

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования



«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Направление подготовки/профиль:  
04.06.01 Химические науки  
02.00.04 Физическая химия  
Школа базовой инженерной подготовки  
Отделение естественных наук

Научный доклад об основных результатах подготовленной  
научно-квалификационной работы

Тема научного доклада
Физико-химические особенности переработки металлических отходов в востребованные материалы современной микроэлектроники

УДК 005.936.5-034-027.33:621.3.049.77

Аспирант

Группа	ФИО	Подпись	Дата
A9-18	Новиков Александр Станиславович		25.05.23

Руководитель профиля подготовки

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор, зав. кафедрой - руководитель ОХИ на правах кафедры	Короткова Елена Ивановна	д.х.н.		25.05.23

Руководитель отделения

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой - руководитель отделения на правах кафедры	Лисичко Елена Владимировна	к.п.н.		25.05.23

Научный руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Мостовщиков Андрей Владимирович	д.т.н.		25.05.23

**Цель и задачи работы.** Целью диссертационного исследования является разработка методик по химической переработке металлических отходов алюминия, железа и меди, описания физико-химических закономерностей данных методик, изучения структуры и полезных свойств получаемых продуктов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать существующие способы переработки алюминия, меди и железа;
2. Изучить влияние ультразвукового излучения на кинетику щелочной и кислотной переработки алюминиевых отходов при различных температурах;
3. Предложить механизм протекающих физико-химических процессов;
4. Получить мелкодисперсные оксиды железа (III) и меди (II) из железных и медных отходов;
5. Синтезировать из данных оксидов феррит меди и изучить его магнитные свойства.

**Научная новизна:**

1. Установлено, что ультразвуковое излучение увеличивает скорость щелочной переработки алюминиевых отходов на 44,1 % при 303 К; на 25,4 % при 313 К; при 323 К увеличения скорости обнаружено не было, длительность индукционного периода при этом снижалась в 2 раза с 2...6 до 1...3 с.
2. Установлено, что ультразвуковое излучение увеличивает скорость кислотой переработки алюминиевых отходов на 89,8 % при 303 К; на 5 % при 313 К, при 323 К изменения скорости не было, длительность индукционного периода снизилась в 2 раза с 20...40 до 10...20 с.
3. По полученным кинетическим кривым были рассчитаны значения

температурных коэффициентов и энергий активации щелочного и кислотного способов переработки алюминиевых отходов. Было установлено, что для данные процессы протекают в переходной внешнедиффузионно-кинетической области. В данной области скорость химической реакции и скорость диффузии соизмеримы, соответственно и интенсифицирующие воздействия для диффузионной среды (акустическое перемешивание и кавитация) и для кинетической (повышение температуры) практически в равной степени ускоряют протекание данных процессов.

4. Предложен механизм, согласно которому интенсифицирующее воздействие ультразвука объясняется сонохимической кавитацией, перемешиванием реакционной среды, небольшим повышением рН и температуры.

5. Впервые из железных и медных отходов был получен феррит меди с ярко выраженными магнитными свойствами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A circularity case for aluminium compared with glass and plastic / J. Brooke // *International Aluminium*. - 2022. — V. 2. — P. 1-4.
2. Opportunities for aluminium in a post-Covid economy / Z. Aljanabi, J. Carrere, C. Cruz // *International Aluminium*. - 2022. — V. 3. — P. 1-8.
3. Зайнуллин Е. «Русал» отрезают от сырья // «Коммерсантъ». — 2022. — № 47. — С. 9—10.
4. Митина Н. Н., Гнетов В. М. Утилизация промышленных отходов в России и в мире: проблемы и решения // «Neftegaz.RU». — 2020. — № 3. — С. 1—20.
5. Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions. The role of waste-to-energy in the circular economy. Brussels. 26.01.2017.
6. Вторичная переработка полимеров, 2018: Пост-релиз конференции. – 16 февраля 2018. – Москва. – URL: <http://www.creonenergy.ru>.
7. Борисов А.Б. Большой экономический словарь. – М.: Книжный мир, 2003. – С. 895.
8. Отходы в графиках и диаграммах – 3.0. ОБСЕ, Базельская конвенция. 2012. // Organization for Security and Co-operation in Europe. – URL: [http://www.envsec.org/publications/vitalwaste3\\_rus\\_1.pdf](http://www.envsec.org/publications/vitalwaste3_rus_1.pdf)

9. Мажорова О. Электронные отходы в России: подходы есть, культуры нет // CNews Аналитика, 11.05.2017. – URL: [http://www.cnews.ru/articles/2017-05-12\\_elektronnye\\_othody\\_v\\_rossii\\_podhody\\_est\\_kultury\\_net](http://www.cnews.ru/articles/2017-05-12_elektronnye_othody_v_rossii_podhody_est_kultury_net)
10. Образование, использование, обезвреживание и размещение отходов производства и потребления в Российской Федерации // Федеральная служба государственной статистики. – URL: <http://www.gks.ru>
11. Решение Комиссии ТС № 769 от 16 августа 2011 г. «О принятии технического регламента Таможенного союза "О безопасности упаковки"».
12. Решение Совета ЕЭК от 15 июня 2012 года № 35.
13. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. – М.: Бюро НТД, 2015. № 5. – 479 с.
14. Рзаев К.В. Переработка отходов пластмасс в России. ТКО, 2017. № 1. – С. 7–9.
15. Распоряжение Правительства РФ от 25.07.2017 № 1589-р «Об утверждении перечня видов отходов производства и потребления, в состав которых входят полезные компоненты, захоронение которых запрещается».
16. Маркова А.А. Экономические проблемы утилизации бытовых и промышленных отходов/ Маркова А.А., Иванова А.А., Пономарев С.В. // Молодой ученый, 2017. – № 21. – С. 218–220.
17. Девяткин В. В. Экономические условия переработки отходов по малотоннажным технологиям и рекомендации по мерам стимулирования в этой области / Девяткин В.В., Гаев Ф.Ф. // Твердые бытовые отходы, 2006. – № 6. – С. 8–9.
18. Шуваринова Е.В. Использование международного опыта для решения проблем управления отходами производства и потребления в Пермском крае // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: экономика и менеджмент, 2010. – № 7 (183). – С. 41–48.
19. Пономарев М.В. Тенденции и перспективы совершенствования законодательства в сфере обращения с отходами производства и потребления // Журнал российского права, 2013. – № 4. – С. 22–32.
20. Абрамов А.В. Оценка эффективности рециклинга // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, 2009. – Т. 4. – С. 36–38.
21. Impacts of using non automated technologies on the Business Performance of Zimbabwean metal recycling industries / P. Musademba, J. Simuka, T. Zimucha // Journal of Research and Innovation for Sustainable Society. - 2022. — V. 4. — P. 42-50.
22. Potential global GHG emissions reduction from increased adoption of metals recycling / M. Gorman, D. Dzombak, C. Frischmann// Resources, Conservation & Recycling. - 2022. — V. 182. — 106424.
23. A Three- Dimensional Comprehensive Numerical Model of Ion Transport during Electro-Refining Process for Scrap-Metal Recycling/ C. Liu, G. Li, L. Zhang, Q. Wang // Materials. - 2022. — V. 15. — 2789.

24. China's non-ferrous metal recycling technology convergence and driving factors: A quadratic assignment procedure analysis based on patent collaboration-based network structural hole/ K. Luo, S. Zor // PLOS ONE. - 2022. — V. 17. — P. 1-30.
25. Copper Recycling Flow Model for the United States Economy: Impact of Scrap Quality on Potential Energy Benefit/ T. Wang, P. Berrill, J. Zimmerman, E. Hertwich // Environmental Science & Technology. - 2021. — V. 55. — P. 5485-5495.
26. Dynamic analysis of in-use copper stocks by the final product and end-use sector in Japan with implication for future demand forecasts/ R. Yokoi, J. Nakatani, H. Hatayama, Y. Moriguchi // Resources, Conservation & Recycling. - 2022. — V. 180. — 106153.
27. Potential-Mediated Recycling of Copper from Brackish Water by an Electrochemical Copper Pump/ H. Deng, W. Wei, L. Yao, Z. Zheng, B. Li, A. Abdelkader, L. Deng // Advanced Science. - 2022. — V. 9. — 2203189.
28. Recycling and Reusing Copper and Aluminum Current-Collectors from Spent Lithium-Ion Batteries/ H. Khatibi, E. Hassan, D. Frisone, M. Amiriyan, R. Farahati, S. Farhad // Energies. - 2022. — V. 15. — 9069.
29. Importance of Recycling the Waste-Cables Containing Copper and PVC/ L. Blinova, P. Godovcin // Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology. - 2021. — V. 48. — P. 1-21.
30. Current challenges in copper recycling: aligning insights from material flow analysis with technological research developments and industry issues in Europe and North America/ A. Loibl, L. Espinoza // Resources, Conservation & Recycling. - 2021. — V. 169. — 105462.
31. The Multiple Facets of Iron Recycling/ P. Slusarczyk, K. Mleczko-Sanecka // Genes. - 2021. — V. 12. — 1364.
32. Cutting Performance Analysis of a Single Shaft Shredder for Various Recycling Metal Materials/ O. Oguclu, C. Yildirim // Journal of Engineering Sciences and Design. - 2022. — V. 11. — P. 1-10.
33. NCOA4 Regulates Iron Recycling and Responds to Hepcidin Activity and Lipopolysaccharide in Macrophages/ C. Guggisberg, J. Kim, J. Lee, X. Chen, M. Ryu // Antioxidants. - 2022. — V. 11. — 1926.
34. The content of toxic elements in soil-plant system based on ombrotrophic peat with the copper smelting slag recycling waste/ E. Zolotova, A. Kotelnikova, V. Ryabinin // Pollution. - 2023. — V. 9. — P. 286-298.
35. Яшалова Н.Н. Эколого-экономические проблемы переработки отходов в рамках концепции «зеленой». // Стратегия развития экономики.– №43(232), 2013.– С. 28-36.

36. Годымчук А. Ю., Ильин А.П., Астанкова А. П. Окисление нанопорошка алюминия в жидкой воде при нагревании // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2007. – Т. 310. – № 1. – С. 102–104.
37. Ермоленко Н.Ф., Эфрес М.Д. Регулирование пористой структуры окисных адсорбентов и катализаторов. – М.: Наука, 1991. – 360 с.
38. Годымчук А.Ю., Ан В.В., Ильин А.П. Формирование пористых структур оксида-гидроксида алюминия при взаимодействии нанопорошков алюминия с водой // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – № 5. – С. 69–73.
39. Ильин А.П., Коршунов А.В., Толбанова Л.О. Наноалюминий – будущее водородной энергетики // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 4. – С. 10–14.
40. Жилинский В.В., Локенбах А.К., Лепинь Л.К. Взаимодействие ультрадисперсного алюминия с водой и водными растворами // Известия АН ЛатвССР. Сер. Химия. – 1986. – № 2. – С. 151–161.
41. Тихов С.Ф., Романенков В.Е., Садыков В.Н. и др. Физико-химические основы синтеза пористых композитных материалов через стадию гидротермального окисления порошкообразного алюминия // Кинетика и катализ. – 2005. – Т. 46. – № 5. – С. 682–700.
42. Бакуменко О. М. Физико-химические закономерности взаимодействия алюминия и его сплавов с водными и водно-спиртовыми растворами сильных оснований: Автореф. дис. ... к.х.н / Харьк. нац. Ун-т им. В.Н. Каразина. – Харьков, 2003. – 18 с.
43. Ратько А.И., Романенков В.Е., Болотникова Е.В., Крупеньки на Ж.В. Гидротермальный синтез пористой металлокерамики  $Al_2O_3/Al$ . 1. Закономерности окисления порошкообразного алюминия и формирование структуры пористого композита  $Al(OH)_3/Al$  // Кинетика и катализ. – 2004. – Т. 45. – № 1. – С. 154–161.
44. Проскуровская Л.Т. Физико-химические свойства электровзрывных ультрадисперсных порошков алюминия: Дис. ... к.х.н / Томский политехн. Ин-т. – Томск, 1988. – 155 с.
45. Ляшко А.П., Медвинский А.А., Савельев Г.Г., Ильин А.П., Яворовский Н.А. Особенности взаимодействия субмикронных порошков алюминия с жидкой водой: макрокинетика, продукты, проявление саморазогрева // Кинетика и катализ. – 1990. – Т. 31. – № 4. – С. 967–972.
46. Гаджиев С.Н., Ильин А.П., Кертман С.В., Хасанов О.Л. Энергетика алюминия в ультрадисперсном состоянии // Физико-химия ультрадисперсных порошков: Межвуз. сб. науч. тр. – Ч. 1. – Томск: НИИ ВН при ТПИ, 1990. – С. 62–67.

47. Иванов В.Г., Сафронов М.Н., Гаврилюк О.В. Макрокинетика окисления ультрадисперсного алюминия водой в жидкой фазе // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37. – № 2. – С. 57–62.
48. Стрелецкий А.Н., Колбанев И.В., Борунова А.Б., Бутягин П.Ю. Механохимическая активация алюминия. 3. Кинетика взаимодействия алюминия с водой // Коллоидный журнал. – 2005. – Т. 65. – № 5. – С. 694–701.
49. Тихонов В.Н. Аналитическая химия алюминия / Серия «Аналитическая химия элементов». – М.: Наука, 1971. – 266 с.
50. Коршунов А.В., Голушкова Е.Б., Перевезенцева Д.О., Ильин А.П. Макрокинетика взаимодействия электровзрывных нанопорошков алюминия с водой и водными растворами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2008. – Т. 312. – № 3. – С. 5–10.
51. Джилинский В.В., Локхенбах А.К., Лепинь Л.К. Взаимодействие ультрадисперсного алюминия с водой и водными растворами // Известия АН Латв. ССР. Серия химия. – 1986. – № 2. – С. 151–161.
52. Ильин А.П., Громов А.А., Яблуновский Г.В. Об активности порошков алюминия // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37. – № 4. – С. 58–62.
53. Ильин А.П., Годымчук А.Ю., Тихонов Д.В. Пороговые явления при окислении нанопорошков алюминия // Физико-химия ультрадисперсных (нано) систем: Тезисы докл. VII Всеросс. конф. – М.: Типография МИФИ, 2005. – С. 178–179.
54. Ляшко А.П. Особенности взаимодействия с водой и структура субмикронных порошков алюминия: Дис. ... к.т.н. – Томск, 1988. – 178 с.
55. Годымчук А.Ю., Астанкова А.А. Использование нанопорошка алюминия для получения водорода // Проблемы теоретической и экспериментальной химии: Тезисы докл. XV Всеросс. студ. науч. конф. – Екатеринбург: Изд-во Уральского госуниверситета, 2005. – С. 125.
56. Сакович Г.В., Архипов В.А., Ворожцов А.Б., Бондарчук С.С., Певченко Б.В. Исследование процессов горения ВЭМ с нанопорошками алюминия // Российские нанотехнологии. – 2010. – Т. 5. – № 1–2. – С. 89–101.
57. Коршунов А.В. Влияние размеров и структуры частиц порошков алюминия на закономерности их окисления при нагревании в воздухе // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 3. – С. 5–11.
58. Vargel C. Corrosion of aluminium. – Hardbound, Elsevir, 2004. – 700 p.
59. Печенюк С.И., Симушин В.В., Архипов И.В. Кислотно-основные свойства поверхности гидрогелей оксигидроксида алюминия // Известия Челябинского научного центра. – 2006. – № 4 (34). – С. 64–68.

60. Лидин Р.А., Андреева Л.Л., Молочко В.А. Константы неорганических веществ: справочник. – М.: Дрофа, 2006. – 685 с.
61. Накамото К. ИК спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений / Пер. с англ. под ред. Ю.А. Пентина. – М.: Мир, 1991. – 536 с.
62. Литтл Л. Инфракрасные спектры адсорбированных молекул / Пер. с англ. под ред. В.И. Лыгина – М.: Мир, 1969. – 516 с.
63. Промышленный катализ в лекциях / под ред. А.С. Носкова. – М.: Калвис, 2009. – Вып. 8. – 112 с.
64. Баличева Т.Г., Лобанева О.А. Электронные и колебательные спектры неорганических и координационных соединений. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1983. – 117 с.
65. Киселев А.В., Лыгин В.И. Инфракрасные спектры поверхностных соединений и адсорбированных веществ. – М.: Наука, 1972. – 460 с.
66. Петрий О.А., Лунин В.В. Катализ. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1987. – 287 с.
67. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Логачев В.С., Коротков А.И. Горение порошкообразных металлов в активных средах. – М.: Наука, 1972. – 294 с.
68. Колпакова Н.А., Романенко С.В., Колпаков В.А. Сборник задач по химической кинетике. - Томск: Изд-во ТПУ, 2009. — 280 с.
69. Степин Б.Д., Цветков А.А. Неорганическая химия. – М.: Высшая школа, 1994. – 608 с.
70. Громов А.А., Хабас Т.А., Ильин А.П., Попенко Е.М. и др. Горение нанопорошков металлов. – Томск: Дельтаплан, 2008. – 382 с.
71. Шабанова Н.А., Попов В.В., Саркисов П.Д. Химия и технология нанодисперсных оксидов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 309 с.
72. Дельмон Б. Кинетика гетерогенных реакций / Пер. с франц. – М.: Мир, 1972. – 556 с.
73. Третьяков В.Е., Бурдейная Т.Н., Березина Л.А., Любушкин Р.А. Получение чистого водорода для мобильных источников // Безопасность жизнедеятельности. – 2004. – № 11. – С. 27–31.
74. Activation of Peracetic Acid with  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  for Rhodamine B Degradation: Activation by Cu and the Contribution of Acetylperoxyl Radicals/ C. Yu, L. Zheng, Y. Hong, J. Chen, // *Molecules*. - 2022. — V. 27. — 6385.
75. Role of  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  in elemental mercury adsorption and oxidation on modified bentonite for coal gasification/ M. An, N. Yuan, Q. Guo, X. Wei // *Fuel*. - 2022. — V. 328. — 125231.



76. Facile synthesise of PANI/GO/CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanocomposite material with synergistic effect for superb performance supercapacitor/ A. Ghasemi, M. Ghorbani, M. Lashkenari, N. Nasiri // *Electrochimica Acta*. - 2023. — V. 439. — 141685.
77. Study of Magnetic and Temperature-Dependent Dielectric Properties of Co-CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanoferrites / R. Dhyani, R. Srivastava, G. Dixit // *Journal of Electronic Materials*. - 2022. — V. 51. — 5492–5507.
78. Biosynthesis of Zn-doped CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles and their cytotoxic activity / M. Darvish, N. Nasrabadi, F. Fotovat, S. Khosravi // *Scientific Reports*. - 2022. — V. 12. — 9442.
79. Hollow CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Heterojunction Boost Photocatalytic Oxidation Activity for Organic Pollutants/ Z. Zhang, W. Cai, S. Rong, H. Qu // *Catalysts*. - 2022. — V. 12. — 9069.
80. Type-II CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Graphitic Carbon Nitride Heterojunctions for High-Efficiency Photocatalytic and Electrocatalytic Hydrogen Generation / A. Mehtab, S. Banerjee, Y. Mao, T. Ahmad // *ACS Applied Materials & Interfaces*. - 2022. — V. 39. — P. 44317–44329.
81. The Catalytic Reduction of Nitroanilines Using Synthesized CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles in an Aqueous Medium/ S. Naghash-Hamed, N. Arsalani, S. Mousavi// *ChemistryOpen*. - 2022. — V. 11. — 910.
82. Hydrothermally synthesized CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/rGO and CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/porous carbon nanocomposites/ V. Kotsyubynsky, R. Zapukhlyak, V. Boychuk// *Applied Nanoscience*. - 2021. — V. 12. — P. 1-8.
83. Magnetic CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles with Pseudocapacitive Properties for Electrical Energy Storage/ W. Liang, W. Yang, S. Sakib, I. Zhitomirsky// *Molecules*. - 2022. — V. 27. — 5313.
84. Magnetic and catalytic properties of cubic copper ferrite nanopowders synthesized from secondary resources/ M.M. Rashad, R.M. Mohamed, M.A. Ibrahim// *Advanced Powder Technology*. - 2012. — V. 23. — P. 315-323.
85. Магнитные свойства и параметры структуры наноразмерных порошков оксидных ферримагнетиков, полученных методом механохимического синтеза из солевых систем/ Е. П. Найден, В. А. Журавлев, В. И. Итин// *Физика твердого тела*. — 2008. — Т. 50, № 5. — С. 857—863.
86. Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии. - Москва: Изд-во Химия, 1990. — 208 с.
87. PDF 2 database, 1996, International Centre for Diffraction Data, Newtown Square, Pennsylvania, USA.
88. Иконникова К.В., Саркисов Ю.С., Иконникова Л.Ф. Алгоритм расчета констант кислотно-основного равновесия водных растворов слабых

электролитов // Техника и технология силикатов. – 2005. – Т. 12. – № 1–2. – С. 11–16.

89. Зинюк Р.Ю., Балыков А.Г., Гавриленко И.Б. и др. ИК спектроскопия в неорганической технологии. – Л.: Химия, 1983. –160 с.

90. Барабанов В.Ф. Современные физические методы в геохимии. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1990. – 391 с.

91. A comprehensive numerical analysis of heat and mass transfer phenomenons during cavitation sono-process / A. Dehane, S. Merouani, O. Hamdaoui, A. Alghyamah // Ultrasonics Sonochemistry. - 2021. — V. 73. — 105498.

92. Assessment of the olive oil extraction plant layout implementing a high-power ultrasound machine / A. Tamborrino, A. Taticchi, R. Romaniello, C. Perone, S. Esposto, A. Leone, M. Servili // Ultrasonics Sonochemistry. - 2021. — V. 73. — 105505.

93. Electron paramagnetic resonance of sonicated powder suspensions in organic solvents / H. Laajimi, M. Mattia, R. S. Stein, C. L. Bianchi, D. C. Boffito // Ultrasonics Sonochemistry. - 2021. — V. 73. — 105544.

94. Nanostructured TiO<sub>2</sub> cavitation agents for dual-modal sonophotocatalysis with pulsed ultrasound / U.S. Jonnalagadda, X. Su, J.J. Kwan // Ultrasonics Sonochemistry. - 2021. — V. physical, chemical, microbiological and sensory properties / L. M. Carrillo-Lopez, I. A. Garcia-Galicia, J. M. Tirado-Gallegos, R. Sanchez-Vega, M. Huerta-Jimenez, M. Ashokkumar, A. D. Alarcon-Rojo // Ultrasonics Sonochemistry. - 2021. — V. 73. — 105467.

95. Self-cleaning of SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> coating: Effect of sonochemical synthetic parameters on the morphological, mechanical, and photocatalytic properties of the films / A. Rosales, L. Ortiz-Frade, I. E. Medina-Ramirez, L. A. Godínez, K. Esquivel // Ultrasonics Sonochemistry. - 2021. — V. 73. — 105483.

96. Sonochemical activation-assisted biosynthesis of Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles and sonocatalytic degradation of methyl orange / A. J. Ruíz-Baltazar // Ultrasonics Sonochemistry. - 2021. — V. 73. — 105530.

97. Synergistic inactivation of bacteria based on a combination of low frequency, lowintensity ultrasound and a food grade antioxidant / C. N. Huua, R. Raia, X. Yanga, R. Tikekarb, N. Nitina // Ultrasonics Sonochemistry. - 2021. — V. 74. — 105567.

98. Sonochemical effect and pore structure tuning of silica xerogel by ultrasonic irradiation of semi-solid hydrogel / Y. Maeda, Y. Hayashi, J. Fukushima, H. Takizawa // Ultrasonics Sonochemistry. - 2021. — V. 73. — 105476.

99. Designing Microflowreactors for Photocatalysis Using Sonochemistry: A Systematic Review Article / S. R. Pradhan, R. F. Colmenares-Quintero, J. C. Quintero // Molecules. - 2019. — V. 24. — 3315.

100. A review on recent advances in hydrogen energy, fuel cell, biofuel and fuel refining via ultrasound process intensification / U. K. Zore, S. G. Yedire, N. Pandi, S. Manickam, S. H. Sonawane // Ultrasonics Sonochemistry. - 2021. — V. 73. — 105536.
101. Energy balance of high-energy stable acoustic cavitation within dual-frequency sonochemical reactor / K. Kerboua, O. Hamdaoui, A. Alghyamah // Ultrasonics Sonochemistry. - 2021. — V. 73. — 105471.
102. Sonochemistry / K. S. Suslick // Science. - 1990. — V. 247. — P. 1493-1445.
103. Sonochemistry as a New Promising Area of High Energy Chemistry / M. A. Margulis // High Energy Chemistry. - 2004. — V. 38. — P. 135-142.
104. Ковба Л.М., Трунов В.К. Рентгенофазовый анализ. – М.: МГУ, 1976. – 231 с.
105. Новиков А.С., Мостовщиков А. В. Влияние ультразвукового излучения на кинетику процесса щелочной переработки алюминиевых отходов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2022. — Т. 333, № 3. — С. 49—56.
106. Новиков А.С., Мостовщиков А. В. Разработка методики синтеза фосфата алюминия и водорода из алюминиевого лома // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2022. — Т. 333, № 11. — С. 24—31.
107. Новиков А.С., Мостовщиков А. В., Сударев Е. А. Сравнительный анализ физико-химических методик переработки алюминиевых отходов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2023. — Т. 334, № 4. — С. 53—61.
108. <https://keramet.ru/priem-metalicheskoi-struzhki/#:~:text=%D0%A6%D0%B5%D0%BD%D1%8B%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%B5%D0%BC%D0%B0%20%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BB%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B9%20%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%B6%D0%BA%D0%B8&text=%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%B5%D0%B7%D0%B6%D0%B0%D0%B5%D0%BC%20%D0%B2%20%D0%9C%D0%BE%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D1%83%D1%8E%20%D0%BE%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8C%20%D0%B4%D0%BB%D1%8F,%D1%86%D0%B5%D0%BD%D0%B5%207500%20%D1%80%D1%83%D0%B1%D0%BB%D0%B5%D0%B9%20%D0%B7%D0%B0%20%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%83.>
109. <https://himpitertorg.ru/kisloti-i-shelochi/natrij-gidrookis.html>
110. <https://www.kronwerk.net/direction/rastvoriteli/distillirovannaya-voda/>
111. <https://www.mkmagna.ru/catalog/kislota-solyanaya-reaktiv/>

112. [https://www.alfagaz-nsk.ru/products/120613387-vodorod\\_osoboy\\_chistoty\\_99\\_999](https://www.alfagaz-nsk.ru/products/120613387-vodorod_osoboy_chistoty_99_999)
113. [https://promsnab.me/catalog/lakokrasochnye\\_materialy/komponenty\\_dlya\\_krasok/gidroksid\\_aluminiya/](https://promsnab.me/catalog/lakokrasochnye_materialy/komponenty_dlya_krasok/gidroksid_aluminiya/)
114. [https://www.profsnab.su/goods/68505817-kali\\_fosfornokisly\\_odnozameshchenny](https://www.profsnab.su/goods/68505817-kali_fosfornokisly_odnozameshchenny)
115. [https://www.granhim.ru/goods/119610311-alyumini\\_fosfornokisly\\_3\\_zameshchenny\\_ch](https://www.granhim.ru/goods/119610311-alyumini_fosfornokisly_3_zameshchenny_ch)
116. <https://reaktivtorg.ru/alyuminiy-khloristy-6-vodnyy/>
117. [https://chel.pulscen.ru/products/azotnaya\\_kislota\\_kontsentrirrovannaya\\_248519588](https://chel.pulscen.ru/products/azotnaya_kislota_kontsentrirrovannaya_248519588)
118. [http://novosibirsk.regorg.ru/goods/t447528-prodazha\\_kisloroda\\_40l\\_v\\_novosibirske.htm](http://novosibirsk.regorg.ru/goods/t447528-prodazha_kisloroda_40l_v_novosibirske.htm)
119. [https://n4.biz/products/-/products/item\\_details/84770176\\_%D0%92%D1%8B%D1%81%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D1%87%D0%B8%D1%81%D1%82%D1%8B%D0%B9-%D0%BE%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%B4-%D0%B6%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B7%D0%B0-III-Fe2O3-99-3-%D0%BE%D0%BF%D1%82%D0%BE%D0%BC](https://n4.biz/products/-/products/item_details/84770176_%D0%92%D1%8B%D1%81%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D1%87%D0%B8%D1%81%D1%82%D1%8B%D0%B9-%D0%BE%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%B4-%D0%B6%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B7%D0%B0-III-Fe2O3-99-3-%D0%BE%D0%BF%D1%82%D0%BE%D0%BC)
120. [https://baza1r.ru/katalog/soli/natriy\\_azotnokislyy\\_nitrat/](https://baza1r.ru/katalog/soli/natriy_azotnokislyy_nitrat/)
121. [https://www.profsnab.su/goods/11342516-med\\_ii\\_oxid\\_poroshok\\_chda\\_fasovka\\_20kg](https://www.profsnab.su/goods/11342516-med_ii_oxid_poroshok_chda_fasovka_20kg)
122. <https://www.chipdip.ru/product/m1000nn-100x60x15>