

УДК 544.576:546.62:544.038:54-145.15:546.62'226.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ МЕТОДИК ПЕРЕРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ ОТХОДОВ

Новиков Александр Станиславович¹,
truegraf1995@gmail.com

Мостовщиков Андрей Владимирович^{1,2,3},
avmost@tpu.ru

Сударев Евгений Александрович¹,
sudarev@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

³ Томский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки новых методик по утилизации металлических отходов. Данное направление, при участии различных интенсифицирующих воздействий, относится к ресурсосберегающим, технологическим, минимизирующим объемы капитальных затрат на сырьё, производство и последующую реализацию.

Цель: изучить физико-химические методики по щелочной и кислотной переработке алюминиевых отходов в поле ультразвука, рассмотреть механизмы этих процессов, сравнить кинетические характеристики, выявить плюсы и минусы методик и на основании сравнительного анализа сделать вывод о том, какая из методик наиболее эффективна.

Объекты: образцы алюминиевых отходов в виде пластинок и стружки.

Методы: волюмометрия, сонохимический синтез, оценка и анализ кинетических кривых процесса при разных температурах, рентгенофазовый анализ.

Результаты. Проведен анализ кинетических кривых, констант скоростей процессов при различных температурах, порядков химических реакций. Были сравнены между собой значения энергий активации целевых химических реакций, характеристики кинетических областей процессов. Несмотря на длительный индукционный период, кинетический потенциал кислотной переработки алюминиевых отходов оказался в 2 раза выше, чем у щелочной при температурах 313–323 К. Ультразвуковое излучение на эту характеристику существенно не влияло, хотя и снижало индукционный эффект в 2 раза. Механизмы протекающих сонохимических процессов в данных методиках оказались очень схожими между собой, принципиальных различий не наблюдалось. Полученные в ходе химической переработки продукты в виде водорода, гидроксида, хлорида и ортофосфата алюминия на данный момент крайне востребованы в энергетической, химической и силикатной промышленности, а также в медицине.

Ключевые слова:

Сонохимия, утилизация отходов, получение водорода, получение гидроксида алюминия, получение фосфата алюминия, волюмометрия, изучение кинетики, рентгенофазовый анализ.

Введение

Алюминий является самым распространенным металлом на нашей планете (от 7,45 до 8,14 %), а также одним из самых активных ($\varphi = -1,67$ В), из-за чего в чистом виде он не встречается [1].

Производство металла делится на три основных этапа: добыча бокситов – алюминийсодержащей руды, их переработка в глинозем – оксид алюминия, и, наконец, получение чистого металла с использованием процесса электролиза – распада оксида алюминия на составные части под воздействием электрического тока. Из 4–5 т бокситов получается 2 т глинозема, из которого производят 1 т алюминия [2].

На сегодняшний день из-за наложенных санкций решением властей Австралии были прекращены поставки глинозема в Россию, что, в свою очередь, стало оказывать давление на российский холдинг «Русал», которому пришлось остановить работу Николаевского глиноземного завода, второго по объему производства

в составе холдинга. Данный холдинг в основном занимается продажей глинозема, но часть закупает. В 2021 г. у зарубежных компаний холдинг закупил 836 тыс. т глинозема, а продал 1700 тыс. т. Сокращение поставок глинозема ограничивает возможности роста производства, так как большинство глиноземных заводов работают, как правило, на полной мощности [3].

Одной из альтернатив получения глинозема, а именно оксида алюминия, является химическая переработка алюминиевых отходов. Следствием повышенного спроса на алюминиевую продукцию является образование больших объемов его отходов. Согласно расчётам [2], 1 кг собранных и сданных в переработку алюминиевых банок позволяет сэкономить около 8 кг бокситной руды, примерно 4 кг различных фторидов, используемых в электролизе расплавов [4].

Переработка алюминия имеет ряд ключевых экологических и экономических преимуществ. Однако накопленные примеси в образцах рециркулируемых

материалов могут создавать значительный композиционный барьер для достижения поставленных целей. Алюминиевая стружка, в отличие от других типов алюминиевых отходов, содержит в себе алюминий, оксид алюминия, а также около 40 % различных примесей металлургических производств [5, 6], в том числе и следы машинного масла, что не позволяет переработать её классическим способом – переплавкой.

Наиболее простыми в реализации являются физико-химические методики по щелочной [5] и кислотной [6] утилизации алюминиевых отходов – они не требуют сложного оборудования, дорогих химических реактивов и большого объема электроэнергии для нагрева, поскольку целевые химические реакции обладают невысокими значениями энергий активаций и при этом являются экзотермическими.

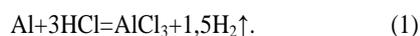
Данные методики в качестве интенсифицирующего агента используют ультразвуковое излучение, которое способствует увеличению их эффективности на 25–90 %. Ультразвук, согласно последним исследованиям, применяют для множества технологических процессов и сонохимических исследований [7–15]. Сонохимия – раздел химии, который изучает влияние ультразвуковой энергии на химические реакции, а также проявляющиеся при этом физические, химические, а также физико-химические эффекты [16–21].

С помощью данных методик возможно получение различных химических соединений алюминия, в том числе и оксида алюминия из алюминиевых отходов, даже с высоким содержанием примесей. Благодаря этому из непригодных для переплавки отходов можно получить альтернативное сырье для алюминиевых производств на стадии электролиза глинозема. В условиях сегодняшней мировой обстановки крайне актуален вопрос импортозамещения, поэтому разработка Российских методик по утилизации отходов алюминиевых производств является крайне актуальной задачей.

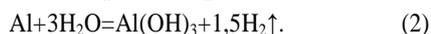
Цель данной работы заключалась в том, чтобы сравнить между собой физико-химические методики по щелочной и кислотной переработки алюминиевых отходов в поле ультразвука, рассмотреть механизмы этих процессов, сравнить кинетические характеристики, выявить плюсы и минусы методик и на основании сравнительного анализа сделать вывод о том, какая из методик наиболее эффективна, экономически оправдана, а также продукты какой из методик обладают наибольшим потенциалом для внедрения в производство алюминия.

Физико-химические основы и описание методик

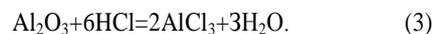
Алюминий, являясь крайне активным металлом, способен вытеснить водород из растворов соляной кислоты в ходе химической реакции, продуктами которой являются газообразный хлорид алюминия и водород:



А также он способен вытеснить водород из воды в ходе химической реакции, продуктами которой являются газообразный водород и гидроксид алюминия:



Помимо этого, из-за высокой активности на воздухе он быстро покрывается оксидной пленкой. В связи с этим для осуществления химической реакции (1) необходимо учитывать дополнительную стадию – химическое растворение оксида алюминия с внешней поверхности образца раствором кислоты или щелочи [22]. Химическая реакция на примере взаимодействия с соляной кислотой выглядит следующим образом (3):



Химическая реакция на примере взаимодействия с гидроксидом натрия выглядит следующим образом (4) [19]:

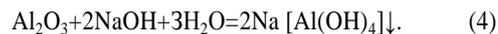


Схема установки, применяемой в методиках, подробно описанных в [5, 6], представлена на рис. 1.

В качестве основного оборудования использовались: рентгенофазовый анализ (ДРОН-3М), синхронный термический анализ (NETZSCH STA 449 F3 Jupiter), электронномикроскопический анализ (JEOL JCM 6000) с увеличением от 200 до 1000.

Сравнительный анализ кинетических характеристик

На рис. 2 представлены кинетические кривые для целевых химических реакций щелочной (1) и кислотной (2) переработки при различных температурах без интенсификации ультразвуковым излучением. Реакции обладают нулевым порядком и проводились в одинаковых условиях.

Согласно данным [5, 6], при 303 К скорость реакции (1) вначале (степень превращения ~25 %) процесса химической переработки несколько выше скорости реакции (2), однако к окончанию процессов значение константы скорости реакции (2) становится выше на 15 %.

При 313 К наблюдается значительный разрыв между скоростями реакций (1) и (2) после степени превращения алюминиевых отходов ~33 %. К окончанию процессов значение константы скорости реакции (2) становится выше реакции (1) на 128 %.

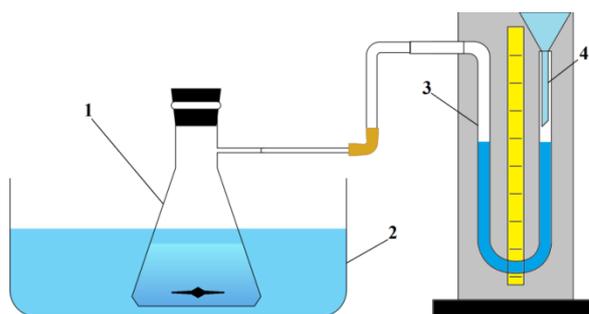


Рис. 1. Схема волуметрической установки: 1 – круглодонная колба с анализируемым образцом; 2 – ультразвуковая ванна; 3 – градуированная бюретка; 4 – воронка

Fig. 1. Scheme of the volumetric installation: 1 – round-bottom flask with the analyzed sample; 2 – ultrasonic bath; 3 – graduated burette; 4 – funnel

При 323 К наблюдается разрыв между скоростями реакций (1) и (2) в сторону реакции (1) до степени превращения алюминиевых отходов ~67 % и в сторо-

ну реакции (2) после степени превращения ~67 %. К окончанию процессов значение константы скорости реакции (2) становится выше реакции (1) на 100 %.

Как видно из табл. 1, целевая реакция (2) кислотной методики по переработке алюминиевых отходов из-за длительного индукционного периода вначале процесса имеет более низкие значения скорости реакции, чем целевая реакция (1) щелочной методики в диапазоне температур 303–323 К. Стоит отметить,

что повышение температуры, хоть и оказывает интенсифицирующее воздействие на химические реакции обеих методик, оказывает его неравномерно. С ростом температуры увеличивается продолжительность превалирования скорости реакции (1) над скоростью реакции (2) со степени превращения 25 до 67 %. Тем не менее итоговое значение константы скорости всегда оказывалось выше у реакции (2), максимум в 128 % достигался при 313 К.

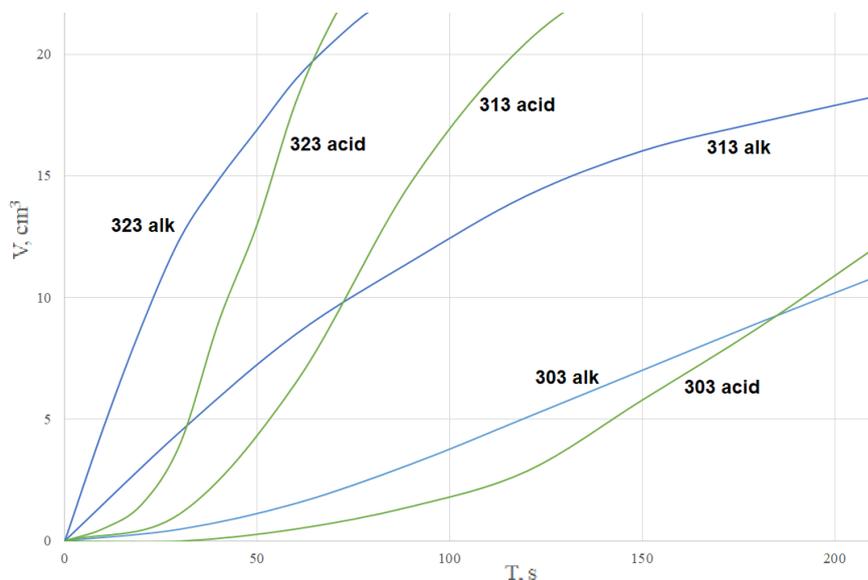


Рис. 2. Кинетические кривые без УЗ

Fig. 2. Kinetic curves without US

Таблица 1. Экспериментальные результаты

Table 1. Experimental results

Характеристика Characteristic	Щелочная без УЗ Alkaline without US	Кислотная без УЗ Acid without US	Измене- ния, % Changes, %
Константа скорости при 303 К, с ⁻¹ Rate constant at 303 K, s ⁻¹	0,059	0,0677	15
Константа скорости при 313 К, с ⁻¹ Rate constant at 313 K, s ⁻¹	0,075	0,1707	128
Константа скорости при 323 К, с ⁻¹ Rate constant at 323 K, s ⁻¹	0,171	0,3414	100
Индукционный период, с Induction period, s	2...6	20...40	650

На рис. 3 представлены кинетические кривые для целевых химических реакций щелочной (1) и кислотной (2) переработки при различных температурах с интенсификацией ультразвуковым излучением. Реакции обладают нулевым порядком и проводились в одинаковых условиях.

Согласно данным [5, 6], при 303 К скорость реакции (1) вначале (степень превращения ~20 %) процесса химической переработки несколько выше скорости реакции (2), однако к окончанию процессов значение константы скорости реакции (2) становится выше на 51 %.

При 313 К наблюдается значительный разрыв между скоростями реакций (1) и (2) после степени превращения алюминиевых отходов ~40 %. К окончанию процессов значение константы скорости реакции (2) становится выше реакции (1) на 91 %.

При 323 К наблюдается разрыв между скоростями реакций (1) и (2) в сторону реакции (1) до степени превращения алюминиевых отходов ~50 % и в сторону реакции (2) после степени превращения ~50 %. К окончанию процессов значение константы скорости реакции (2) становится выше скорости реакции (1) на 100 %.

Как видно из табл. 2, целевая реакция (2) кислотной методики по переработке алюминиевых отходов из-за длительного индукционного периода вначале процесса имеет более низкие значения скорости реакции, чем целевая реакция (1) щелочной методики в диапазоне температур 303–323 К. Стоит отметить, что повышение температуры, хоть и оказывает интенсифицирующее воздействие на химические реакции обеих методик, оказывает его неравномерно. С ростом температуры увеличивается продолжительность превалирования скорости реакции (1) над скоростью реакции (2) со степени превращения 20 до 50 %. Тем не менее итоговое значение константы скорости всегда оказывалось выше у реакции (2), максимум в 100 % достигался при 323 К.

Ультразвуковое излучение оказывало существенное влияние на обе реакции. Максимальные приросты скоростей реакций наблюдались при 303 К при обеих методиках. При 313 К ультразвук существенно увеличивал скорость реакции (1), данного эффекта не наблюдалось со скоростью реакции (2). При 323 К ультразвук не оказывал никакого эффекта на скорость обеих реакций.

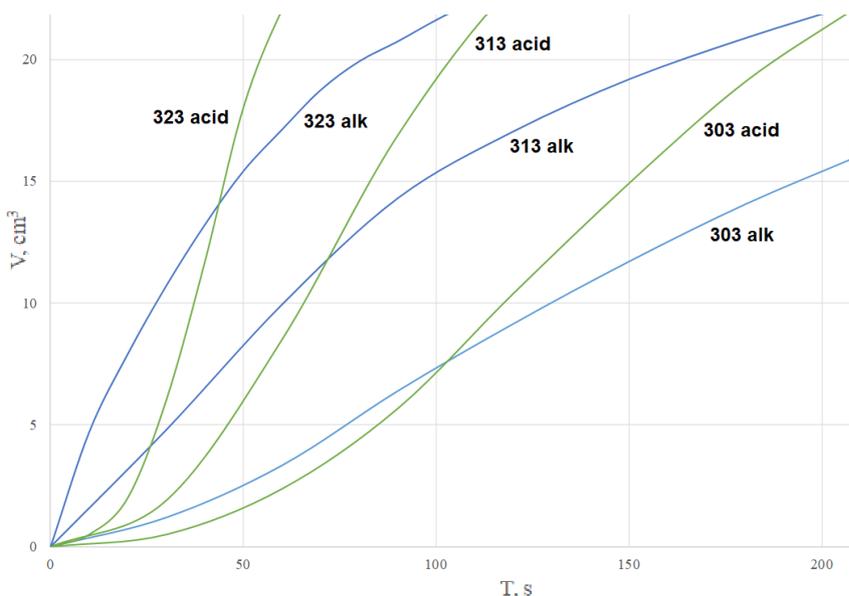


Рис. 3. Кинетические кривые с УЗ
Fig. 3. Kinetic curves with US

Стоит отметить, что ультразвуковое излучение оказывало влияние и на индукционный период, а именно уменьшило его вдвое для обеих реакций, что наглядно демонстрирует рис. 3. Благодаря этому превалирование скорости реакции (2) при 303 К началось после степени превращения 20 %, вместо 25 %; при 313 К после степени превращения 40 %, вместо 33 %; при 323 К после степени превращения 50 %, вместо 67 %. Увеличение продолжительности превалирования скорости реакции (1) при 313 К объясняется тем, что ультразвук одновременно оказывал влияние как на константу скорости реакции (1), так и на её индукционный период, а в случае с реакцией (2) он оказывал влияние лишь на её индукционный период.

Таблица 2. Экспериментальные результаты
Table 2. Experimental results

Характеристика Characteristic	Щелочная с УЗ Alkaline with US	Кислотная с УЗ Acid with US	Изменения, % Changes, %
Константа скорости при 303 К, с ⁻¹ Rate constant at 303 K, s ⁻¹	0,085	0,1285	51
Константа скорости при 313 К, с ⁻¹ Rate constant at 313 K, s ⁻¹	0,094	0,1792	91
Константа скорости при 323 К, с ⁻¹ Rate constant at 323 K, s ⁻¹	0,172	0,3431	100
Индукционный период, с Induction period, s	1...3	10...20	650

По уравнению Вант-Гоффа (5) рассчитывали температурные коэффициенты для данного диапазона температур:

$$K_{T_2} = K_{T_1} * \gamma^{\frac{T_2 - T_1}{10}}, \quad (5)$$

где K_{T_2} , K_{T_1} – константы скоростей при соответствующих температурах; γ – температурный коэффициент химической реакции.

Преобразованное уравнение (6) позволяет рассчитать температурный коэффициент химической реакции:

$$\gamma = \left(\frac{K_2}{K_1}\right)^{\frac{10}{T_2 - T_1}}. \quad (6)$$

Температурный коэффициент в данном диапазоне температур составил 1,7 для реакции (1), для реакции (2) – 2,25.

Эффективная энергия активации процесса, рассчитанная по уравнению Аррениуса (7):

$$E_a = \frac{RT_2 T_1}{T_2 - T_1} * \ln \frac{k_2}{k_1}, \quad (7)$$

для реакции (1) составила $43,3 \pm 1$ кДж/моль, для реакции (2) – $66,1 \pm 1$ кДж/моль.

Данные значения энергий активации, а также дробные значения температурного коэффициента, находящегося между границ значений диффузионной и кинетической области: $1,2 < 1,7$; $2,25 < 3-4$, показывают, что реакции протекают в переходной внешнедиффузионно-кинетической области. Согласно особенностям данной кинетической области, скорость химической реакции и скорость диффузии соизмеримы, соответственно и интенсифицирующие воздействия для диффузионной среды (акустическое перемешивание) и для кинетической (повышение температуры) будут практически в равной степени ускорять данный химический процесс [23]. Стоит отметить, что температурный коэффициент реакции (2) всё же несколько выше, поэтому влияние, оказанное температурой, будет больше. В свою очередь энергия активации у реакции (1) ниже, что несколько снижает требования к условиям её проведения, относительно реакции (2). Сонохимические процессы, представленные на рис. 4, в рассматриваемых методиках обладают схожим механизмом, подробно описанным в [5, 6].

Согласно методике [5], продуктами реакции являются водород и гидроксид алюминия, который в дальнейшем можно перевести в мелкодисперсную оксидную форму с размерами частиц от 5 до 100 мкм (рис. 5). Гидроксид алюминия определяли по результатам рентгенофазового анализа полученного осадка (рис. 6).

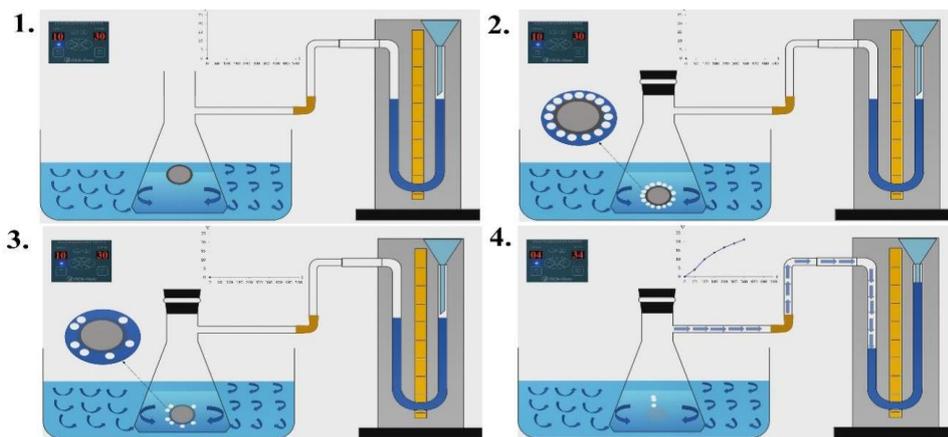


Рис. 4. 1–4 – стадии протекания сонохимического процесса
 Fig. 4. 1–4 – stages of the sonochemical process

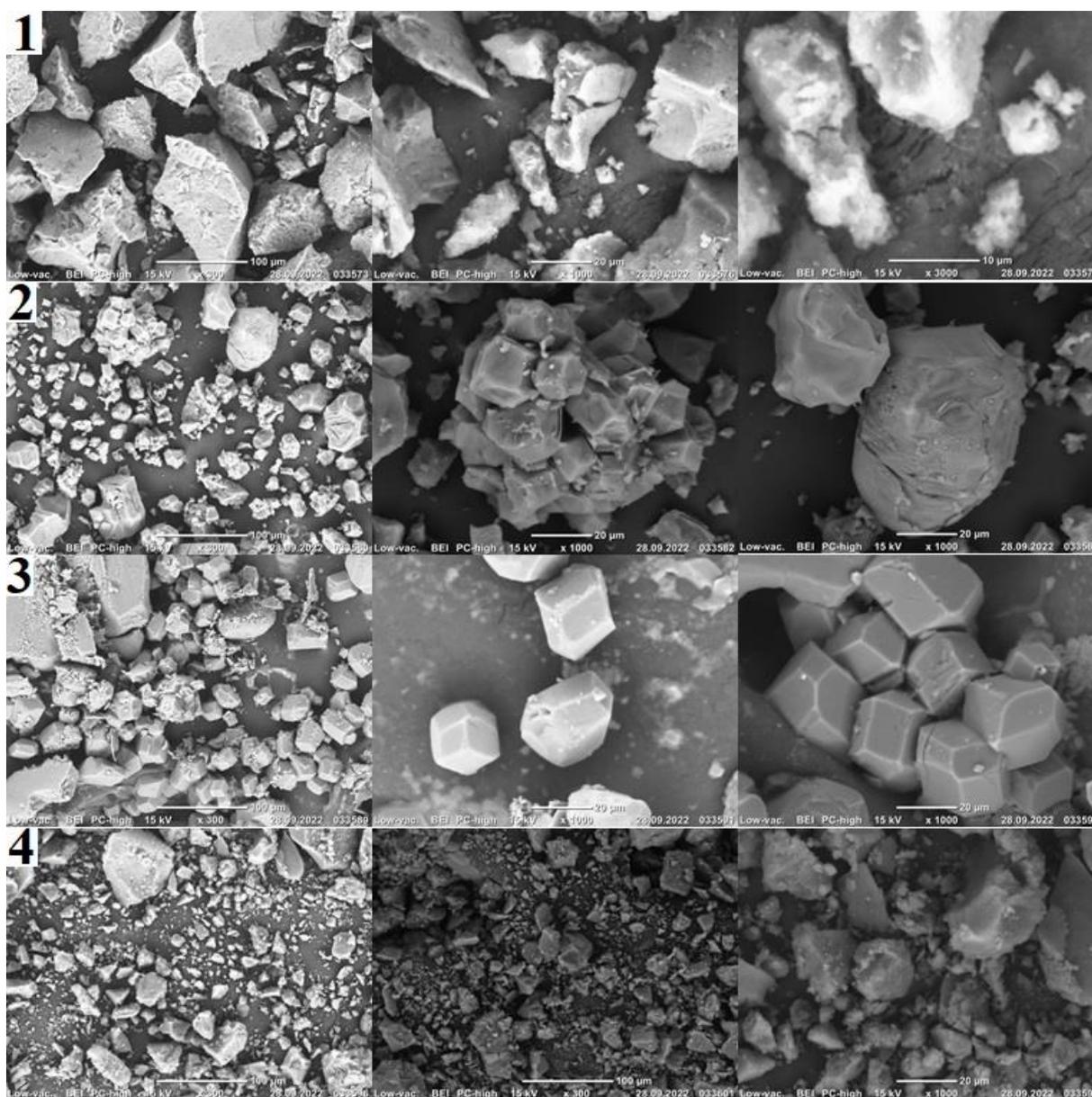


Рис. 5. Микрофотографии частиц: 1 – Al_2O_3 , полученного по щелочной методике; 2 – Al_2O_3 , полученного по кислотной методике; 3 – $AlCl_3$, полученного по кислотной методике; 4 – $AlPO_4$, полученного по кислотной методике
 Fig. 5. Micrographs of particles: 1 – Al_2O_3 obtained by the alkaline method; 2 – Al_2O_3 obtained by the acid method; 3 – $AlCl_3$ obtained by the acid method; 4 – $AlPO_4$ obtained by the acid method

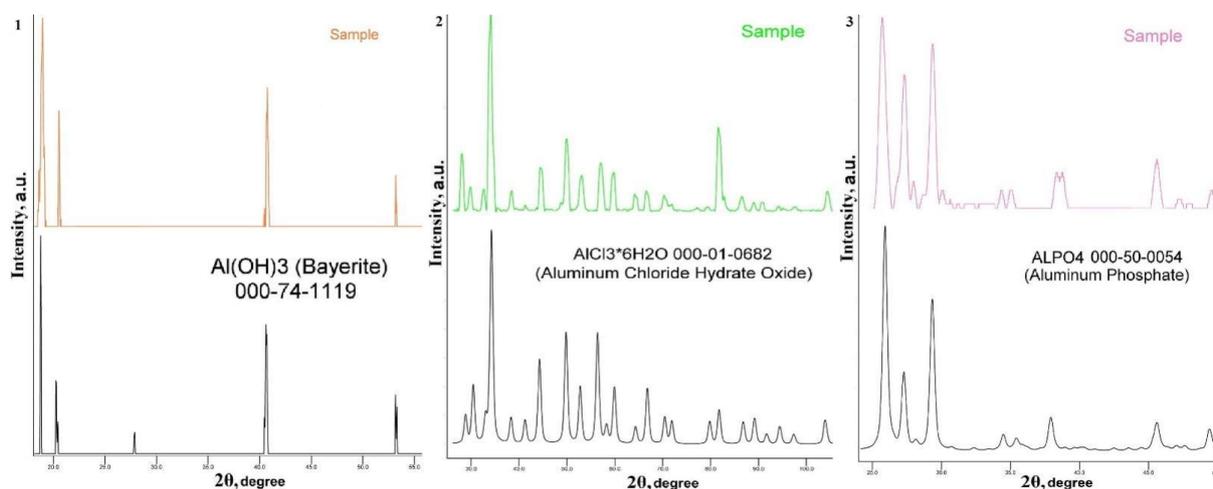


Рис. 6. Рентгенограммы полученных образцов и стандартов из базы данных PDF-2: 1 – гидроксида алюминия; 2 – хлорида алюминия; 3 – фосфата алюминия

Fig. 6. X-ray patterns of obtained samples and standards from the PDF-2 database: 1 – aluminum hydroxide; 2 – aluminum chloride; 3 – aluminum phosphate

Согласно методике [6], продуктами реакции являются водород и хлорид алюминия, который в зависимости от концентрации кислоты можно получать как в виде раствора, так и в виде твердого кристаллического вещества с размером частиц от 1 до 50 мкм (рис. 5). В дальнейшем его можно перевести в ортофосфат алюминия (рис. 5) с размерами частиц от 0,7 до 50 мкм. После получения кристаллов хлорида алюминия их прокаливании при температуре 723–773 °С в течение часа позволяет получить мелкодисперсный оксид алюминия с размерами частиц от 1 до 70 мкм (рис. 5). Рентгенограммы полученного шестиводного хлорида алюминия и ортофосфата алюминия приведены на рис. 6.

Заключение

Несмотря на длительный индукционный период, константа скорости кислотной переработки алюминиевых отходов оказалась в 2 раза выше, чем у щелочной при температурах 313–323 К.

Ультразвуковое излучение на эту характеристику существенно не влияло, хотя и снижало индукционный период в 2 раза. Механизмы протекающих сонохимических процессов в данных методиках оказались очень схожими между собой, принципиальных различий не наблюдалось.

Продукты реакций, получаемые по щелочной методике, а именно водород, гидроксид и оксид алюминия, крайне востребованы в энергетике, медицине и силикатной промышленности. Хлорид и фосфат алюминия – продукты кислотной переработки алюминиевых отходов – широко используются в деревообрабатывающей промышленности, бытовой химии, высокотемпературной керамике и в фармацевтической отрасли. Таким образом, выбор конкретной методики будет определяться нуждами потребителя в той или иной отрасли промышленности нашей страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brooke J. A circularity case for aluminium compared with glass and plastic // *International Aluminium*. – 2022. – V. 2. – P. 1–4.
2. Aljanabi Z., Carrere J., Cruz C. Opportunities for aluminium in a post-Covid economy // *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. 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.
6. 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.
7. Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии. – М.: Изд-во «Химия», 1990. – 208 с.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Jonnalagadda U.S., Su X., Kwan J.J. Nanostructured TiO₂ cavitation agents for dual-modal sonophotocatalysis with pulsed ultrasound // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2021. – V. 73. – 105530.
12. Self-cleaning of SiO₂-TiO₂ 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.
13. Ruiz-Baltazar A.J. Sonochemical activation-assisted biosynthesis of Au/Fe₃O₄ nanoparticles and sonocatalytic degradation of methyl orange // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2021. – V. 73. – 105530.
14. 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.
15. 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.
 16. Pradhan S.R., Colmenares-Quintero R.F., Quintero J.C. Designing microflowreactors for photocatalysis using sonochemistry: a systematic review article // *Molecules*. – 2019. – V. 24. – 3315.
 17. 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.
 18. Kerboua K., Hamdaoui O., Alghyamah A. Energy balance of high-energy stable acoustic cavitation within dual-frequency sonochemical reactor // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2021. – V. 73. – 105471.
 19. Suslick K.S. *Sonochemistry* // *Science*. – 1990. – V. 247. – P. 1493–1445.
 20. Margulis M.A. Sonochemistry as a new promising area of high energy chemistry // *High Energy Chemistry*. – 2004. – V. 38. – P. 135–142.
 21. Годымчук А.Ю., Ильин А.П., Астанкова А.П. Окисление нанопорошка алюминия в жидкой воде при нагревании // *Известия Томского политехнического университета*. – 2007. – Т. 310. – № 1. – С. 102–104.
 22. Макрокинетика взаимодействия электровзрывных нанопорошков алюминия с водой и водными растворами / А.В. Коршунов, Е.Б. Голушкова, Д.О. Перевезенцева, А.П. Ильин // *Известия Томского политехнического университета*. – 2008. – Т. 312. – № 3. – С. 5–10.
 23. Колпакова Н.А., Романенко С.В., Колпаков В.А. Сборник задач по химической кинетике. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 280 с.

Поступила: 20.12.2022 г.

Прошла рецензирование: 13.01.2023 г.

Информация об авторах

Новиков А.С., аспирант отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Мостовщиков А.В., доктор технических наук, профессор отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета; профессор кафедры физической электроники Факультета электронной техники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники; директор Научно-исследовательского института Строительных материалов Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Сударев Е.А., кандидат технических наук, старший преподаватель научно-образовательного центра имени Н.М. Кижнера Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 544.576:546.62: 544.038:54-145.15:546.62'226

COMPARATIVE ANALYSIS OF PHYSICO-CHEMICAL METHODS FOR PROCESSING ALUMINUM WASTE

Alexander S. Novikov¹,
truegraf1995@gmail.com

Andrey V. Mostovshchikov^{1,2,3},
avmost@tpu.ru

Evgeniy A. Sudarev¹,
sudarev@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

³ Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya square, Tomsk, 634003, Russia.

The relevance of the study is caused by the need to develop new methods for the disposal of metal waste. This direction, with the participation of various intensifying influences, refers to resource-saving, technological, minimizing the volume of capital costs for raw materials, production and subsequent sales.

Purpose: to study physical and chemical methods for alkaline and acid processing of aluminum waste in the field of ultrasound, consider the mechanisms of these processes, compare kinetic characteristics, identify the pros and cons of the methods, and, based on a comparative analysis, conclude which of the methods is the most effective.

Objects: samples of aluminum waste in the form of plates and shavings.

Methods: volumetry, sonochemical synthesis, evaluation and analysis of the kinetic curves of the process at different temperatures, X-ray phase analysis.

Results. The analysis of kinetic curves, rate constants of processes at different temperatures, and orders of chemical reactions has been carried out. The values of the activation energies of the target chemical reactions and the characteristics of the kinetic regions of the processes were compared with each other. Despite the long induction period, the kinetic potential of acid processing of aluminum waste turned out to be 2 times higher than that of alkaline processing at temperatures of 313–323 K. Ultrasonic radiation did not significantly affect this characteristic, although it reduced the induction effect by 2 times. The mechanisms of the ongoing sonochemical processes in these methods turned out to be very similar to each other, no fundamental differences were observed. The products obtained during chemical processing in the form of hydrogen, hydroxide, chloride and aluminum orthophosphate are currently in high demand in the energy, chemical and silicate industries, as well as in medicine.

Key words:

Sonochemistry, waste disposal, hydrogen production, aluminum hydroxide production, aluminum phosphate production, volumetry, kinetics study, X-ray phase analysis.

REFERENCES

- Brooke J. A circularity case for aluminium compared with glass and plastic. *International Aluminium*, 2022, vol. 2, pp. 1–4.
- Aljanabi Z., Carrere J., Cruz C. Opportunities for aluminium in a post-Covid economy. *International Aluminium*, 2022, vol. 3, pp. 1–8.
- Zajnullin E. «Rusal» otrezayut ot syrya [«Rusal» is cut off from raw materials]. *Kommersant*, 2022, no. 47, pp. 9–10.
- Mitina N.N., Gnetov V.M. Utilizatsiya promyshlennykh otkhodov v Rossii i v mire: problemy i resheniya [Utilization of industrial waste in Russia and in the world: problems and solutions]. *Neftegaz.RU*, 2020, no. 2, pp. 1–20.
- Novikov A.S., Mostovshchikov A.V. Influence of ultrasonic radiation on the kinetics of the process of alkaline processing of aluminum waste. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 3, pp. 49–56. In Rus.
- Novikov A.S., Mostovshchikov A.V. Development of a method for synthesis of aluminum phosphate and hydrogen from aluminum production wastes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 11, pp. 24–31. In Rus.
- Kardashev G.A. *Fizicheskie metody intensivifikatsii protsessov khimicheskoy tekhnologii* [Physical methods of intensification of chemical technology processes]. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 208 p.
- Dehane A., Merouani S., Hamdaoui O., Alghyama A. A comprehensive numerical analysis of heat and mass transfer phenomena during cavitation sono-process. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 73, 105498.
- Tamborrino A., Taticchi A., Romaniello R., Perone C., Esposto S., Leone A., Servili M. Assessment of the olive oil extraction plant layout implementing a high-power ultrasound machine. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 73, 105505.
- Laajimi H., Mattia M., Stein R.S., Bianchi C.L., Boffito D.C. Electron paramagnetic resonance of sonicated powder suspensions in organic solvents. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 73, 105544.
- Jonnalagadda U.S., Su X., Kwan J.J. Nanostructured TiO₂ cavitation agents for dual-modal sonophotocatalysis with pulsed ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 73, 105530.
- Rosales A., Ortiz-Frade L., Medina-Ramirez I. E., Godínez L. A., Esquivel K. Self-cleaning of SiO₂-TiO₂ coating: effect of sonochemical synthetic parameters on the morphological, mechanical, and photocatalytic properties of the films. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 73, 105483.
- Ruiz-Baltazar A.J. Sonochemical activation-assisted biosynthesis of Au/Fe₃O₄ nanoparticles and sonocatalytic degradation of methyl orange. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 73, 105530.

14. Huua C.N., Raia R., Yanga X., Tikekarb R., Nitina N. Synergistic inactivation of bacteria based on a combination of low frequency, lowintensity ultrasound and a food grade antioxidant. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 74, 105567.
15. Maeda Y., Hayashi Y., Fukushima J., Takizawa H. Sonochemical effect and pore structure tuning of silica xerogel by ultrasonic irradiation of semi-solid hydrogel. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 73, 105476.
16. Pradhan S.R., Colmenares-Quintero R.F., Quintero J.C. Designing microflowreactors for photocatalysis using sonochemistry: a systematic review article. *Molecules*, 2019, vol. 24, 3315.
17. Zore U.K., Yedire S.G., Pandi N., Manickam S., Sonawane S.H. A review on recent advances in hydrogen energy, fuel cell, biofuel and fuel refining via ultrasound process intensification. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 73, 105536.
18. Kerboua K., Hamdaoui O., Alghyamah A. Energy balance of high-energy stable acoustic cavitation within dual-frequency sonochemical reactor. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 73, 105471.
19. Suslick K.S. Sonochemistry. *Science*, 1990, vol. 247, pp. 1493–1445.
20. Margulis M.A. Sonochemistry as a new promising area of high energy chemistry. *High Energy Chemistry*, 2004, vol. 38, pp. 135–142.
21. Godymchuk A.Yu., Ilin A.P., Astankova A.P. Oxidation of aluminum nanopowder in liquid water during heating. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 310, no. 1, pp. 102–104.
22. Korshunov A.V., Golushkova E.B., Perevezenceva D.O., Ilin A.P. Macrokinetics of interaction of electroexplosive aluminum nanopowders with water and aqueous solutions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 3, pp. 5–10.
23. Kolpakova N.A., Romanenko S.V., Kolpakov V.A. *Sbornik zadach po khimicheskoy kinetike* [Collection of problems in chemical kinetics]. Tomsk, TPU Publ. house, 2009. 280 p.

Received: 20 December 2022.

Reviewed: 13 January 2023.

Information about the authors

Alexander S. Novikov, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Andrey V. Mostovshchikov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University; professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics; Tomsk State University of Architecture and Building.

Evgeniy A. Sudarev, Cand. Sc., senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.