

УДК 628.34:543.3

СВИНАРЧУК Е.А., студентка ТБ-11М (НИУ МИЭТ)
Научный руководитель ПОПОВА Н.В., к.т.н. (НИУ МИЭТ)
г. Зеленоград

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ *pH*-ЭЛЕКТРОДОВ В СИСТЕМЕ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ СТОЧНЫХ ВОД

В процессе производства микроэлектронных компонентов формируются значительные объемы сточных вод, представляющих собой слабоконцентрированные растворы неорганических кислот и щелочей. Ключевым звеном в системе очистки данных стоков является стадия нейтрализации, задачей которой выступает коррекция и стабилизация водородного показателя (*pH*). Эффективность процесса нейтрализации носит комплексный характер и определяется точностью контроля *pH*, что позволяет решить три основные задачи:

1. обеспечить технологическую стабильность последующих стадий очистки;
2. повысить экономическую эффективность за счет оптимизации расхода реагентов;
3. гарантировать экологическую безопасность, обеспечивая соответствие состава очищенных стоков установленным нормативным требованиям.

В реальных производственных условиях эффективность процесса нейтрализации ограничивается низкой эксплуатационной стойкостью измерительных *pH*-электродов, подверженных комплексному воздействию как загрязнителей сточных вод, так и технологических реагентов. Для выявления основных причин деградации измерительного оборудования и планирования эффективных методов повышения эксплуатационной стойкости электродов было проведено комплексное исследование на базе предприятия микроэлектроники г. Зеленограда.

Анализ эксплуатационных данных на примере стеклянных *pH*-электродов производства *Juto* показал, что при существующей технологии срок службы одного измерительного электрода не превышает 1 месяца. Исследование факторов, влияющих на деградацию электродов, позволило выявить следующие основные причины выхода из строя измерительных *pH*-электродов:

1) наличие в сточных водах продуктов химико-механической полировки с типичным размером 0,1-1 мкм, включая частицы оксида кремния (SiO_2) и металлического кремния, приводит к механическому блокированию пор стеклянной мембранны *pH*-электрода, что нарушает ионообменные процессы и увеличивает электрическое сопротивление чувствительного элемента;

2) использование в технологическом процессе хлорного железа ($FeCl_3$) в качестве коагулянта вызывает образование плотных гелеобразных отложений на поверхности электрода; при гидролизе $FeCl_3$ образуются хлопья гидроксида железа, которые обволакивают чувствительную мембрану, создавая дополнитель-

ный барьер для ионного обмена и потенциометрических измерений. Данные отложения обладают выраженной адгезией к стеклянной поверхности и способствуют закреплению на электроде механических частиц, формируя устойчивые композитные загрязнения. Наблюдаемые в исследуемом производственном процессе увеличение времени отклика и нестабильность показаний электродов согласуются с литературными данными: если электроды не очищать после использования, они теряют точность, и погрешность измерения всей системы повышается. Это проявляется как постоянное снижение углового коэффициента электрода [1].

Для выбора способа минимизации данных негативных воздействий был проведен сравнительный анализ различных методов очистки электродов, включая ультразвуковую обработку, химическую промывку, струйную гидродинамическую промывку и механическую очистку.

Результаты проведенного сравнительного анализа, основанного на данных технических характеристик оборудования, регламентов производителей и научных исследований [2-6], систематизированы в таблице 1. Сводные данные демонстрируют выраженную специализацию каждого метода в отношении определенных типов загрязнений. Согласно литературным источникам и технической документации, гидродинамическая промывка характеризуется максимальной эффективностью (~90%) против механических частиц SiO_2/Si , в то время как химическая обработка 25%-м раствором HCl обеспечивает наиболее полное удаление (~95%) гелеобразных отложений гидроксида железа.

Таблица 1. Комплексный сравнительный анализ методов очистки рН-электродов

Метод очистки	Эффективность удаления загрязнений		Риск повреждения электрода	Эксплуатационные затраты* (руб./цикл очистки)	Общая продолжительность цикла обслуживания, мин.
	SiO_2/Si	$Fe(OH)_3$			
Ультразвуковой	~70%	~40%	Высокий	~45	45 - 60
Химический	~25%	~95%	Средний	~25	90 - 180
Гидродинамический	~90%	~75%	Низкий	~25	5 - 10
Механический	~45%	~30%	Высокий	~10	20 - 30

*Примечание: * Указанные эксплуатационные затраты являются сметно-условными и рассчитаны на основе сравнительного анализа, включающего стоимость реагентов, энергопотребления, амортизации оборудования и поправки на риск повреждения чувствительного элемента электрода. Цифры демонстрируют сравнительное соотношение затрат между методами.*

По результатам анализа выбрана оптимальная комбинация методов, обеспечивающая комплексное решение проблемы загрязнения электродов при сохранении их метрологических характеристик. Выбранная комбинация положена в основу двухступенчатого комплекса мероприятий восстановления измерительных рН-электродов:

- **первая ступень (после каждой смены)** — механическая очистка: гидродинамическая промывка электродов деионизованной водой температурой 20-25°C под давлением 0,5-1,0 атм в течение 3-5 минут для удаления свежеобразованных механических загрязнений;

- **вторая ступень (еженедельная)** — химическая регенерация: обработка 25%-м раствором соляной кислоты в течение 10-15 минут для растворения неорганических отложений.

Внедрение разработанного регламента позволит достичь значительного экономического эффекта. При стоимости одного измерительного электрода 40 000 рублей и сроке службы в 1 месяц годовые затраты на одну точку измерения составляют 480 000 рублей в год. После внедрения системы восстановления, согласно проведенной оценке, эксплуатационный ресурс электродов может быть увеличен до 3 месяцев, что потенциально снизит годовые затраты до 160 000 рублей. Годовая экономия на одной точке измерения составит 320 000 рублей, или 67%.

По предварительным расчетам разработанный комплекс мероприятий восстановления электродов сможет обеспечить значительный энерго- и ресурсосберегающий эффект:

1. Снижение расхода реагентов для нейтрализации сточных вод на 15-20% за счет повышения точности контроля *pH*;
2. Сокращение энергопотребления насосного оборудования дозирования реагентов на 10-15%;
3. Снижение трудозатрат на замену и калибровку электродов на 50-60%;
4. Уменьшение объема вторичных отходов на 40-50% за счет сокращения количества отработанных электродов и оптимизации расхода реагентов.

Дополнительное преимущество предлагаемого комплекса мероприятий заключается в возможности их полной автоматизации, что обеспечит стабильность технологического процесса нейтрализации сточных вод.

Таким образом, проведенное исследование позволило установить комплексный характер причин низкой эксплуатационной стойкости измерительных *pH*-электродов в системе нейтрализации сточных вод предприятия микроэлектроники. В процессе работы было выявлено, что основными деградационными факторами выступают механическое загрязнение частицами продуктов химико-механической полировки (SiO_2 , металлический кремний) и образование плотных отложений гидроксида железа при использовании коагулянта $FeCl_3$.

В результате сравнительного анализа методов очистки установлено целесообразность применения комбинированного подхода. Разработан комплекс мероприятий двухступенчатого восстановления электродов, включающий регулярную гидродинамическую промывку для удаления механических загрязнений и периодическую химическую регенерацию для растворения неорганических отложений.

Технико-экономическое обоснование подтверждает эффективность предлагаемого решения:

- увеличение межремонтного ресурса электродов в 3 раза (с 1 до 3 месяцев);
- снижение эксплуатационных затрат на 67% (320 000 рублей на точку измерения в год);
- повышение точности контроля *pH* на 15-20% за счет поддержания стабильных метрологических характеристик.

Внедрение разработанных мероприятий позволит существенно повысить надежность работы системы нейтрализации сточных вод и обеспечит значительный энергосберегающий эффект для предприятий микроэлектронной промышленности.

Дальнейшие исследования планируется посвятить разработке инструментов автоматизации предложенных процедур и валидации эффективности мероприятий в условиях непрерывного производственного цикла.

Список литературы:

1. Справочник по теории pH: теория и практика лабораторных измерений [Электронный ресурс] // METTLER TOLEDO. — Швериценбах, Швейцария, 2007. — 52 с. — URL: [<https://www.ikar.udm.ru/files/pdf/ph-measurement.pdf>] (дата обращения: 09.11.2025)/
2. Аналитическая химия и физико-химические методы анализа: учебник и практикум для СПО / А. В. Гамеева [и др.] ; под редакцией А. В. Гамеевой. — 2-е изд. — Москва : Издательство Юрайт, 2021. — 403 с.
3. Способы восстановления pH-электрода / МедХим. — Текст : электронный // МедХим: научно-производственная компания [сайт]. — 2023. — URL: <https://medhim.ru/blog/sposoby-vosstanovleniya-ph-elektroda/> (дата обращения: 09.11.2025).
4. Электроды сравнения и их использование / ООО «ОмЛиберСайенс». — Текст : электронный // База знаний OhmLiberScience [сайт]. — 2022. — URL: <https://ohmliberscience.ru/resursy/baza-znanij/967-elektrody-sravneniya-i-ikh-ispolzovanie> (дата обращения: 09.11.2025).
5. Жилинский, Е. Г. Электрохимическая очистка водных растворов: учеб.-метод. пособие / Е. Г. Жилинский, С. Е. Жилинская ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. технол. ун-т. — Минск : БГТУ, 2012. — 55 с.
6. Р 50.2.033-2004. Государственная система обеспечения единства измерений. Электроды сравнения для электрохимических измерений. Методика поверки : утв. Приказом Ростехрегулирования от 29.12.2004 : введ. в действие с 01.03.2004 : взамен МИ 1772-87. — Введ. 2004-03-01. — Москва :Стандартинформ, 2005. — 24 с.