный спектр)

Поскольку железо очень активно окисляется при контакте с атмосферой, то на наночастицах образуется оксид железа Fe_2O_3 в связи с чем в чистом виде получить колебаний, составляющих наночастицы, весьма затруднительно. Так как атомы железа значительно тяжелее атомов кислорода, то можно сказать, что чем сильнее опускаемся в низкочастотную область, тем больше колебаний отвечает атомам Fe. Область частот от 350 cm^{-1} и выше относится к колебаниям молекул O_2 . (рис. 3).

Так колебания на частотах 218 и 501 cm^{-1} относятся к колебаниям типа A_{1g} . Колебания, совершающиеся с частотами 146, 202, 290, 404 и 622 cm^{-1} , относятся к колебаниям E_g симметрии.

Из-за высокого уровня шума по сравнению с интенсивностью спектра комбинационного рассеяния в области около 100 см^{-1} не при всех температурах удастся разрешить две отдельные линии, поэтому разделение контура в этом диапазоне частот не является достоверным.

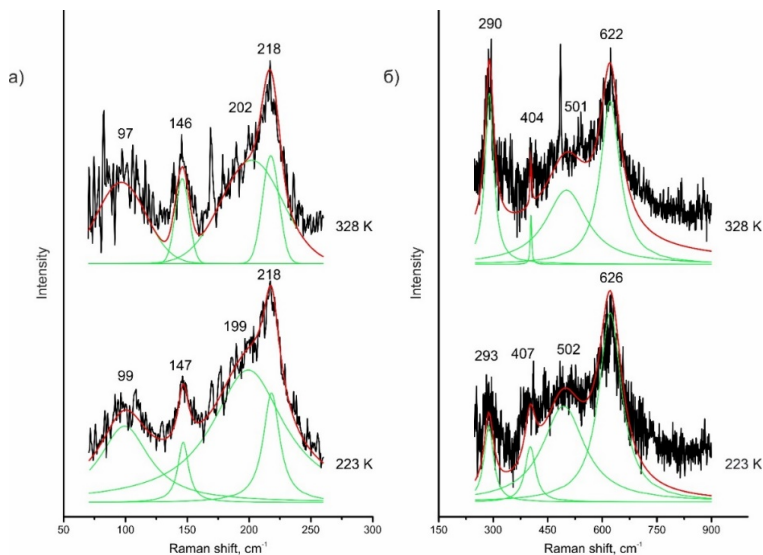


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния наночастиц железа при различных температурах (указано в правой части спектра) разделенные на разные диапазоны: а) $60\text{--}260\text{ см}^{-1}$, б) $250\text{--}900\text{ см}^{-1}$

Заключение

В рамках заданного диапазона температур не было обнаружено значительных отклонений расположения максимумов спектральных линий, что свидетельствует об отсутствии фазовых переходов в наночастицах серебра и железа, а также об их высокой структурной стабильности. Смещения спектральных линий имеют линейный характер в исследованном интервале температур. Результаты, представленные в данной работе показывают возможность использования наночастиц Ag и Fe в технологических суспензиях [11] применимых в климатических зонах, температура которых меняется в пределах от 223 K до 328 K.

Список литературы

1. Aruna Jyothi Kora, Jayaraman Arunachalam Green Fabrication of Silver Nanoparticles by Gum Tragacanth (*Astragalus gummifer*): A Dual Functional Reductant and Stabilizer // *J. of Nanomaterials*. - 2012. - С. 1-8.
2. Цурин В.А., Ермаков А.Е., Уймин МА., Мысик А.А., Щеголева НН, Гавико В. С, Майков В.В. Синтез, структура и магнитные свойства наночастиц железа и никеля, капсулированных в углерод // *Физика твердого тела*. - 2014. - №2. - С. 287-300.
3. Su-Yan Zhao, Xin Li, Yun-Hui Mei & Guo-Quan Lu Novel interface material used in high power electronic die-attaching on bare Cu substrates // *J Mater Sci: Mater Electron*. - 2016. - №27. - С. 10941-10950.
4. Ранищенко Б. В., Исияч Г, Мойзес П., Терехов С.Н, Панарин А.Ю. Модификация поверхности плазмонных наноструктур для спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния биомолекул // *Труды 13-й межд. конф. «Взаимодействие излучений с твердым телом»*. - Минск: БГУ, 2019. - С. 485-488.
5. Набиев И.Р., Ефремов Р.Г, Чуманов Г.Д. Гигантское комбинационное рассеяние и его применение к изучению биологических молекул // *Успехи физических наук*. - 1988. - №3. - С. 459-496.
6. J. Dennison, M. Holtz, G. Swain Raman Spectroscopy of Carbon Materials // *J Mater Sci: Spectroscopy*. - 1996. - №7. - С. 38-48.
7. Chow K.K., Short M., Lam S., McWilliams A., Zeng H.A. Raman cell based on hollow core photonic crystal fiber for human breath analysis // *J Med. Phys.* - 2014. - № 9. - P. 092701.
8. Valmalette J.C., Тап Z., Abe H., Ohara S. Raman scattering of linear chains of strongly coupled Ag nanoparticles on SWCNTs // *Scientific Reports*. - 2014. - №4. - С. 1-8.
9. Decreau R.A., Collman J.P. Three toxic gases meet in the mitochondria // *Frontiers in Physiology*. - 2015. - №6. - P. 210.
10. Yaguo Cai, Xianqing Piao, Wei Gao, Zhejuan Zhang, Er Niew, Zhuo Sun. Large-scale and facile synthesis of silver nanoparticles via a microwave method for a conductive pen // *J. The Royal Soc. Of Chem*. - 2017. - №54. - P. 34041-34048.
11. Дембелова Т.С., Цыренжапова А.Б., Макарова Д.Н., Дамдинов Б.Б., Бадмаев Б.Б. Акустическое исследование сдвиговых вязкоупругих свойств коллоидных суспензий наночастиц // *Ученые записки физ. фак-та Моск. ун-та*. - 2014. - № 5. С. 145301.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ЖИДКОСТИ С ОДИНОЧНЫМ ГАЗОВЫМ ПУЗЫРЬКОМ

Введение

Исследование распространения звука в жидкостях с газовыми включениями представляет значительный интерес для гидроакустики, ультразвуковой диагностики и биомедицинских технологий. Наличие пузырьков приводит к дисперсии, поглощению и нелинейным эффектам, обусловленным резонансными колебаниями газовых включений. Резонансная частота зависит от радиуса пузырька и свойств окружающей среды, а при высоких интенсивностях звукового поля возможны генерация высших гармоник, кавитация и формирование ударных волн [1–3].

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования распространения акустических волн в воде с одиночным воздушным пузырьком. Расчеты выполнены в среде COMSOL Multiphysics с использованием уравнения Гельмгольца. Примененный подход реализован в рамках зарегистрированного программного модуля [6], что обеспечивает воспроизводимость и достоверность полученных результатов. Эффективность COMSOL Multiphysics для решения подобных задач подтверждена в ряде исследований, включая моделирование акустических резонаторов, анализ поглощения звука и расчет пространственного распределения акустического давления [4, 5].

Результаты моделирования

Моделирование проведено для прямоугольного резервуара размером $0.1 \times 0.1 \times 0.5$ м с жесткими стенками, заполненного водой при стандартных условиях ($P = 1$ атм, $T = 293.15$ К). Акустиче-

ское возбуждение осуществляется двумя источниками на левой грани. Среда рассматривается как несжимаемая, а пузырек – как сферическое газовое включение.

Численный анализ выполнен с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics, реализующего расчет на основе уравнения Гельмгольца:

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla_p \cdot q_d) - \frac{K_{eq}^2}{\rho_c} \rho_t \right) = Q_m$$

$$\rho_t = \rho + \rho_b$$

$$K_{eq}^2 = \left(\frac{\omega}{C_c} \right)^2$$

На Рисунке 1 отражено распределение акустического давления в расчетной области при частоте звука 8333,3 Гц.

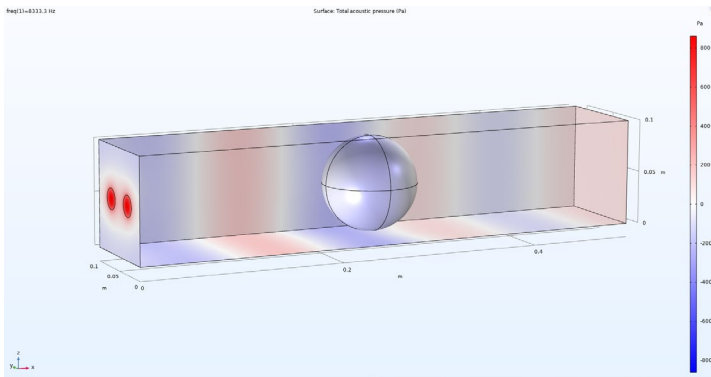


Рис. 1. Распределение полного акустического давления при частоте 8333,3 Гц (длина волны вдвое превышает диаметр пузырька)

При данной частоте длина волны в два больше размера пузырька, что приводит к слабому рассеянию и выраженному дифракционному огибанию. Основной волновой фронт сохраняется практически неизменным за пузырьком. Вблизи пузырька наблюдаются незначительные локальные возмущения давления, вызванные акустическим контрастом на границе раздела фаз. Доминирующей особенностью поля остается интерференционная кар-

тина стоячих волн, обусловленная отражениями от жестких стенок резервуара.

Распределение полного акустического давления при частоте 16 667 Гц показано рисунке 2

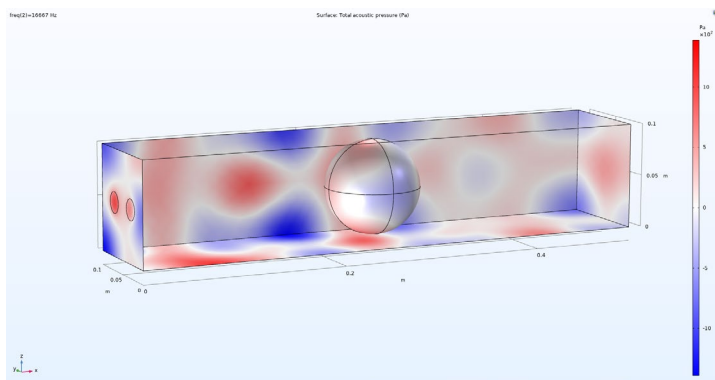


Рис. 2. Распределение полного акустического давления при частоте 16 667 Гц (длина волны равна диаметру пузырька)

При сопоставимых размерах пузырька и длины волны рассеяние становится существенным. Вокруг пузырька формируются четкие зоны повышенного и пониженного давления, свидетельствующие об интенсивном взаимодействии волны с включением. Наблюдается сложная интерференционная структура, обусловленная наложением падающей, рассеянной и отраженных волн. В непосредственной близости от пузырька фиксируется локальное усиление акустического давления, характерное для условий, приближающихся к резонансным.

Выводы

Проведенное моделирование подтвердило высокую эффективность программного комплекса COMSOL Multiphysics для исследования акустических процессов в неоднородных жидкостях. Разработанный программный модуль [6] позволяет детально визуализировать и анализировать взаимодействие звуковых волн с газовыми включениями. Показано, что влияние пузырька на акустическое поле существенно возрастает при приближении частоты возбуждения к резонансной, что проявляется в усилении рас-

сеяния, локальном росте давления и усложнении интерференционной картины.

В дальнейшем планируется расширение модели на случай полидисперсных систем и учет нелинейных эффектов в ультразвуковом диапазоне, включая кавитационные явления. Полученные результаты могут быть использованы для разработки методов управления акустическими свойствами жидких сред в технологических и биомедицинских приложениях.

Список литературы

1. Doinikov, A. A. Translational motion of a spherical bubble in an acoustic standing wave of high intensity // *Physics of Fluids*. 2002. V. 14. № 4. P. 1420–1426.

2. Минаков А.В., Пряжников М.И., Дамдинов Б.Б., Немцев И.В. Исследование объемной вязкости наносuspензий методом акустической спектроскопии // *Акуст. журн.* 2022. Т. 68. № 2. С. 182–189.

3. Губайдуллин, Д.А., Федоров, Ю.В. Звуковые волны в жидкостях с полидисперсными парогазовыми пузырьками // *Акуст. журн.* 2016. Т. 62. № 2. С. 178–186.

4. Дамдинов Б.Б., Пригожих В.А. Предварительное моделирование распространения звука в жидкой среде с примесями // *Акуст. журн.* 2024. Т. 70. № S5. С. 63.

5. Буркова Е. Н., Кондрашов А. Н., Рыбкин К. А. Система автоматизированных расчетов Comsol: учеб. пособие. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2019. 133 с.

6. Пригожих В. А., Дамдинов Б. Б., Ершов А. А. Программный модуль численного моделирования распространения акустических волн в жидкости с одиночным газовым пузырьком, реализованный в среде COMSOL Multiphysics. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025681697, Роспатент, 2025

ПОГЛОЩЕНИЕ ЗВУКА В СУСПЕНЗИЯХ В ДЛИННОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Введение

Одним из процессов, интересным с точки зрения практических приложений и моделирования, является распространение звука в двухфазной среде. Суспензии, состоящие из жидкости и твердых частиц, относятся к двухфазным средам, обладающим разнообразными и многофункциональными свойствами, позволяющими решать с их помощью разные практические задачи. Основные теории о распространении акустических волн в суспензиях и эмульсиях, учитывающие различные физические эффекты, были созданы Lamb (1932), Рытовым и др. (1938), Urick (1948), Исаковичем (1948), Epstein-Carhart (1953), Allegra-Hawley (1972), Harker-Temple (1988), McClements (1992), Atkinson-Kytömaa (1992), Evans (1997), Temkin (1998), Hipp (2002), Valier-Brasier et al. (2015) и другими [1-13].

В неоднородных средах, к которым относятся суспензии и эмульсии, наблюдается качественный сдвиг в характере распространения звука. При этом механические (упругие) и тепловые свойства компонентов суспензии являются определяющими параметрами, влияющими на поглощение звука. Будем рассматривать *длинноволновой режим* (когда длина волны намного превышает размеры частиц дисперсной фазы). В противоположность этому, очень большие частицы с отношением к длине звуковой волны просто отбрасывают звуковую волну в прямом направлении, которая сталкивается с падающей волной. Поглощение звука в суспензиях происходит через несколько основных механизмов, которые определяют, как акустические волны взаимодействуют с

частицами, находящимися в жидкости. При этом вклады каждого из механизмов в коэффициент затухания представляют собой аддитивную величину [2, 5, 6]:

$$\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha = \alpha_0 + \alpha_{\text{visc}} + \alpha_{\text{term}} + \alpha_{\text{scat}} \quad (1)$$

где α_0 – коэффициент поглощения дисперсной среды (ДС), α_{term} – тепловые потери, α_{visc} – вязкие (вязко-инерционные) потери, α_{scat} – потери на рассеяние. Тепловыми потерями в суспензиях можно пренебречь, так как их влияние на общий вклад в коэффициент затухания незначителен и составляет всего лишь до 5%. Таким образом, рассмотрим потери на рассеивание и вязко-инерционный механизм поглощения.

1. Модели поглощения

Модель Урика. Одна из ранних работ по исследованию поглощения звука в суспензиях была сделана Уриком. Он получил выражение для рассеяния акустической волны одной частицей, совершающей колебания в вязкой среде, и затем выражение для коэффициента затухания N частицами в единице объема [3]: некоторые преобразования дает следующее выражение:

$$\alpha_{\text{ur}} = \Delta\alpha = \frac{\varphi}{2} \left[\frac{1}{3} k^4 r^3 + k(\sigma - 1)^2 \frac{s}{s^2 + (\sigma + \tau)^2} \right] \quad (2)$$

где φ – объемная доля дисперсная фаза (ДФ). Параметры s и τ вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} s &= \frac{9}{4\xi} \left(1 + \frac{1}{\xi} \right) & \tau &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{9}{2\xi} \right) \\ \xi &= r \sqrt{\frac{\rho\omega}{2\eta}} & \sigma &= \frac{\rho'}{\rho} \end{aligned}$$

где r – радиус частиц, ω – циклическая частота, k – волновое число, ρ и ρ' – плотность ДС и ДФ, η – вязкость. Первый из двух членов суммы в уравнении Урика (2) – это потери на рассеивание α_{scat} , создаваемые малыми относительно жесткими сферическими частицами. Второй член – это потери на трение α_{visc} , обусловленные вязкостью жидкости (вязко-инерционное поглощение).

$$\alpha_{\text{scat}} = \frac{\varphi}{2} \left(\frac{1}{3} k^4 r^3 \right) \quad (3)$$

$$\alpha_{\text{visc}} = \frac{\varphi}{2} k(\sigma - 1)^2 \frac{s}{s^2 + (\sigma + 1)^2} \quad (4)$$

Исследуя затухание ультразвуковых волн в водных суспензиях каолина и песка, он получил удовлетворительное согласие с экспериментальными данными поглощения.

ЕСАН теория. Более общая концепция, описывающая поглощение в суспензиях и эмульсиях, была получена Эпштейном, Кэрхартом, Аллегрой и Хоули и называется ЕСАН теорией (названа по заглавным буква фамилий авторов). В более общем виде теория ЕСАН дает следующие уравнения для вклада трех механизмов диссипативных потерь в общее затухание [6]:

$$\alpha_{\text{scat}} = \frac{1}{2} \varphi k^4 r^3 \left[\frac{1}{3} \left(\frac{m - m'}{m} \right)^2 - \left(\frac{\rho' - \rho}{2\rho' + \rho} \right)^2 \right] \quad (5)$$

$$\alpha_{\text{visc}}(\xi \rightarrow 0) = \frac{1}{9} \varphi \omega^2 r^3 \frac{\rho}{c\eta} (\sigma - 1)^2 \quad (6)$$

$$\alpha_{\text{visc}}(\xi \rightarrow \infty) = \frac{9}{\sqrt{2}} \varphi \frac{1}{rc} \sqrt{\frac{\eta\omega}{\rho}} \left(\frac{\sigma - 1}{1 + 2\sigma} \right)^2 \quad (7)$$

где c – лапласова скорость, m и m' – коэффициенты сжимаемости.

2. Расчет и обсуждение результатов

В качестве объекта для моделирования поглощения была выбрана реально существующая суспензия, состоящая из воды и частиц оксида кремния SiO_2 , имеющих сферическую форму. При этом диапазон частот составлял от 1 до 100 МГц, а радиус частиц от 100 до 2000 нм. Такие значения выбраны не случайно, так как при частоте 100 МГц и размере частиц 2000 нм, мы находимся на границе длинноволнового диапазона (при этом длина волны в 7,5 раза больше, чем радиус). Результаты показали крайне низкое значение α_{scat} , но большой диапазон изменений для всех размеров частиц дисперсной фазы (см. рис. 1 слева). Так, например, при радиусе частиц 500 нм потери на рассеяние менялись от $1.25 \cdot 10^{-7}$ Дб/см/МГц (1 МГц) до $4.46 \cdot 10^{-4}$ Дб/см/МГц (100 МГц), при этом увеличение составило более 35000 раз.

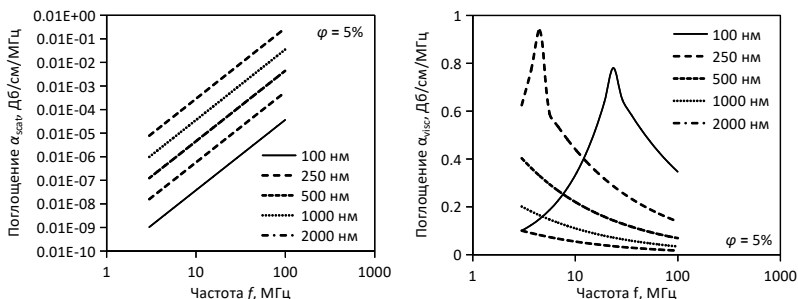


Рис. 1. Коэффициенты рассеяния и вязко-инерционных потерь водной суспензии SiO_2 при различных размерах частиц (объемная доля 5 %)

Формула Урика (2) дает почти такие же результаты, что говорит о том, что определяющим параметром для рассеяния является размер частиц и частота звуковой волны. Для суспензий, имеющих относительно твердые частицы, и в случае малых размеров потери на рассеяние будут иметь небольшие значения при любых значениях плотности и сжимаемости. Далее был вычислен коэффициент вязко-инерционных потерь (см. рис 1. справа). Результаты показали, что значения α_{visc} имеют немонотонный характер. При размере частиц 100 и 250 нм вязко-инерционные потери сначала возрастают, а затем убывают, причем для 100 нм это происходит при высоких частотах, а для 250 нм – при низких частотах. Это обстоятельство говорит о том, что до некоторого значения радиуса частиц вязко-инерционные потери возрастают и достигают максимального значения, а затем убывают. В данном случае для водной суспензии SiO_2 максимальное значение находится между 250 нм и 500 нм. При возрастании размеров частиц происходит убывание α_{visc} по формуле (7).

На рисунке 2 изображены графики, показывающие доли поглощения. Пустые столбы показывают долю вязкостного поглощения, а черные столбы – долю потерь на рассеяние. Видно, что при 500 нм доля потерь на рассеяние минимальная и составляет примерно 5% при максимальной частоте. При 2000 нм картина меняется кардинально, доля рассеяния составляет 5% уже на частоте 15.6 МГц, а при частоте 100 МГц достигает 95%, что и следовало ожи-

дать. На основе полученных данных была построена карта зон, показывающая, при каких размерах и частотах преобладает тот или иной механизм поглощения (см. рис. 2. справа). Таким образом, было показано, как меняются механизмы поглощения при изменении размеров частиц, а также частоты ультразвуковых волн.

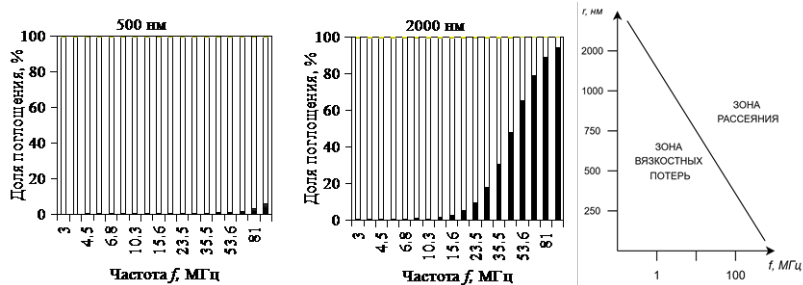


Рис. 2. Доля рассеяния и вязко-инерционных потерь водной суспензии SiO₂, а также карта зон поглощений [14]

Заключение

Представленная работа призвана ознакомить с основными теоретическими подходами к изучению акустического поглощения в суспензиях, а также с анализом работ по теоретическому и численному определению основных характеристик явления поглощения и рассеяния. Таким образом, проведенные исследования показали, что поглощение и рассеяние ультразвуковых волн в дисперсных системах тесно связано с протекающими в них физическими процессами.

Работа выполнена в рамках государственного задания СФУ (номер FSRZ-2020-0012).

Список литературы

1. Lamb, H. Hydrodynamics. 6th Edition // Cambridge University Press, Cambridge, 1932. – P. 1–8.
2. Рытов С.М., Владимирский В.В., Галанин М.Д. Распространение звука в дисперсных системах // ЖЭТФ. 1938. – Т. 8. – № 5. – С. 614–621
3. Urlick R. J. Absorption of Sound in Suspension of Irreg. Particles // Jour. Acoust. Soc. Amer., 1948. – V. 20. – № 3. – P. 283–288.

4. Исакович М. Л. О распространении звука в эмульсиях // ЖЭТФ, 1948. – Т.18. – № 10. – С. 905–912.
5. Epstein P. S., Carhart R. R. The Absorption of Sound in Suspensions and Emulsions. I. Water Fog in Air // Jour. Acoust. Soc. of Amer., 1953. – №25. – P. 553–565.
6. Allegro J. R., Hawley S. A. Attenuation of sound in suspensions and emulsions: Theory and experiments // Jour. Acoust. Soc. Amer., 1971. – V. 51. – № 5. – P. 1545–1564.
7. Harker A. H., Temple J. A. G. Velocity and attenuation of ultrasound in suspensions of particles in fluids // Journal Physics D: Applied Physics, 1988. – V.21. – №11. – P. 1576–1588.
8. Evans J. M., Attenborough K. Coupled phase theory for sound propagation in emulsions // Jour. Acoust. Soc. Amer., 1997. – V. 102. – № 1. – P. 278–282.
9. Temkin S. Sound propagation in dilute suspensions of rigid particles // Jour. Acoust. Soc. Amer., 1998. – V.103. – №2. – P. 838–849.
10. McClements D. J. Comparison of multiple scattering theories with experimental measurements in emulsions // Jour. Acoust. Soc. Amer., 1992. – V. 91. – № 2. – P. 849–853.
11. Atkinson, C. M., Kytömaa H. K. Acoustic wave speed and attenuation in suspensions // International Journal of multiphase flow., 1992. – V. 18. – № 4. P. 577–592.
12. Hipp A.K. et al. Acoustic Characterization of Concentrated Suspensions and Emulsions. 1. Model Analysis // Langmuir, 2002. – V.18. – №2. – P. 391–404.
13. Valier-Brasier T. et al. Sound propagation in dilute suspensions of spheres: Analytical comparison between coupled phase model and multiple scattering theory // Jour. Acoust. Soc. Amer., 2015. – V. 138. – № 4. – P. 2598–2612.

И.А. Южаков^{1,2}, Б.З. Гармаев¹, А.В. Номоев¹

¹ *Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ*

² *Бурятский государственный университет
им. Доржи Банзарова, Улан-Удэ*

МИКРОВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТА С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ МИКРОЧАСТИЦ МАГНЕТИТА РАЗЛИЧНЫХ МАРОК

Радиопоглощение на сверхвысоких частотах (СВЧ) различных частиц, обладающих магнитными свойствами, как в отдельности, так и в сочетании с полимерами, проводящими и диэлектрическими нано- и микроструктурами, а также многослойных покрытий исследуется во многих работах. Так, например, микроволновые характеристики композиционных смесей, содержащих наноразмерные порошки сегнетоэлектриков и ферритов, определены резонаторным методом на частотах 3–13 ГГц [1]. Композиты показали высокие характеристики поглощения микроволн с большим содержанием микропорошка карбонильного железа, включая магнитную проницаемость и тангенс угла потерь [2]. Особенный интерес вызывают микрочастицы магнетита вследствие неплохой намагниченности насыщения и малой плотности. С точки зрения практического применения, композиты с большой концентрацией микропорошков, имеющих высокие магнитные потери на СВЧ, могут быть эффективно использованы для подавления высокочастотного магнитного поля, в том числе для создания поглотителей электромагнитных волн, а также могут быть полезны для концентрации поля в антеннах, резонаторах.

В настоящей работе разработаны и исследованы композиты с высоким, более 80 мас. % содержанием микрочастиц магнетита в силиконовом компаунде для создания материала с повышенным поглощением радиоволн СВЧ диапазона. Для этого определены

размеры и форма микрочастиц, созданы такие композиты, исследованы коэффициенты отражения, прохождения и поглощения, а также комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости композитов в диапазоне частот 0,1-6 ГГц.

На рис. 1. представлены частотные зависимости коэффициентов поглощения, отражения и прохождения электромагнитного излучения через созданный композит.

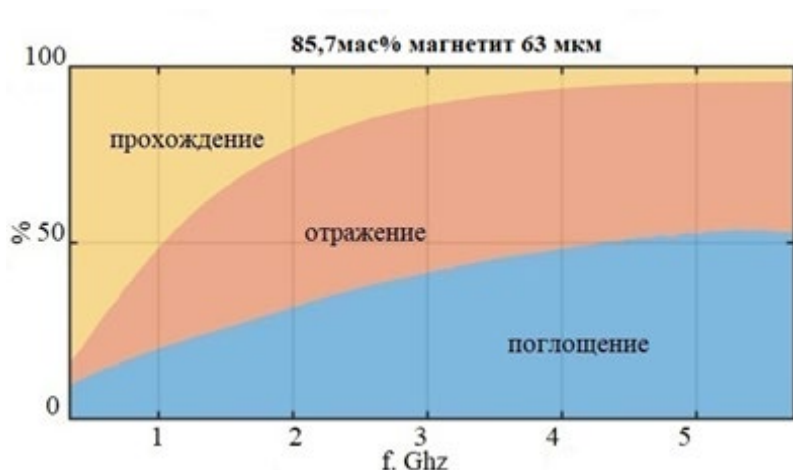


Рис. 1. Зависимости коэффициентов поглощения, отражения и прохождения электромагнитного излучения через композит от частоты

Наибольшее значение поглощения электромагнитного излучения от ~ 10% до ~ 55 % на частотах 1-6 ГГц наблюдается для образцов, содержащих магнетит с содержанием 85,7 мас.% с диаметром частиц 63 мкм. Толщина композита 2 мм. Значения коэффициентов отражения возрастают от ~ 5% до ~ 40% в исследуемом диапазоне частот.

В заключение отметим, что, несмотря на большую концентрацию, 80-85,7% мас.% магнетита, образцы слабо проводят электрический ток и разработанная методика создания силиконовых композитов с большой концентрацией микропорошков магнетита позволяет получить материалы с высокими электромагнитными параметрами.

Список литературы

1. Доценко О.А., Сусляев В.И., Вагнер Д.В., Кочеткова О.А. Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, № 2-2 (26), 59 (2012).
2. Номоев А.В., Гармаев Б.З., Атутов Е.Б., Коровин Е.Ю., Южаков И.А., Цыдыпов Д.Г. Микроволновые свойства композита с высоким содержанием микрочастиц карбонильного железа различных марок // Письма в ЖТФ. 2025. Т. 51. Вып. 8. С. 20-24.

**Т.А. Авдеева¹, Б.Г. Цыремпилов¹, Д.Д. Сандаков^{2,4},
М.Д. Парфенова³, В.И. Луцык^{1,3}**

*¹ Бурятский государственный университет
им. Доржи Банзарова, группа 02120, Улан-Удэ*

*² Бурятский государственный университет
им. Доржи Банзарова, группа 01311, Улан-Удэ*

*³ Сектор компьютерного конструирования материалов
Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ*

*⁴ ООО «Инсайт», Бурятский государственный университет
им. Доржи Банзарова, Улан-Удэ*

3D ПЕЧАТЬ ФАЗОВЫХ ОБЛАСТЕЙ Т-х-у ДИАГРАММ С НОНВАРИАНТНЫМИ РАВНОВЕСИЯМИ I-III КЛАССА, А ТАКЖЕ ИХ АНАЛОГОВ И ПРОТОТИПОВ

Для понимания закономерностей в строении изобарных фазовых диаграмм (ФД) тройных систем и использования их 3D компьютерных моделей в качестве рабочего инструмента при *in silico* дизайне гетерогенных материалов, необходимо рассматривать такие диаграммы в совокупности близких им по топологии типов (семейств, аналогов), создавая для них разборные 3D-пазлы, состоящие как из отдельных фазовых областей, так и из их кластеров (комплексных элементов, объединяющих однотипные фазовых области) [1]. С этой целью используются программные продукты Microsoft Excel 2013 и AutoCAD 2020. В приложении [1] приведены инструкции для получения бесплатной студенческой версии AutoCAD.

Полную (без вырождения поверхностей в ребра и боковые грани тригональной призмы) ФД эвтектического типа E^{eee} , состоящую из 13 фазовых областей, можно представить в виде 6-элементного пазла (рис. 1): однофазная гомогенная область легкоплавкого компонента С, двухфазная область $L+C$, трехфазная область $A+B+C$ (без расплава), трехфазная область $L+A+B$ (с рас-

плавом), двухфазная область A+B и неразъемный кластер из оставшихся 8 областей без их разделения ($13-5=8$). Структуру такой ФД с различными сочетаниями одной тройной N (E, Q или P) и трех бинарных n (e или p) точек, обозначающих расплав (L или Ж) можно закодировать по количеству ее геометрических элементов (не включая фрагментов граней тригональной призмы) как ОПЛТ, где О - фазовые области, П - поверхности, Л – линии, Т - точки.

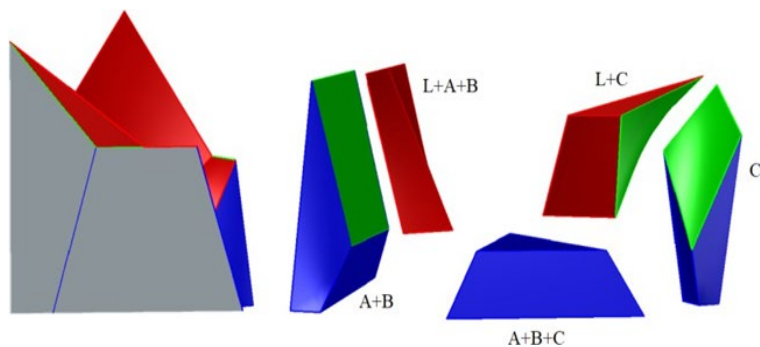


Рис. 1. Фазовые области диаграммы $E(eee)=E^{eee}$ в виде 6-элементного пазла [1] (при отсутствии твердофазной растворимости области С и A+B совмещаются с ребром и гранью призмы; принадлежащие кластеру области А, В, A+C, B+C тоже вырождаются)

ФД $E(eee)=E^{eee}$ (три бинарные эвтектики "e" находятся по температуре выше тройной эвтектики "Е", а горизонтальный 4-точечный комплекс относится к первому классу, где состав расплава находится внутри симплекса из трех твердых фаз) кодируется как: 13-28-54-25. У такой диаграммы из 13 фазовых областей и 28 поверхностей существует много аналогов, отличающихся тройной N (E, Q или P) и бинарными точками n (e,e,e; e,e,p; e,p,p). ФД с тройными точками Q (две бинарные точки n - e или p - находятся выше нее, а одна – ниже) и P (одна точка находится выше нее, а две – ниже) относятся к диаграммам второго и третьего класс. При этом надо иметь в виду, что у диаграмм типа Q четырехточечный горизонтальный комплекс образует выпуклый четырехугольник, разделяемый двумя диагоналями на две пары симплексов (границы трехфазных областей), а четырехфазный комплекс диаграммы типа

Р аналогичен четырехфазному комплексу диаграммы Е, но центральной точкой в нем является не расплав, а одна из твердых фаз.

Более сложная ФД с бинарным инконгруэнтным соединением $AB=R(\delta)$ [1, с. 36-43] состоит из двадцати фазовых областей: А, В, С, R, А+С, А+R, В+С, В+R, С+R, А+С+R, В+С+R, L+А, L+В, L+С, L+R, L+А+С, L+А+R, L+В+С, L+В+R, L+С+R. По аналогии с диаграммой E^{ccc} (рис. 1) ее можно закодировать как $(ep)Q>E(ee)=^{ep}Q>E^{ec}$ и присвоить ОПЛТ-код 20-47-84-37.

Технические задания для прототипирования семейства таких диаграмм $(n_1n_2)N_1>N_2(n_3n_4)$, где $N_1\equiv Q$; $N_2\equiv E,Q,P$; $n_i\equiv e,p$, с инконгруэнтным бинарным соединением $\delta(R)\equiv AB$ разрабатывали студенты группы 13190. Диаграмма $(ep)Q>E(ee)=^{ep}Q>E^{ec}$ обсуждается в тезисах [2], где в рисунке пазла с комплексным элементов допущена ошибка (комплексный элемент должен состоять из 10-фазовых областей (рис. 2). В тезисах [3] этой ошибки нет.

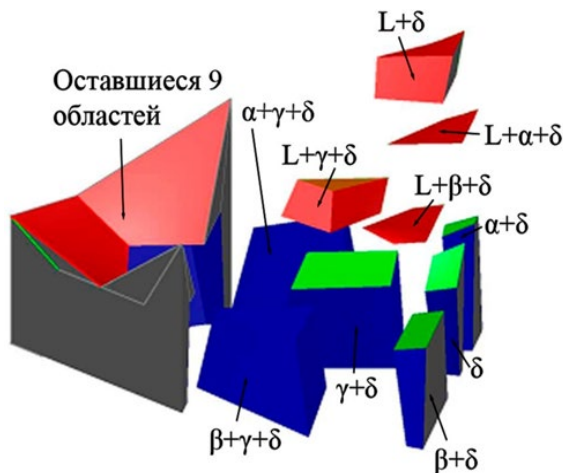


Рис. 2. Фазовые области диаграммы $(ep)Q>E(ee)=^{ep}Q>E^{ec}$ в виде 10 индивидуальных фазовых областей и комплексного элемента из 10 оставшихся фазовых областей [2] (в комплексном элементе не 9 фазовых областей, а 10)

Кроме трехмерных пазлов из фазовых областей Т-х-у диаграмм (с кластеризованным элементом и без кластеризации одно-

типных фазовых областей) наукоемкой продукцией студенческого бизнеса ИЕН БГУ, создаваемой при изучении учебной дисциплины «химическая термодинамика», будут компьютерные 3D-модели изобарных ФД тройных систем. Ниже дана характеристика таких программных продуктов (цифровых двойников ФД), которая разработана в Секторе компьютерного конструирования материалов (СККМ ИФМ СО РАН, <http://ipms.bscnet.ru/labs/skkm.html>). Каждая компьютерная 3D-модель представляет собой автономную программу с широкими возможностями визуализации как собственно пространственного геометрического объекта, целиком или фрагментарно, в том числе на проекциях и изо- и политермических разрезах, так и результатов расчетов кристаллизации любого произвольно заданного сплава, включая траектории всех фаз, материальные балансы на всех этапах кристаллизации, качественный и количественный состав формируемой микроструктуры. Возможны кросс-валидация вертикальных и горизонтальным материальных балансов и имитация спектров ДТА. Для стабильной работы 3D-модели персональный компьютер должен удовлетворять следующим требованиям: операционная система Windows XP и выше; процессор с тактовой частотой не менее 100 МГц; объем оперативной памяти 256 Мб и выше; объем свободного дискового пространства не менее 2.5 Мб. Для установки программы на компьютер достаточно скопировать ее на жесткий диск. Программа состоит из одного файла размером около 1 Мб. Вся графическая информация сохраняется на диске в сжатом формате JPEG, а табличные данные - в формате MS Word. Для распространения можно использовать CD и DVD диски, usb-флеш карту, электронную почту. Для пользования программой необходимо заключить лицензионное соглашение с разработчиками. При необходимости программа может быть доработана.

Полученные программные продукты могут быть использованы при разработке и улучшении свойств материалов. Стоимость зарубежных аналогов, которые содержат только информацию о диаграмме (без расчета материальных балансов): от 100 до 600 EUR за данные об одной диаграмме.

Такие программные продукты (3D компьютерные модели фазовых диаграмм) могут снабжаться дополнительными опциями для уменьшения геометрических элементов ФД (при вырождении (совпадении с ребрами и гранями тригональной призмы) поверхностей на огранении областей с твердыми фазами. Д.А. Петров рассмотрел три варианта вырождения солидусных и сольвусных поверхностей в Т-х-у диаграмме с четырехфазным превращением $L=\alpha+\beta+\gamma$, состоящей из 28 поверхностей [4].

Целесообразно рассмотреть такие же трансформации как для аналогичных по топологии диаграмм из 28 поверхностей, но теперь уже с четырехфазными превращениями $L+\alpha=\beta+\gamma$ и $L+\alpha+\beta=\gamma$, возникающими при заменах неинвариантных бинарных точек e на p и тройных E на Q и R , так и для диаграмм других топологических типов (например, с образованием одного или нескольких двойных и (или) тройных соединений с конгруэнтным и инконгруэнтным плавлением).

Совсем другой тип трансформаций возникает в том случае если применять программу для построения и исследования какой-либо определенной диаграммы к аналогичным манипуляциям с диаграммами других топологических типов. При таком подходе вырождению подвергаются и поверхности ликвидуса. Так как при создании алгоритмов визуализации диаграммы жесткость ее конструкции обеспечивается определенным набором точек на контурах поверхностей, которые остаются неизменными в процессе работы программы, то пользователь не имеет возможности добавлять, удалять точки, или изменять соединения между ними, но он может редактировать координаты этих точек, в том числе таким образом, чтобы при их совмещении происходило вырождение определенных линий и поверхностей.

Изготовление пазлов разборных фазовых диаграмм тройных систем является важным элементом стратегии компьютерного конструирования гетерогенных материалов [1], развивающим аналогичные тренды в химии, биохимии и фармацевтике [5].

Исследование выполнено в соответствии с госзаданием ФГБУН ИФМ СО РАН, проект 0270-2024-0013.

Список литературы

1. Парфенова М.Д., Ламуева М.В., Луцык В.И. Разработка технических заданий для прототипирования разборных Т-х-у диаграмм (Excel+AutoCAD технология) // Уч.-метод. пособие. – Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2021. – 58 с.
2. Цыдыпова А.Б., Мельников К.А., Парфенова М.Д., Луцык В.И. Конкуренция разно-дисперсных кристаллов хлорида церия в реакции $\text{CeCl}_3 + \text{L} = \text{CaCl}_2 + \text{Na}_3\text{Ce}_3\text{Cl}_{18}$ // XX конф. по фундаментальным и прикладным проблемам физики (молодых ученых, аспирантов и студентов): Сб. докл. – 2023. – Улан-Удэ. – С. 25-29.
3. Parfenova M.D., Lutsyk V.I., Vorob'eva V.P., Zelenaya A.E. Puzzlez of phase regions and their complex elements for the virtual $^{\circ}\text{Q}>\text{Pee}$ and real Ag-Cu-Ni (A-B-C) diagrams // Book of abstracts. XXIV International Conference on Chemical Thermodynamics in Russia. P. 354.
4. Петров Д.А. Двойные и тройные системы. М.: Изд-во Академии Наук СССР, 1953. 316 с.
5. Гордеев Е.Г., Анаников В.П. Общедоступные технологии 3D-печати в химии, биохимии и фармацевтике: приложения, материалы, перспективы // Успехи химии. 2020. 89 (12). 1507-1561.

М.Д. Парфенова¹, В.А. Матвеева², В.П. Воробьева¹,
В.И. Луцык^{1,2}, А.Э. Зеленая¹

¹Сектор компьютерного конструирования материалов
Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ
²Бурятский государственный университет им. Доржи Банзарова,
ИЕН, группа 02120, Улан-Удэ

ПЕРЕКРЕСТНАЯ ПРОВЕРКА ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛЬНЫХ БАЛАНСОВ В ДИАГРАММЕ Li, K, Nd || Cl

В данном исследовании рассмотрена компьютерная модель изобарной фазовой диаграммы системы LiCl-NdCl₃-KCl (рис. 1), построенная в программе Конструктор фазовых диаграмм, которая разработана в секторе компьютерного конструирования материалов.

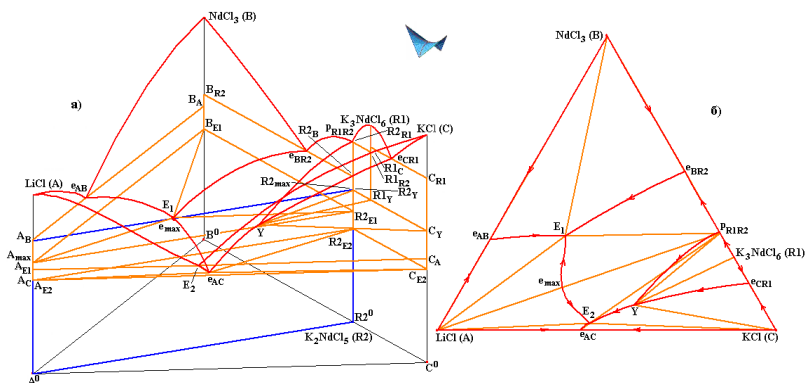


Рис. 1 3D-модель фазовой диаграммы LiCl-NdCl₃-KCl, построенная по данным [1]: аксонометрия (а) и концентрационная проекция (б)

Компьютерная модель позволяет воспроизводить пространственную модель всей диаграммы и ее отдельных элементов и фазовых областей, рассматривать произвольные изо- и поли-

термические сечения, расшифровывать их. Готовая 3D модель также дает возможность прослеживая историю кристаллизации и изменение фазового и конгломератного состава сплава.

Еще одной важной возможностью разработанной 3D-модели фазовой диаграммы системы $\text{LiCl-NdCl}_3\text{-KCl}$ является возможность построения диаграмм материального баланса (ДМБ), визуализирующих количественных соотношений между фазовыми долями. Они строятся в виде горизонтальных (ГДМБ) (рис. 2б) или вертикальных (ВДМБ) (рис. 2в) диаграмм.

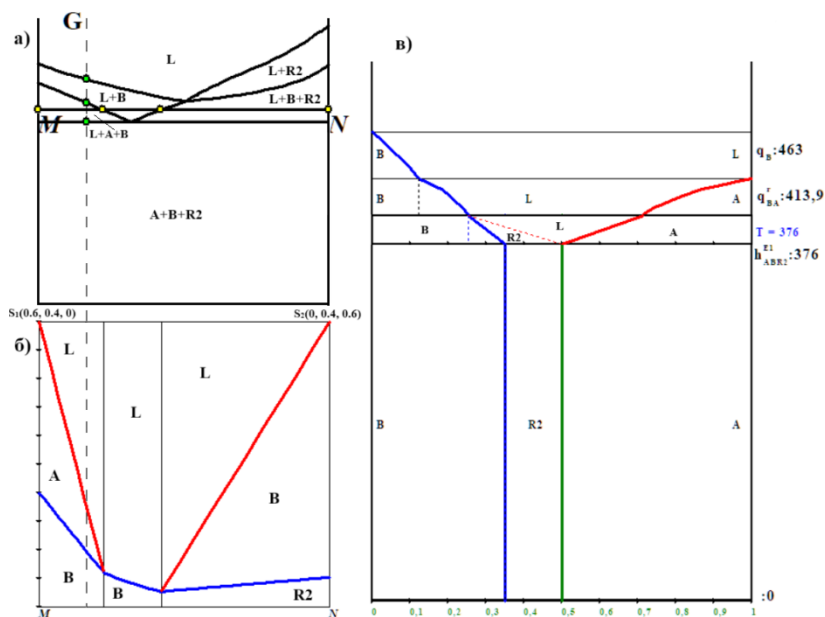


Рис. 2. Политермический разрез $S_1(0.6, 0.4, 0) - S_2(0, 0.4, 0.6)$ 3D-модели $\text{LiCl-NdCl}_3\text{-KCl}$ (а), ГДМБ (б), ВДМБ для т. G (0.5, 0.4, 0.1) (в)

Для произвольного политермического разреза $z_2(\text{NdCl}_3)=0.4$ (рис. 2а) была построена ГДМБ, демонстрирующая изменение долей фаз в фазовых областях L+A+B, L+B, L+B+R2 при постоянной температуре в 400°C (рис. 2б). Для точки G (0.5, 0.4, 0.1) (рис. 2а), которая в [1] была обозначена как состав №27, была построена ВДМБ, отражающая изменение долей фаз в фазовых об-

ластях L+B, L+A+B при изменении температуры. На рис. 2в при постоянной температуре тройной эвтектики $T=376^{\circ}\text{C}$ отражено изменение долей фаз в процессе неинвариантного фазового перехода по тройной эвтектической реакции $L \rightarrow A+B+R_2$ (из фазовой области L+A+B в область A+B+R₂).

Исследование выполнено в соответствии с госзаданием ФГБУН ИФМ СО РАН, проект № 0270-2024-0013.

Список литературы

1. Ghosh S., Ganesan R., Sridharan R., Gnanasekaran T. Investigation on the Phase Diagram of LiCl-KCl-NdCl₃ Pseudo-Ternary System // J. Phase Equilib. Diffus. 2018. V. 39. P. 916–932. <https://doi.org/10.1007/s11669-018-0695-3>.

**М.В. Шикueva¹, М.Д. Парфенова², В.И. Луцык^{1,2},
В.П. Воробьева², А.Э. Зеленая²**

*¹ Бурятский государственный университет
им. Доржи Банзарова, группа 02120, Улан-Удэ*

*² Сектор компьютерного конструирования материалов
Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ*

ИМИТАЦИЯ ТЕРМОГРАММ ПО КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ДИАГРАММЫ Li,K,Nd|Cl

Опубликованные данные по тройной системе с хлоридами неодима, лития и калия включают в себя экспериментальное исследование спектров дифференциально-термического анализа (ДТА) для 33 образцов [1] (рис. 1-2).

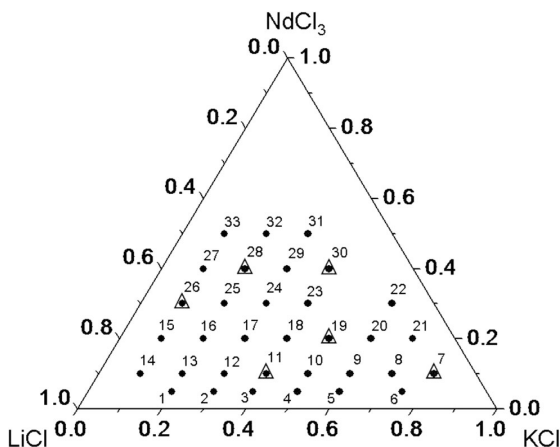


Рис. 1. Составы образцов, исследованных методами рентгеновской дифракции (треугольник) и ДТА (заполненный круг) [1]

В программах «Конструктор ФД» и «Редактор ФД», разработанных в секторе компьютерного конструирования материалов, имеются функции расчета откликов для всех поверхностей,

пересекаемых вертикалью, восстановленной в любой точке концентрационного треугольника. Эти данные позволяют имитировать спектры ДТА. Спектры ДТА, полученные в [1], показаны на рис. 2 (15 из 33 образцов). Их называют эндотермами (фиксируются эндотермические эффекты при нагревании образца).

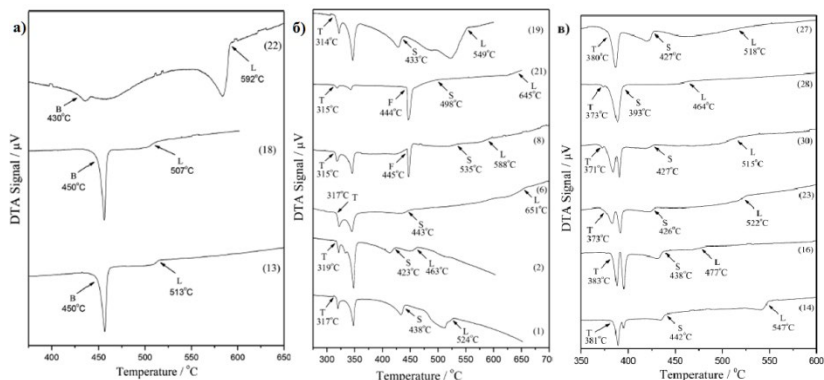


Рис. 2. ДТА образцов разреза $\text{LiCl-K}_2\text{NdCl}_5$ (а), подсистемы $\text{LiCl-KCl-K}_2\text{NdCl}_5$ (б), подсистемы $\text{LiCl-K}_2\text{NdCl}_5\text{-NdCl}_3$ (в). Обозначение температур: В – квазибинарная эвтектика, L – ликвидус, Т – тройная эвтектика, F – образование K_3NdCl_6 , S – вторичная кристаллизация [1]

Составы образцов № 13, 18 и 22 (рис. 1, 2а) попадают на квазибинарный разрез $\text{LiCl-K}_2\text{NdCl}_5$. На них не наблюдается расщепление пика при первой эндотерме, а температура солидуса равна 450°C (плавление квазибинарной эвтектики).

Отличие эндотерм для подсистем $\text{LiCl-NdCl}_3\text{-K}_2\text{NdCl}_5$ (рис. 2в) и $\text{LiCl-K}_2\text{NdCl}_5\text{-KCl}$ (рис. 2б) заключается в том, что во второй из них фиксируется термоэффект образования соединения K_3NdCl_6 , выклинивающегося на ликвидусе при $444\text{--}445^\circ\text{C}$.

На термограмме (рис. 3) представлен спектр ДТА (экзотерма), фиксируемый при равновесной кристаллизации расплава № 27 (рис. 1). Она получена в программе Редактор фазовых диаграмм. Величины пиков соответствуют изменению массовой доле расплава в соответствующем фазовом превращении. Нонвариантное превращение изображается узким вертикальным прямоугольником.

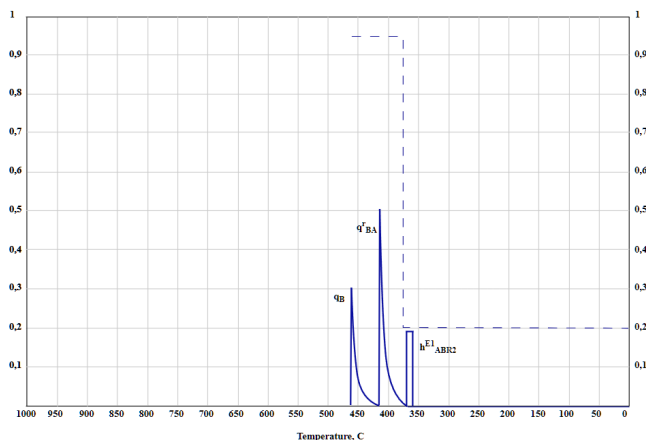


Рис. 3. Имитация ДТА для образца № 27 (рис. 1); показаны экзотермические эффекты, фиксируемые при охлаждении расплава)

В данной работе проанализированы результаты дифференциально-термического анализа, полученные в работе [1] и выполнена имитация спектров ДТА в условиях равновесного охлаждения образцов.

Исследование выполнено в соответствии с госзаданием ФГБУН ИФМ СО РАН, проект № 0270-2024-0013.

Список литературы

1. Ghosh S., Ganesan R., Sridharan R., Gnanasekaran T. Investigation on the Phase Diagram of LiCl-KCl-NdCl₃ Pseudo-Ternary System // J. Phase Equilib. Diffus. 2018. V. 39. P. 916–932. <https://doi.org/10.1007/s11669-018-0695-3>.

С.С. Агнаев¹, К.А. Демин², С.Д. Дондуков¹, А.Н. Хаглеев²

¹ Восточно-Сибирский государственный университет технологий
и управления, Улан-Удэ

² Институт физического материаловедения СО РАН,
Улан-Удэ

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ЭЛЕКТРОДОВ ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИЭТИЛЕНА

Плазменная модификация поверхности – широко применяемый метод активации полимерных материалов, позволяющий повысить поверхностную энергию, смачиваемость и адгезию без изменения объемных свойств. Ключевой проблемой является обеспечение равномерности обработки, на которую существенно влияет геометрическая форма электродов, генерирующих плазменный разряд.

Исследования проводились на экспериментальной плазменной установке. Изучались два варианта геометрической формы алюминиевых электродов, обозначенные как «А» и «Б». (рис 1.)

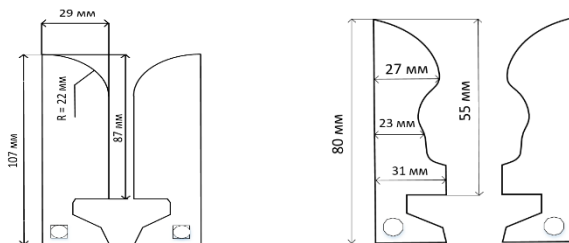


Рис. 1. Схема выбранных для исследования геометрических форм алюминиевых электродов

Эксперименты проводились при напряжениях питания 20, 40 и 60 В. Электрические параметры разряда (амплитуда напряжения, длительность импульсов) регистрировались с помощью цифрового осциллографа Hantek DSOS102P. Объектом исследования служила полиэтиленовая пленка толщиной 100 мкм. Время обработки всех образцов составляло 20 секунд.

Для оценки эффективности модификации измерялись электростатические параметры: поверхностный потенциал (V_s), напряженность электрического поля (E) и эффективная поверхностная плотность заряда ($\sigma_{эф}$) с помощью измерителя ИПЭП-1.

Электроды формы «А» обеспечивали стабильный и равномерный разряд с большей длиной канала (L до 75.8 мм) и меньшим количеством четких временных периодов (T_1 , T_2) по сравнению с электродами «Б». (рис 2).

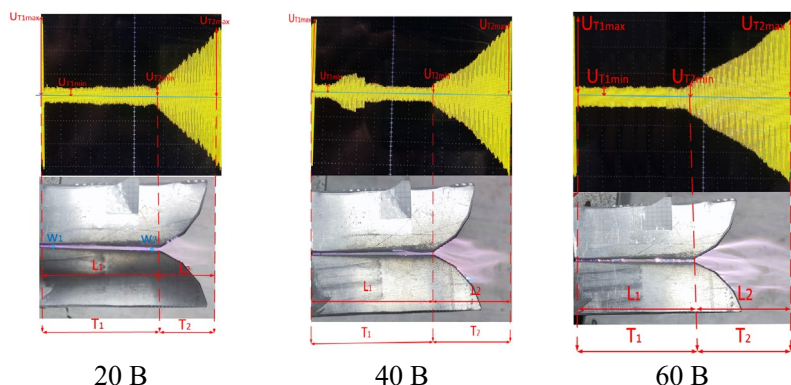


Рис. 2. Осциллограммы, снятые с алюминиевых электродов формы «А»

Электроды формы «Б» характеризовались менее стабильным разрядом с большим количеством коротких импульсов (T_1 , T_2 , T_3) и значительно меньшей длиной плазменного канала (L от 3.2 до 34.25 мм). Это указывает на неравномерность распределения плазмы (рис. 3).

Результаты измерений значений электростатических параметров поверхности ПП после плазменной обработки представлены в таблице.

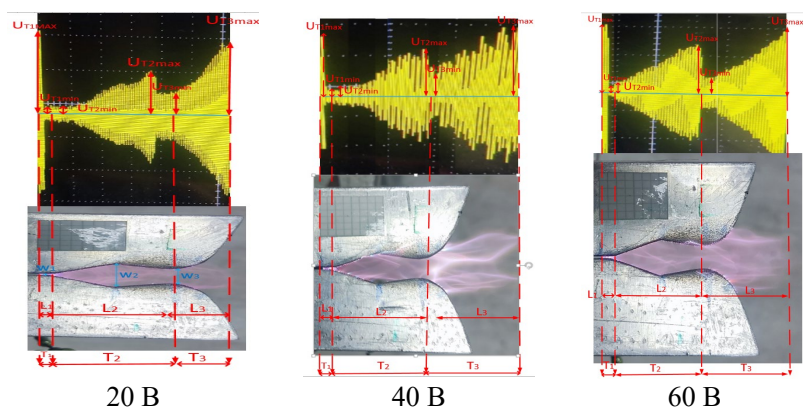


Рис. 3. Осциллограммы, снятые с алюминиевых электродов формы «Б»

Таблица

Форма электродов	Vэ, кВ	E, кВ/м	$\sigma_{эфф}$, мкКл/м ²
А	0.050	2.7	0.051
Б	0.047	1.2	0.041

Более высокие значения всех электростатических параметров для образцов, обработанных с использованием электродов «А», свидетельствуют о более интенсивной и однородной модификации поверхности ПЭ.

Геометрическая форма электродов плазменного модификатора оказывает существенное влияние на стабильность разряда, равномерность обработки и конечные свойства полимерного материала.

Электроды геометрической формы «А» показали себя более эффективными по сравнению с электродами формы «Б», обеспечивая устойчивый плазменный разряд и лучшее распределение электрических параметров.

На основании полученных результатов для установки в сопло плазменного модификатора поверхности рекомендованы электроды геометрической формы «А».

Список литературы

1. Бакаев А.Г., Шпарло Д.А., Покровский А.И. Исследование влияния фуллеренового модификатора на радиопоглощающие свойства полимерных волокнистых композиционных материалов. // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы XIII Международной научно-технической конференции. - Минск: 2018. - С. 31-36.
2. Лангер М., Отто Д. Методы исследования поверхностных характеристик полимеров после плазменной обработки. Сравнительный анализ // Анализ и контроль: технологии, приборы, решения. 2018. № 2 (39). С. 2–7.
3. Гафуров Д. Н., Каримова Г. Ш, Бозорова Н. Х. Изучение влияния модификаторов на физико-механические свойства полимеров. // Research Focus International Scientific Journal. – 2025. – Т. 4, № 1. – С. 16–20.

К.А. Демин^{1,2}, А.Н. Хаглеев^{1,2}, С.С. Агнаев^{1,2}, С.Д. Дондуков^{1,2}

*¹ Институт физического материаловедения СО РАН,
Улан-Удэ*

*² Восточно-Сибирский государственный университет технологий
и управления, Улан-Удэ*

ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ПЛЕНОК ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

В работе представлены результаты исследования микрорельефа поверхности полипропиленовых пленок, активированных в низкотемпературной плазме атмосферного давления. В результате активации происходит увеличение средних параметров шероховатости поверхности, что способствует созданию большего количества рельефных образований для взаимного контакта и адгезии адгезива к поверхности, что приводит к повышению адгезионных свойств.

Полипропилен (ПП) широко используется в машиностроении, строительстве, упаковочной и легкой промышленности благодаря своей химической инертности, высокой прочности на разрыв и диэлектрическим свойствам. Однако низкая поверхностная энергия и слабая адгезия ограничивают его применение в композиционных материалах и покрытиях. Известно, что низкотемпературная плазма атмосферного давления является эффективным методом модификации поверхности ПП, изменяя микрорельеф и улучшая адгезионные свойства [1–5].

Целью данной работы является исследование влияния низкотемпературной плазмы атмосферного давления на микрорельеф поверхности ПП. В исследовании использовался ПП (ГОСТ 26996-86) толщиной 20 мкм. Размер образцов составлял 20×20 мм. Активация поверхности ПП проводилась на экспериментальной установке.

В качестве плазмообразующих газов использовались аргон и смесь аргона с воздухом (50/50). Давление газа составляло 0,4 МПа.

Сопло плазмотрона располагалось перпендикулярно образцу на расстоянии 10 ± 1 мм. Активация поверхности образцов ПП проводилась в течение 15 секунд.

Результаты измерения шероховатости поверхности исходных и активированных образцов представлены в таблице.

Таблица

Параметры шероховатости поверхности исходных
и активированных образцов ПП

Параметры шероховатости поверхности	Rmax, мм	Ra, мм	Rq, мм
Исходный образец ПП	77,1	14,3	18,7
Образец, активированный в аргоне	199,4	41,5	31,9
Образец, активированный в аргоне-воздухе (50/50)	133,1	27,7	33,9

Анализ параметров шероховатости поверхности ПП показал, что плазменная активация существенно изменяет микрорельеф по сравнению с исходным образцом. Для активированных образцов ПП наблюдалось увеличение Rmax с 77,1 нм до 199,4 нм в аргоне и до 133,1 нм в смеси аргона и воздуха (50/50), что свидетельствует о формировании более выраженных неровностей поверхности, способствующих механическому сцеплению клея. Увеличение Ra на 27,2 нм и 13,4 нм соответственно свидетельствует о более высокой средней шероховатости. Параметр Rq, отражающий распределение неровностей, увеличился на 70% и 81%, что свидетельствует о появлении на поверхности ПП структурных образований, способствующих механическому сцеплению клея.

Наиболее существенные изменения микрорельефа поверхности ПП наблюдались при использовании аргона в качестве плазмообразующего газа, что подтверждается наибольшими значениями всех параметров шероховатости. Использование смеси аргона и воздуха (50/50) снижает экономические затраты на процесс активации при сохранении достаточной шероховатости поверхности.

Список литературы

1. Абдуллина В. Х. и др. Влияние низкотемпературной плазменной обработки на химические свойства полипропиленовых волокон // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. – №. 6-2. – С. 297-300.
2. Галимзянова Р. Ю. и др. Влияние неравновесной низкотемпературной плазмы на свойства нетканого многослойного материала на основе полипропилена // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – №. 16. – С. 141-143.
3. Kostov K. G. и др. Surface modification of polymeric materials by cold atmospheric plasma jet // Applied Surface Science. – 2014. – Т. 314. – С. 367-375.
4. Коновалова О. А. и др. Исследование модифицированных пористых мембран методом атомно-силовой микроскопии // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. – 2018. – Т. 160. – №. 1. – С. 81-88.
5. Resnik M. и др. Extracellular vesicle isolation yields increased by low-temperature gaseous plasma treatment of polypropylene tubes // Polymers. – 2020. – Т. 12. – №. 10. – С. 2363.

ОГЛАВЛЕНИЕ

К. В. Артемьева, Ч. Ж. Гулгенов, И. Г. Симаков, С. Б. Базарова. Методика определения диэлектрических свойств адсорбированной воды с помощью поверхностных акустических волн.....	3
А.Д. Шунков, Ю.Б. Башкуев. Влияние техногенных шумов на измерение гидроэлектрокинетического эффекта на берегу оз. Байкал.....	8
А. А. Ершов, Б. Б. Дамдинов. Динамика спектров комбинационного рассеяния света при изменении температуры.....	10
В. А. Пригожих, Б. Б. Дамдинов. Численное моделирование распространения акустических волн в жидкости с одиночным газовым пузырьком.....	15
Ч. М. Митыпов, Б. Б. Дамдинов. Поглощение звука в суспензиях в длинноволновом диапазоне.....	19
И. А. Южаков, Б. З. Гармаев, А. В. Номоев. Микроволновые свойства композита с высоким содержанием микрочастиц магнетита различных марок.....	25
Т. А. Авдеева, Б. Г. Цыремпилов, Д. Д. Сандаков, М. Д. Парфенова, В.И. Луцык. 3D печать фазовых областей Т-х-у диаграмм с нонвариантными равновесиями I-III класса, а также их аналогов и прототипов.....	28
М. Д. Парфенова, В. А. Матвеева, В. П. Воробьева, В. И. Луцык, А.Э. Зеленая. Перекрестная проверка вертикальных и горизонтальных материальных балансов в диаграмме Li, K, Nd Cl.....	34
М. В. Шикueva, М. Д. Парфенова, В. И. Луцык, В. П. Воробьева, А.Э. Зеленая. Имитация термограмм по компьютерной модели диаграммы Li,K,Nd Cl.....	37
С. С. Агнаев, К. А. Демин, С. Д. Дондуков, А. Н. Хаглеев. Оптимизация геометрии электродов плазменной установки для повышения эффективности модификации поверхности полиэтилена.....	40
К. А. Демин, А. Н. Хаглеев, С. С. Агнаев, С. Д. Дондуков. Плазменная модификация поверхности полипропиленовых пленок при атмосферном давлении.....	44

**СБОРНИК ДОКЛАДОВ XXII КОНФЕРЕНЦИИ
ПО ФУНДАМЕНТАЛЬНЫМ
И ПРИКЛАДНЫМ ПРОБЛЕМАМ ФИЗИКИ
(молодых ученых, аспирантов и студентов)**

Научное издание

Утверждено к печати ученым советом
Института физического материаловедения СО РАН

Статьи печатаются в авторской редакции

Верстка и макетирование *С. Б. Базарова*

Подписано в печать 24.11.2025. Формат 60×84 1/16.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 2,8. Уч.-изд. л. 2,5.

РИО Изд-ва ИМБТ СО РАН
670047 г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8.

