

УДК 544.576:546.62:544.038:54-145.16

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КИНЕТИКУ ПРОЦЕССА ЩЕЛОЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ ОТХОДОВ

Новиков Александр Станиславович¹,
asn36@tpu.ru

Мостовщиков Андрей Владимирович^{1,2},
avmost@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, 36.

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 закономерности процесса щелочной переработки алюминиевых отходов в поле ультразвука, предложить механизм этого процесса и на основании установленных закономерностей и предложенного механизма разработать методику щелочной переработки алюминиевых отходов.

Объекты: образцы алюминиевых отходов в виде пластинок и стружки.

Методы: волюмометрия, дифференциально термический анализ, оценка и анализ кинетических кривых процесса при разных температурах.

Результаты. Проведен анализ кинетических кривых, рассчитаны константы скоростей процесса при различных температурах, найден порядок химической реакции. По рассчитанной энергии активации процесса была дана характеристика о кинетической области процесса. Найдено массовое содержание алюминия в образцах. Согласно полученным данным, воздействие на систему ультразвуком способствовало увеличению скорости химического процесса на 44,1 % при 303 К; на 25,4 % при 313 К. Сам процесс начинался в течение 1...3 секунд и завершался в течение нескольких минут, что подтверждает возможность утилизации алюминиевых отходов с помощью щелочных растворов при невысоких температурах. Полученный водород можно использовать в водородной энергетике, поскольку он является единственным газообразным продуктом реакции, что снижает необходимость в его очистке перед транспортировкой. Отфильтрованный гидроксид алюминия можно использовать в силикатной промышленности для получения пористой корундовой керамики.

Ключевые слова:

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

Введение

Алюминий – самый часто перерабатываемый материал, который полностью поддается переработке, при этом не утрачивая своих свойств. Около 75 % алюминия, выпущенного за все время существования металлургической отрасли, используется до сих пор. Сегодня производство вторичного алюминия занимает около 30 % от общего объема выпуска, и его доля продолжает расти [1].

Металлургическая переработка лома и отходов алюминия заключается в том, что после предварительной подготовки лом и отходы подвергаются термической обработке в плавильных печах. На производство первичного алюминия затрачивается энергия 174 ГДж/т, а на производство, связанное с переработкой алюминия, – 20 ГДж/т [2].

Алюминиевая стружка является смесью алюминия, оксида алюминия и различных примесей с металлургических производств. Алюминий, находящийся в образце, является одним из самых активных металлов, а химические реакции с ним, как правило, являются экзотермическими. Одним из главных преимуществ экзотермических реакций является тот факт, что после подачи необходимой для начала реакции энергии в дальнейшем её вводе в систему нет необходимости,

поскольку выделяемое в ходе реакции тепло в первую очередь расходуется на поддержание химического процесса, что существенно повышает экономическую эффективность процесса.

Одной из наиболее простых в реализации экзотермических реакций с участием алюминия является его химическое взаимодействие с раствором щелочи. В результате данной химической реакции из одного килограмма алюминия выделяется более 1,2 м³ газообразного водорода. Образовавшегося тепла хватит, чтобы нагреть до кипения почти 40 м³ воды, поскольку количество образовавшейся энергии превышает 15 МДж [3]. Полученную энергию можно использовать как внутри самого производства, где происходит процесс, так и для обеспечения теплом других потребителей, учитывая возможность перевода тепловой энергии в электрическую, механическую и другие виды энергий.

Продукты данной реакции – гидроксид алюминия и водород, являющийся единственным газообразным продуктом реакции. Водород можно аккумулировать и использовать в водородной энергетике, без применения дополнительного оборудования для его очистки или выделения из газовых смесей. Мелкодисперсный гидроксид алюминия используется при очистке воды, в

медицине в качестве обволакивающего средства и при изготовлении вакцин, на полимерных производствах в качестве антипирена. После прокаливании осадок представляет собой мелкодисперсный оксид алюминия, который востребован в силикатной промышленности для получения пористой корундовой керамики и в качестве носителей для катализаторов.

Для интенсификации химических реакций, помимо введения катализатора, используют различные физические воздействия: температура, давление, ультрафиолетовое, микроволновое и ультразвуковое воздействие [4].

Ультразвук нашел множество технологических применений, начиная от очистки, синтеза полимеров, разложения загрязняющих веществ и изготовления наночастиц до биомедицинских приложений и пищевой отрасли [5–12]. Разделом химии, который изучает влияние ультразвуковой энергии на химические реакции, а также возникающие при этом физические, химические, а также физико-химические эффекты, является сонохимия [13–18].

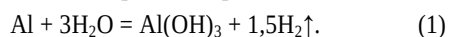
Система жидкость – твердое тело – это наиболее широко исследуемая область сонохимии. Локальная кавитация на твердой поверхности приводит к высвобождению струи жидкости, ударяющей по поверхности, что ведет к эрозии/точечной коррозии. Точечная коррозия приводит к появлению новых реакционных участков, тем самым увеличивая скорость реакции. В работе [17] приведены данные о том, что на этих участках происходит плавление металлов, таких как Cu, Zn, Fe, Cr, Ni.

Разработка методики щелочной переработки алюминиевых отходов, интенсифицированная ультразвуковым излучением, является альтернативой действующим физическим способам переработки, поскольку она является менее затратной, чем переплавка алюминия, при температурах начиная с 660 градусов [1].

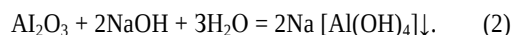
Цель данной работы заключалась в том, чтобы изучить физико-химические закономерности процесса щелочной переработки алюминиевых отходов в поле ультразвука, предложить механизм этого процесса и на основании установленных закономерностей и предложенного механизма разработать методику щелочной переработки алюминиевых отходов.

Методики, оборудование и объекты исследования

Алюминий, являясь крайне активным металлом ($\varphi = -1,67$ В), способен вытеснять водород из воды в ходе химической реакции, продуктами которой являются газообразный водород и гидроксид алюминия:



В то же время благодаря высокой активности он быстро покрывается оксидной пленкой. В связи с этим для протекания химической реакции (1) необходимо учесть еще одну стадию – химическое растворение оксида алюминия с внешней поверхности образца. Наиболее простые способы – это кислотное и щелочное растворение. Химическая реакция (2) на примере взаимодействия с гидроксидом натрия выглядит следующим образом [19]:



В качестве объектов исследования использовали отходы алюминия в виде металлической стружки. Исследованные в работе образцы алюминиевых отходов металлургии представляют собой стружку длиной не более 1 см и толщиной не более 2 мм. Массовое содержание Al в образцах, а также кинетику реакции (1) изучали волюмометрическим методом, с помощью установки, представленной на рис. 1 [20]. Продукты реакции определяли по результатам дифференциально термического анализа (ДТА) полученного осадка в ходе химической реакции. Содержание чистого алюминия в образцах по данным волюмометрического анализа составляет 60...71 % (мас.), оставшееся приходится на оксид алюминия и примеси.

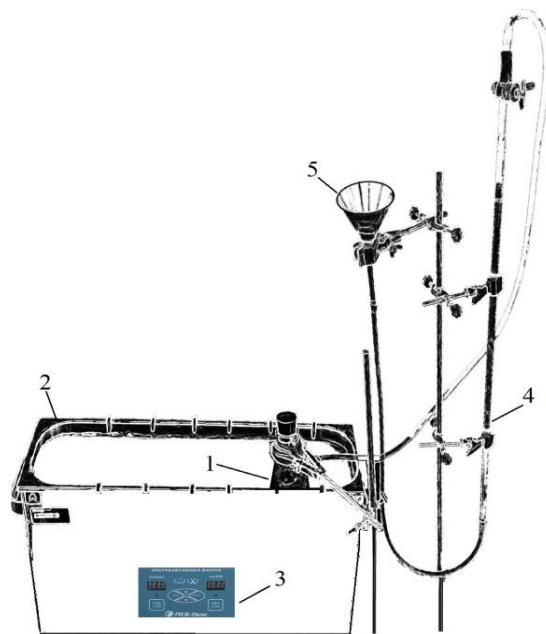


Рис. 1. Схема волюмометрической установки: 1 – круглодонная колба с анализируемым образцом; 2 – ультразвуковая ванна; 3 – монитор для контроля температуры; 4 – градуированная бюретка; 5 – воронка

Fig. 1. Scheme of the volumetric installation: 1 – round-bottom flask with the analyzed sample; 2 – ultrasonic bath; 3 – monitor for temperature control; 4 – graduated burette; 5 – funnel

Навеску алюминиевых отходов массой 30 ± 2 мг помещали в колбу – 1 с 5 % раствором щелочи объемом 100 см^3 , закрепленную с помощью штатива в ультразвуковой ванне «ПСБ-Галс 8035-05» – 2. Колба была присоединена к градуированной бюретке – 4, заполненной водным раствором натрия хлористого. Изменения температуры регистрировали с помощью монитора на ультразвуковой ванне – 3.

Данные эксперименты проводили в диапазоне температур 303–323 К. Вначале была рассчитана кинетика химической реакции, без акустического воздействия, затем, после введения в систему ультразвука с частотой 35 кГц, была рассчитана кинетика целевого сонохимического процесса.

В ходе химической реакции через равные временные промежутки с помощью проградуированной бюретки – 4 фиксировался выделившийся объём водорода. После окончания реакции осадок отфильтровывали с помощью мембранных фильтров Filtrak 390, высушивали и анализировали с помощью ДТА. Перед

началом каждого опыта фиксировалась температура и давление в помещении.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены кинетические кривые при различных температурах.

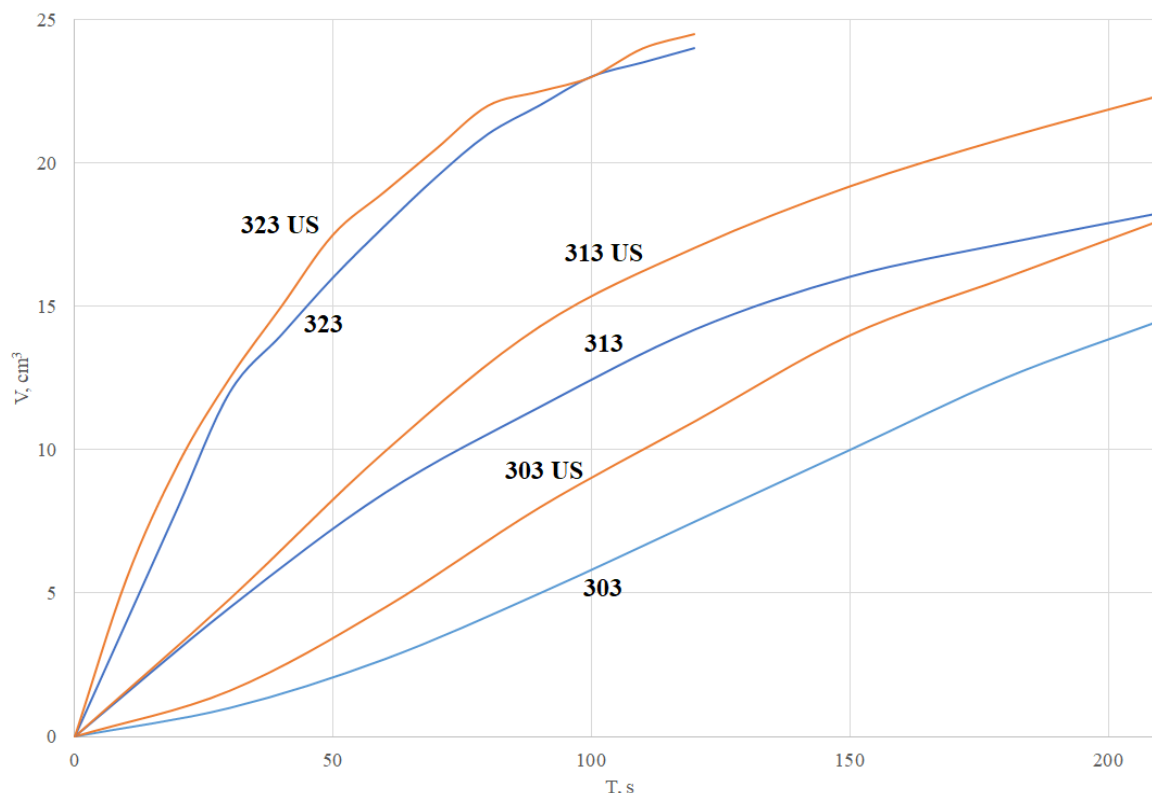


Рис. 2. Кинетические кривые

Fig. 2. Kinetic curves

Согласно полученным зависимостям щелочную переработку алюминиевых отходов можно представить в виде трёх стадий:

- 1) химическое растворение 5 % щелочным раствором оксидной пленки с активной поверхности образца – индукционный период основной химической реакции (1);
- 2) химическая реакция (1), протекающая до степени превращения алюминия 70 % – кинетическая кривая процесса близка к линейной форме;
- 3) завершение химического процесса – по мере уменьшения активной площади взаимодействия образца наблюдается плавное снижение скорости процесса.

Графическим способом был определен порядок химической реакции (2) – численные значения объемов выделенного водорода в различные временные промежутки подставлялись в уравнения нулевого, первого и второго порядков реакций, в ходе чего было выявлено, что данный химический процесс подчиняется уравнению нулевого порядка, так как зависимость принимала линейный вид с квадратичным отклонением, близким к 1, именно при использовании уравнения (3) [20]:

$$v = -\frac{dC_A}{dt} = K, \quad (3)$$

где v – скорость реакции; C_A – концентрация исходного реагента; t – время химической реакции; K – константа скорости химической реакции при заданной температуре.

По уравнению Вант-Гоффа (4) рассчитывали температурный коэффициент для данного диапазона температур:

$$K_{T_2} = K_{T_1} \gamma^{\frac{T_2 - T_1}{10}}, \quad (4)$$

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

Преобразованное уравнение (4) позволяет рассчитать температурный коэффициент химической реакции (5):

$$\gamma = \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^{\frac{10}{T_2 - T_1}}. \quad (5)$$

Температурный коэффициент в данном диапазоне температур составил 1,7.

Эффективная энергия активации процесса, рассчитанная по уравнению Аррениуса (6):

$$E_a = \frac{RT_2T_1}{T_2 - T_1} \ln \frac{k_2}{k_1}, \quad (6)$$

составила $43,3 \pm 1$ кДж/моль, сопоставимые значения энергии активации были получены ранее в работах [21–23] для нанопорошков алюминия.

Данное значение энергии активации, а также дробное значение температурного коэффициента, находящегося между границ значений диффузионной и кинетической области: $1,2 < 1,7 < 3-4$, показывают, что реакция протекает в переходной внешнел диффузионно-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 [20].

Полученные кинетические характеристики в интервале температур 303...323 К приведены в таблице.

Таблица. Экспериментальные результаты

Table. Experimental results

Характеристика Characteristic	Без УЗ Without US	С УЗ With US	Изменения, % Changes, %
Константа скорости при 303 К, с^{-1} Rate constant at 303 K, s^{-1}	0,059	0,085	44,1
Константа скорости при 313 К, с^{-1} Rate constant at 313 K, s^{-1}	0,075	0,094	25,4
Константа скорости при 323 К, с^{-1} Rate constant at 323 K, s^{-1}	0,171	0,172	0,5
Индукционный период, с Induction period, s	2...6	1...3	100

Воздействие на систему ультразвуком способствовало увеличению скорости химического процесса на 44,1 % при 303 К; на 25,4 % при 313 К; при 323 К увеличения скорости обнаружено не было, длительность индукционного периода снизилась в 2 раза с 2...6 до 1...3 с.

Увеличение скорости химического процесса при облучении реакционной смеси ультразвуком отчасти можно объяснить ультразвуковым перемешиванием реагентов, а также тем, что в ходе экспериментов увеличивалась температура – на 4 градуса при 303 К, а также на 2 при 313 К, при 323 К роста температуры не наблюдалось. Но поскольку было выявлено, что константа скорости при 303 К с ультразвуком (учитывая рост температуры в ходе процесса до 307 К) больше константы скорости при 313 К без ультразвука на 13,3 % ($0,085$ и $0,075 \text{ с}^{-1}$), то очевидно, что данный сонохимический процесс может быть описан более сложным механизмом.

Предлагаемый механизм представляет собой последовательность следующих стадий:

1. После воздействия на систему ультразвуковым излучением начинают проявляться физические эффекты, ускоряющие химический процесс: пе-

ремешивание, турбулентность, массоперенос, ударные волны и другие. Частицы начинают быстрее двигаться, благодаря чему происходит постепенный нагрев реакционной смеси.

2. Химический эффект до начала химической реакции: при ультразвуковом излучении диссоциация молекул воды усиливается – образуется большее количество частиц OH^- , увеличивается pH реакции, также возрастает скорость процесса [4].
3. После добавления в раствор образца алюминиевой стружки начинается химическое растворение внешнего слоя образца (оксидной пленки).
4. Одновременно с этапом 3, при наличии ультразвука, в системе жидкость – твердое тело начинается процесс локальной сонохимической кавитации на оксидной поверхности: сначала происходит зарождение пузырьков, их рост, а затем, после перенасыщения ультразвуковой энергией, их схлопывание. Известно, что [17] это приводит к высвобождению струй жидкости, в которых температура может достигать 5000 К, а давление – 1000 атм, ударяющей по поверхности образца, создавая эрозию и точечную коррозию. Точечная коррозия приводит к появлению новых реакционных участков, которые за доли секунды превращаются в микрореакторы, тем самым запуская реакцию алюминия с раствором щелочи раньше, чем без наличия ультразвука (уменьшается инкубационный период).
5. За доли секунды оксидная пленка полностью разрушается, будучи химически растворенной раствором щелочи. Подобные результаты ранее были получены в работе [17] для оксидных покрытий с Zn, Ni и Cu.
6. Затем, в процессе акустического перемешивания, образец постепенно растворяется в растворе щелочи, количество алюминия уменьшается, что приводит к снижению скорости выделения водорода.

Термограмма отфильтрованных продуктов реакции представлена на рис. 3.

Эндотермический эффект, наблюдаемый на термограмме в диапазоне температур 80–150, °С, связан с удалением физически связанной воды. Эндотермические эффекты, наблюдаемые при температурах 270–350, 470–520 и 660–720 °С сопровождаются значительной потерей массы и соответствуют пошаговой дегидратации гидроксида алюминия $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (гиббсита, байерита) в фазу $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

В диапазоне температур 450–650 °С не наблюдались экзотермический эффект и увеличение массы, характерные для окисления мелкодисперсного алюминия. Кроме того, суммарный объем водорода, выделяемый при химической реакции навески алюминиевой стружки массой 30 ± 2 мг в предлагаемых условиях, не менялся с более концентрированными растворами (40 %), а также при увеличении времени реакции (2 суток), что демонстрирует полное протекание реакции и оптимально подобранные условия в предлагаемой методике.

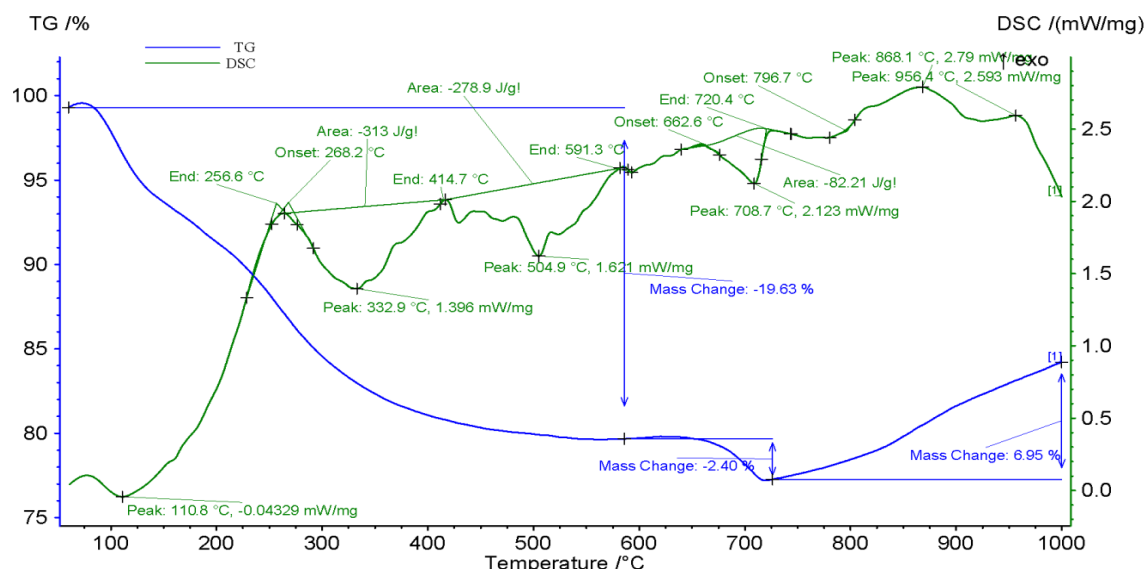


Рис. 3. Термограмма отфильтрованных продуктов реакции

Fig. 3. Thermogram of filtered reaction products

Заключение

В ходе данного исследования были изучены физико-химические особенности процесса, было установлено, что при небольшом нагреве (10–20 градусов относительно комнатной температуры) ультразвук способен увеличивать скорость химической переработки алюминиевых отходов на 25–44 %, при этом снижая индукционный период вдвое. Реакция протекает в течение нескольких минут. Предложен механизм, согласно которому интенсифицирующее воздействие ультразвука объясняется сонохимической кавитацией, перемешиванием реакционной среды, небольшим повышением pH и температуры. Кроме того, с полученными результатами хорошо согласуются расчетные

величины температурного коэффициента и энергии активации, согласно которым данная кинетическая область является переходной с соизмеримыми скоростями химической реакции и диффузии. Поэтому и интенсифицирующие воздействия для диффузионной и кинетической сред способны в значительной степени ускорять данный химический процесс.

На основании результатов была предложена методика для химической утилизации алюминиевых отходов, которая включает в себя химическую реакцию между водным 5 % раствором щелочи и алюминиевой стружкой в ультразвуковом поле, продуктами которой являются чистый водород и гидроксид алюминия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Митина Н.Н., Гнетов В.М. Утилизация промышленных отходов в России и в мире: проблемы и решения // «Neftegaz.RU». – 2020. – № 3. – С. 1–20.
- Еромасов Р.Г., Никифорова Э.М., Спектор Ю.Е. Утилизация отходов алюминиевого производства в керамической промышленности // Журнал Сибирского федерального университета. – 2012. – № 4. – С. 442–453.
- Водород – энергоноситель и реагент. Технологии его получения / Н.Л. Солодова, Е.И. Черкасова, И.И. Салахов, В.П. Тутубалина // Проблемы энергетики. – 2017. – Т. 19. – № 11. – С. 39–50.
- Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии. – М.: Изд-во «Химия», 1990. – 208 с.
- A comprehensive numerical analysis of heat and mass transfer phenomena during cavitation sono-process / A. Dehane, S. Merouani, O. Hamdaoui, A. Alghyamah // Ultrasonics Sonochemistry. – 2021. – V. 73. – 105498.
- 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.
- 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.
- 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.
- Recent advances in the application of ultrasound in dairy products: effect on functional, 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-Rojas // Ultrasonics Sonochemistry. – 2021. – V. 73. – 105467.
- 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.
- Ruiz-Baltazar A.J. Sonochemical activation-assisted biosynthesis of Au/Fe₃O₄ nanoparticles and sonocatalytic degradation of methyl orange // Ultrasonics Sonochemistry. – 2021. – V. 73. – 105530.
- Synergistic inactivation of bacteria based on a combination of low frequency, low intensity ultrasound and a food grade antioxidant / C.N. Huua, R. Raia, X. Yanga, R. Tikekarb, N. Nitina // Ultrasonics Sonochemistry. – 2021. – V. 74. – 105567.
- 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.
- Pradhan S.R., Colmenares-Quintero R.F., Quintero J.C. Designing microflow reactors for photocatalysis using sonochemistry: a systematic review article // Molecules. – 2019. – V. 24. – 3315.
- 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.
16. 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.
17. Suslick K.S. Sonochemistry // *Science*. – 1990. – V. 247. – P. 1439–1445.
18. Margulis M.A. Sonochemistry as a new promising area of high energy chemistry // *High Energy Chemistry*. – 2004. – V. 38. – P. 135–142.
19. 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.
20. 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.
21. Колпакова Н.А., Романенко С.В., Колпаков В.А. Сборник задач по химической кинетике. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 280 с.
22. Состав и структура защитной оксидно-гидроксидной оболочки на частицах нанопорошка алюминия / Н.И. Радишевская, А.Ю. Чапская, О.В. Львов, В.И. Верещагин, А.В. Коршунов // *Известия Томского политехнического университета*. – 2011. – Т. 318. – № 3. – С. 19–23.
23. О кинетике саморазогрева в реакции нанопорошка алюминия с водой / А.П. Астанкова, А.Ю. Годымчук, А.А. Громов, А.П. Ильин // *Журнал Физической химии*. – 2008. – Т. 82. – № 11. – С. 2126–2134.

Поступила 02.02.2022 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.

UDC 544.576:546.62:544.038:54-145.16

INFLUENCE OF ULTRASONIC RADIATION ON THE KINETICS OF THE ALKALINE PROCESSING OF ALUMINUM WASTE

Alexander S. Novikov¹,
asn36@tpu.ru

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

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 effects, refers to resource-saving, minimizing the volume of capital costs for raw materials, production and subsequent sale.

The aim of the research is to study the physicochemical laws of alkaline processing of aluminum waste in the ultrasound field, to propose a mechanism for this process, and, on the basis of the established patterns and the proposed mechanism, to develop a methodology for the alkaline processing of aluminum waste.

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

Methods: volumetric measurement, differential thermal analysis, assessment and analysis of kinetic curves of the process at different temperatures.

Results. The mass content of aluminum in the samples was found. The analysis of the kinetic curves is carried out, the rate constants of the process at different temperatures are calculated, and the order of the chemical reaction is found. Based on the calculated activation energy of the process, a characteristic of the kinetic region of the process was given. According to the data obtained, the ultrasound impact on the system contributed to the increase in the rate of the chemical process by 44,1 % at 303 K; by 25,4 % at 313 K. The process itself began within 1...3 seconds and ended within a few minutes, which confirms the possibility of recycling aluminum waste using alkaline solutions at low temperatures. The resulting hydrogen can be used in hydrogen power engineering, since it is the only gaseous reaction product, which eliminates the need to purify it before transportation. Filtered aluminum hydroxide can be used in the silicate industry to produce porous corundum ceramics.

Key words:

Sonochemistry, waste disposal, hydrogen production, aluminum hydroxide production, volumetric analysis, kinetic studies.

REFERENCES

- 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.
- Eromasov R.G., Nikiforova E.M., Spektor Yu.E. Utilization of waste aluminum production in the ceramic industry. *Journal of the Siberian Federal University*, 2012, no. 4, pp. 442–453. In Rus.
- Solodova N.L., Cherkasova E.I., Salakhov I.I., Tutubalina V.P. Hydrogen is an energy carrier and a reagent. technology of its production. *Energy problems*, 2017, vol. 19, no. 11, pp. 39–50. In Rus.
- Kardashev G.A. *Fizicheskie metody intensifikatsii protsessov khimicheskoy tekhnologii* [Physical methods of intensification of chemical technology processes]. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 208 p.
- Dehane A., Merouani S., Hamdaoui O., Alghyamah A. A comprehensive numerical analysis of heat and mass transfer phenomenons 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.
- Carrillo-Lopez L.M., Garcia-Galicia I.A., Tirado-Gallegos J.M., Sanchez-Vega R., Huerta-Jimenez M., Ashokkumar M., Alarcon-Rojas A.D. Recent advances in the application of ultrasound in dairy products: Effect on functional, physical, chemical, microbiological and sensory properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 73, 105467.
- 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.
- 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.
- 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.
- Pradhan S.R., Colmenares-Quintero R.F., Quintero J.C. Designing microflow reactors for photocatalysis using sonochemistry: a systematic review article. *Molecules*, 2019, vol. 24, 3315.
- 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.

16. 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.
17. Suslick K.S. Sonochemistry. *Science*, 1990, vol. 247, pp. 1439–1445.
18. Margulis M.A. Sonochemistry as a new promising area of high energy chemistry. *High Energy Chemistry*, 2004, vol. 38, pp. 135–142.
19. 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. In Rus.
20. Korshunov A.V., Golushkova E.B., Perevezentseva 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. In Rus.
21. 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.
22. Radishevskaya N.I., Chapskaya A.Yu., Lvov O.V., Vereshchagin V.I., Korshunov A.V. Composition and structure of a protective oxide-hydroxide shell on particles of aluminum nanopowder. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 3, pp. 19–23.
23. Astankova A.P., Godymchuk A.Yu., Gromov A.A., Ilin A.P. O kinetike samorazogreva v reaktsii nanoporoshka alyuminiya s vodoy [On the kinetics of self-heating in the reaction of aluminum nanopowder with water]. *Zhurnal Fizicheskoy khimii*, 2008, vol. 82, no. 11, pp. 2126–2134.

Received: 2 February 2022.

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.