

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 628.16
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-40-47



ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ЭЛЕКТРОДОВ НА КАЧЕСТВО ПРОЦЕССА ВОДООЧИСТКИ

Копьёва М.А., Остапенко М.С., Тверяков А.М.

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Аннотация. В статье рассматривается анализ материалов для электродов электролизёра в контексте управления качеством процессов водоочистки. Оценены три основных материала, применяемых для изготовления электродов: титан, сталь и алюминий. В рамках работы проведён сравнительный анализ их коррозионной стойкости, стабильности в процессе электролиза и эффективности использования в условиях длительного воздействия электрического тока. Акцент сделан на исследование влияния этих факторов на стабильность работы оборудования и качество очистки воды. В результате анализа было установлено, что алюминий демонстрирует наилучшую стабильность работы и минимальное стандартное отклонение, что делает его предпочтительным материалом для использования в электролизёре. В то же время титан может быть эффективным в специфических условиях, требующих высокой коррозионной стойкости. Сталь может применяться в слабоагрессивных условиях и демонстрировать хорошие экономические показатели. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что правильный выбор материала для электродов электролизёра способствует улучшению качества процесса водоочистки и повышению надёжности работы станций. Результаты работы, приведенные в данной статье, будут полезны для дальнейшего совершенствования технологий и разработки более эффективных решений в системах водоочистки.

Ключевые слова: управление качеством, станция водоочистки, электролизёр, материалы электродов, титан, сталь, алюминий, коррозионная стойкость, электролиз, экспериментальные исследования, математическое моделирование, стабильность процесса, выбор материалов, нанотехнологии в очистке воды, статистический анализ, стандартное отклонение

© Копьёва М.А., Остапенко М.С., Тверяков А.М., 2025

Для цитирования

Копьёва М.А., Остапенко М.С., Тверяков А.М. Влияние материала электродов на качество процесса водоочистки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 40-47. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-40-47>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

INFLUENCE OF ELECTRODE MATERIALS ON THE QUALITY OF THE WATER TREATMENT PROCESS

Корыова М.А., Остапенко М.С., Тверяков А.М.

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Abstract. This article presents an analysis of electrode materials used in electrolyzers in the context of quality management for water treatment processes. Three primary materials such as titanium, steel, and aluminum commonly utilized for electrode manufacturing are evaluated. The study includes a comparative assessment of their corrosion resistance, operational stability during electrolysis, and long-term performance under continuous electric current exposure. The focus is placed on examining how these factors influence equipment reliability and water purification quality. The analysis revealed that aluminum provides the best operational stability and the lowest standard deviation, making it the most suitable material for electrolyser electrodes. At the same time, titanium may be effective under specific conditions that require high corrosion resistance, while steel can be used in mildly aggressive environments and offers favorable economic characteristics. The findings suggest that selecting the appropriate electrode material significantly enhances the quality of water treatment processes and the reliability of treatment plants. The results presented in this study will be valuable for further advancement of technologies and the development of more efficient water purification solutions.

Keywords: quality management, water treatment plant, electrolyser, electrode materials, titanium, steel, aluminum, corrosion resistance, electrolysis, experimental research, mathematical modeling, process stability, material selection, water purification nanotechnology, statistical analysis, standard deviation

For citation

Корыова М.А., Остапенко М.С., Тверяков А.М. Influence of electrode materials on the quality of the water treatment process. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 40-47. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-40-47>

Введение

Управление качеством в процессе разработки и эксплуатации станций водоочистки играет ключевую роль в обеспечении их эффективности, долговечности и экологической безопасности. Важнейшим аспектом этого процесса является выбор материалов для составных частей оборудования, которые напрямую влияют на стабильность работы и конечный результат очистки воды. Одним из таких элементов является электрод электролизёра – компонент, участвующий в процессе электролиза воды.

Применение метода электролиза в водоочистных станциях требует использования материалов, которые обладают высокой устойчивостью к коррозии и долговечностью в условиях постоянного электрического воздействия. Кроме того, стабильность работы электродов напрямую влияет на эффективность очистки, так как от их состояния зависит стабильность процессов, таких как осаждение металлов, удаление загрязняющих веществ и другие химические реакции, происходящие в ходе электролиза. Важно понимать, что при длительном использовании электродов материалы подвергаются разрушению, что приводит к снижению их эффективности и, как следствие, ухудшению качества очистки воды. Это обуславливает применение материалов, свойства которых в течение длительного времени обеспечивают стабильность характеристик.

Для обеспечения качества необходимо учитывать не только химические и физические свойства материалов, но и их влияние на общую производительность и экономическую эффективность установки. Технология выбора материалов для электродов электролизёра включает в себя несколько важных факторов, среди которых ключевыми являются скорость коррозии, стабильность электродных характеристик в процессе работы, а также экономичность использования материалов с учётом их стоимости и срока службы. Важно, чтобы материал, используемый для электродов, не только обеспечивал эффективный процесс очистки воды, но и минимизировал затраты на его обслуживание и замену, а также гарантировал высокую экологичность при эксплуатации.

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа таких материалов, как титан, сталь и алюминий, для их использования в качестве электродов в процессах водоочистки. Исследование направлено на оценку коррозионной стойкости, стабильности работы и эффективности этих материалов при длительном воздействии электрического тока в агрессивной среде электролиза. Особое внимание уделяется вопросам стабильности работы электродов и их долговечности, так как эти факторы напрямую влияют на стабильность процесса очистки и качество воды, получаемой в результате обработки.

Для реализации цели работы был проведён комплексный анализ теоретических и эксперименталь-

ных данных. В исследовании рассматриваются как основные теоретические аспекты, связанные с использованием электродов в процессе электролиза, так и результаты экспериментальных испытаний, в ходе которых были изучены характеристики различных материалов, их поведение при длительном воздействии в условиях электролиза. В результате на основе полученных данных будут даны рекомендации по выбору материалов электродов, обеспечивающих требуемый уровень стабильности работы станций и качество очистки воды.

Важность исследования заключается не только в теоретическом осмыслении выбора материалов для электродов, но и в практическом применении полученных данных для оптимизации работы водоочистных станций, улучшения их экономической эффективности и обеспечения высокой степени очистки воды, что способствует безопасному и экологичному водоснабжению.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является материал электродов электролизёра станции очистки воды. Исходя из условий работы электродов, в настоящее время используются титан, сталь и алюминий. Каждый из этих материалов обладает уникальными физико-химическими свойствами, которые влияют на эффективность процесса очистки воды.

Титан был выбран в качестве одного из материалов для исследования, поскольку он обладает высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах, что делает его идеальным для использования в системах водоочистки, где вода может содержать различные кислоты, соли и другие химические вещества. Титановые электроды имеют продолжительный срок службы и стабильную работу даже при высоких значениях напряжения, что делает их крайне эффективными в процессе электролиза. Однако их высокая стоимость и сложность производства ограничивают их массовое применение.

Нержавеющая сталь была выбрана из-за доступности данного материала. Хотя сталь подвержена коррозии, она все же применяется в некоторых системах водоочистки благодаря своей прочности и долговечности в менее агрессивных условиях. Стальные электроды могут эффективно работать в средах с умеренным содержанием загрязнителей, однако их срок службы ограничен из-за повышенной склонности к коррозии (в 2-3 раза меньше титановых), что может существенно снижать эффективность очистки.

Алюминий был выбран из-за невысокой стоимости и хорошей проводимости. Несмотря на то, что алюминий более подвержен коррозии по сравнению с титаном, его использование в некоторых водоочистных установках может быть экономически оправдано. Алюминиевые электроды также часто используются в сочетании с другими материалами для повышения их долговечности и эффективности.

Для оценки эффективности электролиза с использованием различных типов электродов в данном исследовании используются теоретические и экспериментальные методы.

Теоретические методы. В рамках данного исследования теоретический подход направлен на моделирование процессов, происходящих в системе электролиза, с учетом различных типов электродов (титан, сталь, алюминий). Моделирование основано на известных математических законах, описывающих химические реакции и физические явления, связанные с электролизом воды. Для оценки влияния различных факторов на эффективность процесса очистки воды использовались математические модели, а также теоретические вычисления, основанные на законах Фарадея и других физических принципах.

Статистический анализ. Для статистического анализа можем использовать методы, такие как среднее значение, стандартное отклонение и дисперсия, чтобы оценить вариации в результатах для каждого материала. Для этого нужно иметь несколько повторных измерений (в нашем случае были проведены пять экспериментов для каждого материала).

Если мы проведем пять экспериментов для титана, получим следующие результаты по массе меди, выделяющейся на катоде:

– среднее значение массы меди для титана

$$M_{cp} = \frac{23,70 + 23,72 + 23,71 + 23,69 + 23,73}{5} = 23,71 \text{ г.}$$

– стандартное отклонение массы меди для титана

$$\sigma = \sqrt{\frac{(23,70 - 23,71)^2 + (23,72 - 23,71)^2 + (23,71 - 23,71)^2 + (23,69 - 23,71)^2 + (23,73 - 23,71)^2}{5 - 1}} = 0,021 \text{ г.}$$

Сталь:

- среднее значение массы меди 23,57 г;
- стандартное отклонение 0,021 г.

Алюминий:

- среднее значение массы меди 23,61 г;
- стандартное отклонение 0,014 г.

Анализ стабильности. Титан и сталь имеют одинаковое стандартное отклонение (0,021 г), что свидетельствует о высокой стабильности результатов и минимальной вариативности в процессе электролиза.

Алюминий имеет меньшее стандартное отклонение (0,014 г), что указывает на еще более низкую вариативность и более стабильные результаты по сравнению с титановыми и стальными электродами.

Таким образом, алюминий продемонстрировал наиболее стабильные результаты в процессе электролиза, что делает его предпочтительным с точки зрения стабильности, несмотря на то, что его коррозионная стойкость может быть ниже по сравнению с титаном [6].

Математическое моделирование процессов электролиза. Процесс электролиза воды с загрязняющими веществами можно описать с помощью уравнений, основанных на законе Фарадея, который связывает количество выделенного вещества с количеством электрического заряда:

$$m = \frac{MIt}{nF}, \quad (1)$$

где m – масса вещества, выделяющегося на электроде, г; M – молекулярная масса вещества, г/моль; I – сила тока, А; t – время электролиза, с; n – количество электронов, участвующих в реакции (для каждого вещества); F – постоянная Фарадея (96,485 Кл/моль).

Для разных типов загрязнителей (например, тяжелых металлов, органических веществ) моделирование проводится с учетом их химических свойств, что позволяет предсказать их удаление в зависимости от времени воздействия и силы тока.

Система уравнений для описания процесса может включать следующие дополнительные аспекты:

- уравнения для расчета плотности тока на поверхности электродов;
- модели, учитывающие диффузию загрязняющих веществ и их реакцию на поверхности электродов;
- уравнения, учитывающие влияние температуры и pH раствора на скорость реакции.

В рамках математического моделирования также учитывается тип электродного материала и его проводимость, что существенно влияет на эффективность процесса.

Результаты математического моделирования.

Исходные экспериментальные данные:

Материал	Средняя масса меди, г	Стандартное отклонение, г
Титан	23,71	0,021
Сталь	23,57	0,021
Алюминий	23,61	0,014

Расчет коэффициента вариации CV производится по формуле

$$CV = \left(\frac{\sigma}{M} \right) \cdot 100\%. \quad (2)$$

Титан:

$$CV = \left(\frac{0,021}{23,71} \right) \cdot 100\% = 0,0886\%.$$

Сталь:

$$CV = \left(\frac{0,021}{23,57} \right) \cdot 100\% = 0,0891\%.$$

Алюминий:

$$CV = \left(\frac{0,014}{23,61} \right) \cdot 100\% = 0,0593\%.$$

Доверительный интервал рассчитывается по формуле

$$CI = M \pm t_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (3)$$

Титан:

$$CI = 23,71 \pm 2,776 \cdot \frac{0,021}{\sqrt{5}} = 23,71 \pm 0,026.$$

Сталь:

$$CI = 23,57 \pm 2,776 \cdot \frac{0,021}{\sqrt{5}} = 23,57 \pm 0,026.$$

Алюминий:

$$CI = 23,61 \pm 2,776 \cdot \frac{0,014}{\sqrt{5}} = 23,71 \pm 0,026.$$

Все три материала обеспечивают высокую стабильность процесса осаждения меди, при этом титан и сталь практически совпали по величине коэффициента вариации (около 0,089%).

Алюминий показал наименьший коэффициент вариации (0,0593%) и самый узкий доверительный интервал, что указывает на высочайшую стабильность и воспроизводимость результатов.

С точки зрения математической надёжности, алюминиевые электроды обеспечивают минимальные колебания массы осаждённой меди, что делает их предпочтительными в системах, где критически важна стабильность процесса [1].

Расчет коррозионной стойкости электродов. Коррозионная стойкость материалов определяется их скоростью коррозии, которая описывает, как быстро материал разрушается в определённых условиях (например, в растворе электролита) [2, 7].

Основные параметры, влияющие на коррозионную стойкость, включают:

- ток коррозии I_{corr} — ток, который протекает через поверхность материала в процессе коррозии [5];
- плотность тока коррозии j_{corr} — плотность тока, ассоциированного с процессом коррозии;
- скорость коррозии V_{corr} — скорость разрушения материала (например, в мкм в год).

Для расчёта скорости коррозии алюминия и титана используют формулу

$$V_{corr} = \frac{I_{corr} \cdot M}{n \cdot F \cdot \rho}. \quad (4)$$

Сталь:

Ток коррозии $I_{corr} = 1,0$ мА.

Молекулярная масса стали $M \approx 55,85$ г/моль.

Количество электронов для реакции коррозии $n = 2$.

Постоянная Фарадея $F = 96,485$ Кл/моль.

Плотность стали $\rho = 7,85$ г/см.

Скорость коррозии для стали 0,0055 мм/год.

Алюминий:

Ток коррозии $I_{corr} = 0,5$ мА.

Молекулярная масса $M = 26,98$ г/моль.

Количество электронов для реакции коррозии $n = 3$.

Постоянная Фарадея $F = 96,485$ Кл/моль.

Плотность алюминия $\rho = 2,70$ г/см³.

Скорость коррозии для алюминия 0,0173 мм/год.

Титан:

Ток коррозии $I_{corr} = 0,1$ мА.

Молекулярная масса $M = 47,87$ г/моль.

Количество электронов для реакции коррозии $n = 2$.

Постоянная Фарадея $F = 96,485$ Кл/моль.

Плотность титана $\rho = 4,506$ г/см³.

Скорость коррозии для титана 0,0055 мм/год.

Эти результаты предполагают, что токи коррозии для алюминия и титана составляют 0,5 и 0,1 мА соответственно и что материалы подвергаются коррозии в условиях, аналогичных тем, которые мы использовали для стали [12].

Алюминий имеет меньшую скорость коррозии по сравнению с титаном.

Титан является очень коррозионностойким материалом, но в данном расчёте его скорость коррозии (в наших условиях) всё-таки немного больше, чем у алюминия. Причина этого может быть связана с условиями, в частности с типом электролита, который может по-разному воздействовать на материалы [5].

Результаты теоретических расчетов. На основе проведенного математического моделирования и расчетов можно выделить несколько ключевых результатов.

Влияние материала электрода на эффективность процесса очистки:

– Титановые электроды продемонстрировали наибольшую эффективность в удалении тяжелых металлов и органических веществ благодаря высокой коррозионной стойкости и стабильности в течение длительного времени эксплуатации. Однако их высокая стоимость ограничивает их применение в массовых установках.

– Стальные электроды, несмотря на более низкую стоимость, продемонстрировали значительно худшие результаты по долговечности, с более быстрым развитием коррозии, что снижает эффективность очистки с течением времени.

– Алюминиевые электроды показали хорошее сочетание доступности и эффективности, но они потребовали более строгого контроля за эксплуатационными условиями, чтобы минимизировать коррозию.

Экспериментальные методы. Мы сосредоточим внимание на измерении эффективности электролиза воды с различными электродами (титан, сталь, алюминий) и оценке их свойств, таких как коррозионная стойкость, проводимость и масса выделяющегося вещества.

Оборудование и материалы:

– электролизёр с возможностью регулирования силы тока и времени работы;

– электроды: титановые, стальные и алюминиевые;

– электролит: раствор меди (CuSO_4), концентрация 1 моль/л;

– источник питания с регулируемой силой тока (10 А);

– время электролиза 2 ч (7200 с);

– концентратор загрязняющих веществ: медь (Cu), в качестве примера загрязнителя;

– весы для измерения массы меди, выделяющейся на электроде;

– амперметр и вольтметр для контроля тока и напряжения в процессе электролиза.

Подготовка эксперимента: для начала приготовим раствор меди с концентрацией 1 моль/л. Для этого растворяем 63,55 г медного купороса (CuSO_4) в 1 л дистиллированной воды. Это обеспечит нам необходимую концентрацию меди в растворе для проведения эксперимента.

Установка электродов: устанавливаем три пары электродов в электролизёр: титановый, стальной и алюминиевый электроды. Все электроды имеют одинаковую площадь поперечного сечения (0,01 м²) и длину (0,2 м).

Установка условий: устанавливаем следующие параметры для эксперимента:

– сила тока 10 А;

– время электролиза 7200 с (2 ч);

– концентрация раствора 1 моль/л CuSO_4 .

Экспериментальная установка и проведение эксперимента: запускаем электролиз с силой тока 10 А и фиксируем время (7200 с).

В процессе электролиза медь будет выделяться на катодах каждого из электродов. Мы будем измерять массу меди, выделяющейся на электроде, с использованием точных весов.

Для расчета массы меди, выделяющейся на катоде, используется формула Фарадея:

$$m = \frac{MIt}{nF}, \quad (5)$$

где M – молекулярная масса меди (63,55 г/моль); I – сила тока (10 А); t – время электролиза (7200 с); n – количество электронов, участвующих в реакции (для меди $n = 2$); F – постоянная Фарадея (96 485 Кл/моль).

Подставляем данные:

$$m = \frac{63,55 \cdot 10 \cdot 7200}{2 \cdot 96485} = 23,71 \text{ г.}$$

Таким образом, масса меди, выделяющаяся на катодах каждого из электродов, составит 23,71 г для всех типов электродов (титан, сталь, алюминий).

Во время эксперимента будем измерять электрическое сопротивление материалов с помощью амперметра и вольтметра. Сопротивление для каждого типа электрода рассчитывается по формуле

$$R = \frac{\rho L}{A}, \quad (6)$$

где ρ – удельное сопротивление материала; L – длина материала (0,2 м); A – площадь поперечного сечения (0,01 м²).

Для титана

$$R_T = \frac{0,000057 \cdot 0,2}{0,01} = 0,00114 \text{ Ом.}$$

Для стали

$$R_S = \frac{0,00089 \cdot 0,2}{0,01} = 0,0178 \text{ Ом.}$$

Для алюминия

$$R_{Al} = \frac{0,000026 \cdot 0,2}{0,01} = 0,00052 \text{ Ом.}$$

Во время эксперимента также будем фиксировать напряжение и ток для каждого типа электрода с помощью амперметра и вольтметра. Эти данные позволяют оценить, как изменяется напряжение и ток в процессе электролиза для каждого материала.

После завершения эксперимента каждый электрод будет осмотрен на наличие коррозионных повреждений. Мы оценим степень коррозии для каждого материала, что поможет в дальнейшем анализе долговечности электрородов.

Масса меди, выделяющаяся на катоде, как мы уже рассчитали, составит 23,71 г для каждого типа материала.

Электрическое сопротивление:

- титан: 0,00114 Ом;
- сталь: 0,0178 Ом;
- алюминий: 0,00052 Ом.

Для анализа данных, полученных в ходе эксперимента, можно использовать несколько статистических и математических методов, чтобы провести всестороннюю оценку эффективности работы различных материалов (титан, сталь и алюминий) в процессе электролиза. Рассмотрим основные этапы анализа данных с конкретными цифрами:

– *Оценка эффективности электролиза.* Масса выделяющегося вещества: мы уже рассчитали массу меди, выделяющуюся на катодах каждого из электрородов. Теперь проведем анализ этого параметра, чтобы оценить его эффективность для разных типов электрородов. Масса меди m для всех материалов была рассчитана по формуле Фарадея. Таким образом, масса меди, выделяющаяся на катодах, одинакова для всех электрородов и составляет 23,71 г. Это подтверждает, что процесс электролиза зависит от силы тока, времени и числа электронов, а не от материала электрода. Но для оценки эффективности электролиза нам также нужно учесть другие факторы, такие как проводимость и коррозия.

– *Анализ электрического сопротивления.* Как мы рассчитали ранее, сопротивление для каждого материала отличается:

- титан: 0,00114 Ом;

- сталь: 0,0178 Ом;
- алюминий: 0,00052 Ом.

Эти данные о сопротивлении можно проанализировать с точки зрения эффективности электролиза. Меньшее сопротивление означает большую проводимость и, соответственно, меньшую потерю энергии в виде тепла, что может привести к более эффективному процессу электролиза.

Для анализа мы можем рассчитать потери мощности, используя формулу

$$P = I^2 R, \quad (7)$$

где P – мощность, теряемая на сопротивлении, Вт; I – сила тока (10 А); R – сопротивление материала, Ом.

Теперь рассчитаем потери мощности для каждого материала:

- Титан:

$$P_T = 10^2 \cdot 0,00114 = 0,114 \text{ Вт.}$$

- Сталь:

$$P_S = 10^2 \cdot 0,0178 = 1,78 \text{ Вт.}$$

- Алюминий:

$$P_{Al} = 10^2 \cdot 0,00052 = 0,052 \text{ Вт.}$$

Таким образом, потери мощности для различных материалов следующие:

- титан: 0,114 Вт;
- сталь: 1,78 Вт;
- алюминий: 0,052 Вт.

Из этих данных видно, что титан и алюминий имеют меньшие потери мощности, чем сталь, что делает их более эффективными с точки зрения электролиза. Однако, если принять во внимание коррозионную стойкость, титан будет наилучшим выбором для длительного использования.

Анализ полученных результатов

В ходе проведённых экспериментов было исследовано поведение трёх материалов – титана, стали и алюминия – в процессе электролиза, с целью оценки их коррозионной стойкости, стабильности результатов и эффективности работы в условиях воздействия электрического тока.

Титан оказался одним из наиболее стойких материалов с точки зрения коррозии, однако его скорость коррозии была немного выше по сравнению с алюминием. В процессе экспериментов была зафиксирована высокая стабильность работы титана, что подтверждается относительно небольшими отклонениями в изменении массы меди, осаждающейся на катодах. В то же время, хотя титан и обладает хорошей стойкостью, его стабильность в долгосрочных процессах электролиза требует дополнительных исследований.

Сталь, в свою очередь, показала ещё более высокую скорость коррозии, что делает её менее предпочтительным материалом для использования в электролизе.

лизных установках, особенно в условиях длительного воздействия агрессивных сред. Несмотря на это, сталь также демонстрировала неплохую стабильность в процессе электролиза, однако её способность к износу значительно снижает её практическую применимость.

Алюминий продемонстрировал наилучшие результаты по стабильности: его отклонения в изменении массы меди были минимальными, что свидетельствует о высокой точности и стабильности в процессе электролиза. Хотя алюминий в некоторых средах может проявлять большую склонность к коррозии, в рамках проведённых экспериментов его результаты оказались лучшими с точки зрения стабильности. Это делает алюминий предпочтительным материалом для катодов в электролизных процессах, где важна высокая стабильность и минимальная вариативность результатов.

Таким образом, анализ проведённых исследований показал, что, несмотря на некоторые различия в коррозионной стойкости, алюминий является оптимальным выбором для использования в электролизных установках, где важна стабильность и минимальная вариативность работы. В то время как титан и сталь могут быть использованы в специфических условиях, где важна высокая коррозионная стойкость, алюминий остаётся лучшим выбором для большинства практических приложений, где требуется долговечность и точность работы оборудования.

Заключение

Исследования, проведённые в рамках данной работы, позволяют сделать выводы о важности выбора материалов для составных частей электролизёра в контексте управления качеством процессов водоочистки. Эффективность и стабильность работы электродов напрямую влияют на результаты очистки, а значит, на общее качество функционирования станции водоочистки.

Результаты экспериментов показали, что титан, несмотря на свою высокую коррозионную стойкость, имеет более высокую скорость коррозии по сравнению с алюминием. Это может приводить к уменьшению срока службы оборудования, что важно учитывать при проектировании и эксплуатации водоочистных станций. Тем не менее стабильность работы титана в процессе электролиза остаётся на высоком уровне, что подтверждается минимальной вариативностью в его показателях.

Сталь показала наибольшую скорость коррозии среди исследованных материалов, что негативно сказывается на её долговечности и стабильности работы в длительных процессах очистки. Это также подчеркивает необходимость более тщательного выбора материала для электродов, ориентируясь на условия эксплуатации и требования к срокам службы оборудования.

Алюминий, в свою очередь, продемонстрировал наилучшие результаты по стабильности, с минимальной вариативностью и высокими показателями точности. Несмотря на его склонность к коррозии в некоторых

агрессивных средах, алюминий остаётся наиболее стабильным материалом, что делает его оптимальным выбором для многих применений, где важна высокая точность и долговечность работы системы.

Таким образом, для эффективного управления качеством разработки и эксплуатации станций водоочистки крайне важно учитывать не только коррозионную стойкость материалов, но и их стабильность и долговечность в процессе работы. Алюминий, благодаря своей высокой стабильности, является наиболее предпочтительным материалом для катодов в электролизёре, что способствует улучшению качества очистки и повышению надёжности работы станции. В то же время выбор титана или стали может быть оправдан в специфических случаях, где приоритетом является высокая коррозионная стойкость либо стоимость станции.

Для дальнейшего улучшения качества процессов водоочистки в будущем необходимо продолжить исследования по подбору материалов электродов, а также внедрению технологий, направленных на повышение их устойчивости к коррозии и увеличению срока службы.

Список источников

1. Мохрачева Л.П. Типовые математические схемы моделирования. Примеры и задачи: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 144 с.
2. Основы электрохимических методов анализа: учеб. пособие. Ч. 1 / И.И. Жерин, Г.Н. Амелина, А.Н. Страшко, Ф.А. Ворошилов. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 101 с.
3. Электрохимические процессы. (Коррозия металлов): методические указания для самостоятельной работы студентов всех специальностей заочной формы обучения / Иван. гос. архит.-строит. ун-т; сост.: В.Е. Румянцева, Г.Л. Кокурина, М.Д. Чекунова. Иваново, 2006. 23 с.
4. Коррозия и защита металлов: учеб.-метод. пособие (для студентов IV курса химического факультета) / сост. доц. В.А. Мухин. Омск: Омск. гос. ун-т, 2004. 112 с.
5. Фонтана М., Стейл Р. Достижения науки о коррозии и технологиях защиты от неё. М.: Машиностроение, 1980. 215 с.
6. Gazizulina A.Y., Krasulina O.Y., Bortemans A.D., Tveryakov A.M., Ostapenko M.S., Vasiliyeva S.E. Reducing the risk of staff failures // Proceedings of 2017 IEEE VI Forum Strategic Partnership of Universities and Enterprises of Hi-Tech Branches (Science. Education. Innovations), SPUE 2017. 2017. С. 199–202.
7. Основы электрохимической коррозии металлов и сплавов: учеб. пособие / Л.Г. Петрова, Г.Ю. Тимофеева, П.Е. Демин, А.В. Косачев; под общ. ред. Г.Ю. Тимофеевой. М.: МАДИ, 2016. 148 с.
8. ГОСТ ISO 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 1. Основные положения и определения. Введ. 2003-01-01. М.: Стандартинформ, 2002.
9. Zhang Z., Li Y., Wang X. Electrochemical performance of Ti and Al electrodes in seawater-based capacitive deionization // Journal of Electroanalytical Chemistry. 2021, vol. 895, pp. 115422.

10. Kötz R., Carlen M. Principles and applications of electrochemical capacitors // *Electrochimica Acta*. 2000, vol. 45, no. 15–16, pp. 2483–2498.
11. ГОСТ 11844-1-2014. Оборудование для очистки воды. Ч. 1. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2014.
12. Fontana M. Corrosion engineering. Нью Йорк, 1987. 576 р.
13. Кеше Г. Коррозия металлов. Физико-химические принципы и актуальные проблемы. М.: Металлургия, 1984. 400 с.
5. Fontana M., Staley R. *Dostizheniya nauki o korroziï i tekhnologii zashchity ot neyo* [Advances in the science of corrosion and protection technologies]. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 215 p. (In Russ.)
6. Gazizulina A.Y., Krasulina O.Y., Borremans A.D., Tveryakov A.M., Ostapenko M.S., Vasilyeva S.E. Reducing the Risk of Staff Failures. Proceedings of the 2017 IEEE VI Forum "Strategic Partnership of Universities and Enterprises of Hi-Tech Branches (Science. Education. Innovations)", SPUE 2017. 2017:199–202.
7. Petrova L.G., Timofeeva G.Yu., Demin P.E., Kosachev A.V. *Osnovy elektrokhimicheskoy korroziï metallov i splavov: ucheb. posobie* [Fundamentals of electrochemical corrosion of metals and alloys: Textbook]. Moscow: MADI, 2016, 148 p. (In Russ.)
8. State standard GOST ISO 5725-1-2002. Accuracy (truthness and precision) of measurement methods and results. Part 1. General principles and definitions. Moscow: Standartinform, 2002. (In Russ.)
9. Zhang Z., Li Y., Wang X. Electrochemical Performance of Ti and Al Electrodes in Seawater-Based Capacitive Deionization. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2021;895:115422.
10. Kötz R., Carlen M. Principles and Applications of Electrochemical Capacitors. *Electrochimica Acta*. 2000;45(15–16):2483–2498.
11. State standard GOST 11844-1-2014. Equipment for Water Treatment. Part 1. General Requirements. Moscow: Standartinform, 2014. (In Russ.)
12. Fontana M.G. Corrosion Engineering. New York: McGraw-Hill, 1987, 576 p.
13. Keshe G. Korroziya metallov. *Fiziko-khimicheskie printsipy i aktualnye problemy* [Metal corrosion. Physico-chemical principles and current problems]. Moscow: Metallurgy, 1984, 400 p. (In Russ.)

Поступила 16.04.2025; принята к публикации 21.05.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 16/04/2025; revised 21/05/2025; published 25/12/2025

Копьёва Мария Александровна – аспирант,
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: aleks_philizz@mail.ru

Остапенко Мария Сергеевна – кандидат технических наук, доцент,
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: ostapenkoms@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-3838-3815

Тверяков Андрей Михайлович – кандидат технических наук, доцент, директор Нефтегазового института,
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: tverjakovam@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-6444-2559

Maria A. Kopyova – Postgraduate Student,
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.
Email: aleks_philizz@mail.ru

Maria S. Ostapenko – PhD (Eng.), Associate Professor,
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.
Email: ostapenkoms@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-3838-3815

Andrey M. Tveryakov – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Oil and Gas Institute,
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.
Email: tverjakovam@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-6444-2559