**Системы контроля окружающей среды № 3 (61) 2025**

https://elibrary.ru/vcdlhm

УДК 628.31 DOI: 10.33075/2220-5861-2025-3-67-74

# ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯЦИОННАЯ ОЧИСТКА ВОДЫ: ПОДХОДЫ К АВТОМАТИЗАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

**В.О. Смирнова, И.В. Мателенок**

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, лит. А
*E-mail: vlada_sm@mail.ru*

Работа посвящена актуальной задаче разработки и моделирования автоматизированных систем управления для повышения эффективности процессов водоочистки. Проведен анализ современного состояния технологий электрохимической очистки воды и существующих на рынке установок, который выявил недостаточный уровень их автоматизации. Обоснован выбор метода электрокоагуляции как одного из наиболее универсальных. На основе серии лабораторных экспериментов определены ключевые параметры и технологические этапы, требующие оперативного контроля. Предложен вариант технической реализации установки водоочистки, предполагающий включение в ее состав интеллектуальной системы автоматизации, которая обеспечивает гибкое управление исполнительными механизмами на основе сигналов с датчиков мутности. Выбрана компоновка оборудования, учитывающая требования к удобству доступа к модулям для обслуживания и компактности для размещения в условиях ограниченного пространства. Компоновка реализована в цифровой трехмерной модели установки. На основе расчетов параметров электрокоагулятора разработана конструкция блока электродов для монтажа в цилиндрической емкости, а также оригинальный шламосборник. Описана схема функционирования установки в режимах очистки и промывки. Показано, что внедрение предложенных решений позволяет сократить трудозатраты на техническое обслуживание оборудования на 15–20%.

**Ключевые слова:** электрокоагуляция, водоочистка, автоматизированные системы, системы автоматизированного управления, натурное моделирование

Поступила в редакцию: 03.09.2025. После доработки: 12.09.2025. Принята к печати: 22.09.2025.

**Введение.** Применение электрохимических методов в задачах водоподготовки и водоочистки является перспективным направлением, позволяющим существенно сократить или полностью исключить использование химических реагентов, а также уменьшить массогабаритные характеристики оборудования [1]. Одним из наиболее универсальных электрохимических методов является электрокоагуляция, которая эффективна для решения широкого круга задач, включая очистку бытовых и промышленных сточных вод от широкого спектра загрязняющих веществ.

Одним из преимуществ метода является его высокая степень управляемости: параметры электрохимических реакций поддаются точному контролю, что упрощает процесс автоматизации. Данная особенность делает электрокоагуляцию особенно перспективной для создания компактных, полностью автоматизированных установок, предназначенных для эксплуатации на локальных и автономных объектах.

Анализ российского и зарубежного рынка аппаратов очистки воды методом электрокоагуляции показал, что представленные установки имеют высокую стоимость, большие габаритные размеры, высокие затраты на обслуживание, недостаточную степень автоматизации подбора режимов обработки воды. Для оптимизации электропотребления, сокращения временных и трудовых затрат, снижения стоимости очистки воды необходимо повысить степень автоматизации процессов электрокоагуляции. В настоящей работе предложен вариант достижения этой цели и описана его техническая реализация.

Для обоснования использования метода электрокоагуляции (ЭК) и определения процессов водоочистки, для которых необходима автоматизация, проведен ряд экспериментальных исследований.

**Моделирование процессов электрокоагуляционной очистки воды.** В статье идёт речь о натурном моделирование, построенном на исследованиях на реальном объекте. Метод электрокоагуляции основан на сорбционном действии гидрооксидов, образующихся в результате электролитического растворения железных или алюминиевых анодов [2]. В данном процессе жертвенные (расходные) аноды подвергаются коррозии, вследствие чего в раствор выделяются активные предшественники коагулянта. На катоде в ходе сопутствующих электролитических реакций выделяется газ. Процесс электрокоагуляции эквивалентен работе электролитической ячейки, где электрическая энергия преобразуется в химическую. Источник постоянного тока подключается к паре электродов (анод и катод), погружённых в электролит – раствор, в котором протекают данные реакции.

Основными преимуществами применения данного метода для водоочистки являются компактность установок и простота их эксплуатации, а также отсутствие необходимости в использовании химических реагентов. Дополнительным достоинством электрокоагуляционного оборудования является его устойчивость к резким перепадам температур. Кроме того, технология обладает высокой эффективностью обеззараживания: постоянный ток высокой плотности способствует разрушению химических соединений и выделению ионов кислорода – одного из наиболее мощных дезинфицирующих агентов [3].

При разработке системы электролитической очистки необходимо учитывать широкий спектр исходных параметров, включая требования к составу и качеству воды до и после очистки, расход и другие технологические показатели. На их основе эмпирически подбираются оптимальные режимы очистки, адаптированные под конкретные условия эксплуатации [1]. Для выбора соответствующего режима следует сформировать модель процессов, протекающих в межэлектродном пространстве, а также рассчитать время, необходимое на завершающий этап обработки. Внедрение автоматизированной системы управления в состав установки водоочистки повышает универсальность избранного метода и расширяет его применение для решения различных задач водоподготовки и водоочистки [1].

На процесс ЭК влияет множество факторов, таких как плотность тока, время электрообработки, расстояние между электродами, концентрация загрязняющих веществ, скорость перемешивания и т.д. Влияние этих параметров на процесс ЭК можно смоделировать с целью сокращения затрат на проведение испытаний за счет снижения количества экспериментов [4].

С целью обоснования использования метода электрокоагуляции для очистки сточной воды, полученной в результате водопотребления для санитарно-гигиенических нужд (далее – СВ СГН), были проведены экспериментальные исследования смоделированных проб воды для исследования влияния плотности тока, времени электролиза и расстояния между электродами на эффективность очистки. Результаты показали, что оптимальными условиями работы электрокоагуляционной установки являются: плотность тока – 12,5 мА/см$^2$, время электролиза – 30 мин и межэлектродный зазор – 0,5 см.

Согласно [5], объем подаваемой на очистку воды, время проведения процесса и контроль параметров очищенной воды целесообразно регулировать с помощью автоматических систем.

**Модельные представления установки водоочистки методом ЭК с базовым функционалом и с автоматизированной системой управления процессами водоочистки.** На рис. 1 представлена натурная модель, построенная на исследованиях экспериментального процесса водоочистки методом электрокоагуляции.

Подаваемая на вход СВ СГН поступает в резервуар-накопитель, в котором реализована первая ступень очистки путем фильтрования для удаления крупных частиц, которые могут вызвать проблемы (например, засорение) в установке. Зонд используется для установки предела для перекачки выбранного количества сточных вод. СВ СГН переходят с одной ступени очистки на другую (в блок очистки, где происходит электрокоагуляция, затем на серию фильтраций и, наконец, в выходной резервуар). Наконец, отфильтрованные СВ СГН попадают в выходной резервуар [6].

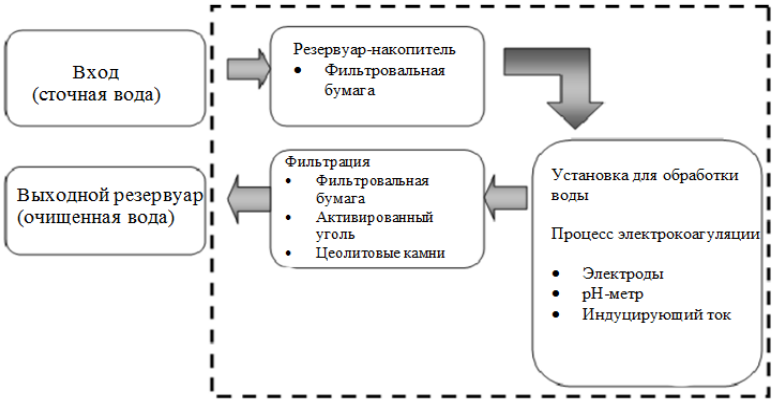


**Рис. 1**. Функциональная модель водоочистки методом электрокоагуляции.
**Fig. 1.** Functional model of electrocoagulation water treatment.

Для разработки автоматизированной системы водоочистки методом ЭК определены основные технические характеристики электрокоагуляционной установки, представленные в табл. 1.

**Таблица 1.** Технические характеристики электрокоагуляционной установки

| Суточный расход воды Q, $м^3$/сут | Расход алюминия для проведения процесса коагуляци, $D_A$ , мг/л | Количество электричества на 1 $м^3$ воды, Кл/ $м^3$ | Часовой расход количества электричества, Кл/час | Необходимая для растворения металла сила тока, I ,A | Масса анода, кг | Масса катода, кг | Общая масса электрокоагулятора, кг |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 2,53 | 27 124,69 | 22 513,49 | 6,25 | 1,66 | 5,024 | 6,684 |
| Количество металла анода, которое может быть растворено, кг | Срок эксплуатации анода, сут | Количество пластин анода, шт | Количество пластин катода, шт | Площадь анода исходя из плотности тока при i=40 А/$м^2$, $см^2$ | Площадь каждой пластины электрода, $см^2$ | Расход электроэнергии при напряжении на электродах 12В на очистку 1 $м^3$ воды | Масса выделяемого водорода, г/ч |
| 1,411 | 27 | 8 | 8 | 1600 | 200 | 0,09 | 0,23 |

Продолжение табл. 1

| Объем выделяемого газа, $м^3$/час | Ширина пакета электродов, м | Общая длина блока электрокоагуляции, м | Общая высота блока электрокоагуляции, м | Расход электроэнергии электрокоагуляционным блоком в год, кВтч | Количество образующейся пены, % | Объем резервуара, $м^3$ | Геометрические характеристики резервуара, мм |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2,59 | 0,214 | 0,364 | 0,735 | 394,2 | 3,88 | 0,86 | d=640<br>h= 1260 |

В качестве удобных для размещения в резервуаре геометрических размеров одной пластины выбраны следующие значения параметров: длина $L_э$ = 150 мм, ширина (высота) $H_э$ = 135 мм. Ширина блока электродов (без учета толщины гаек) составит 214 мм (толщина пластин + промежутки между ними). Габаритные размеры электродов представлены на рис. 2.

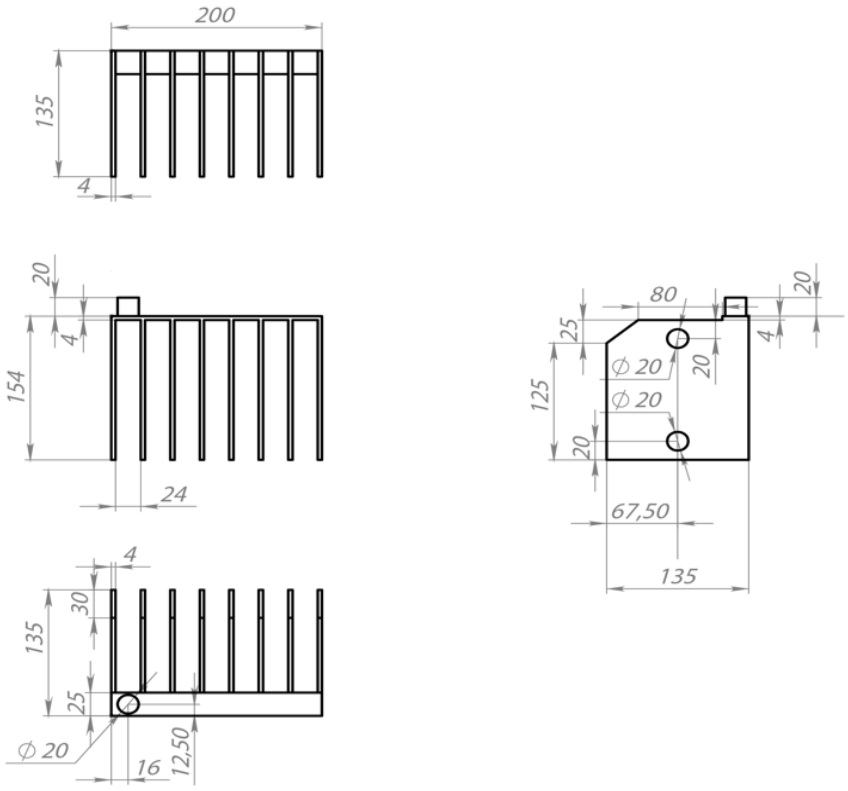


**Рис. 2**. Размеры анода и габариты пакета электродов в сборе
**Fig. 2.** Dimensions of the anode and the dimensions of the assembled electrode package

На основании расчетов, представленных выше, предложен вариант установки с интеллектуальной системой автоматизации и управления процессами водоочистки. Соответствующая 3D модель представлена на рис. 3.

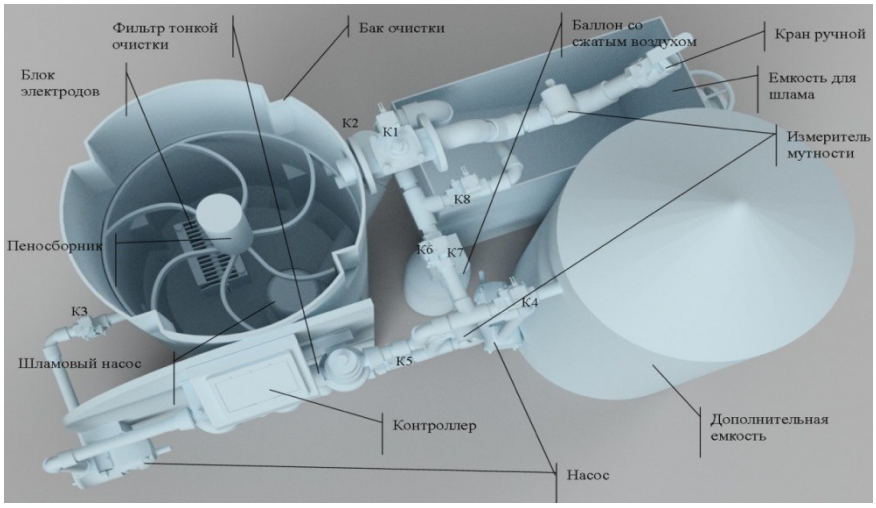


**Рис. 3**. Общий вид установки водоочистки с интеллектуальной системой автоматизации и управления процессами водоочистки (3D модель).
К1 – клапан входа; К2 – клапан сброса; К3 – клапан выхода; К4 – клапан выхода;
К5 – клапан промывки фильтра; К6 – клапан сброса;
К7 – клапан впуска сжатого воздуха; К8 – клапан слива промывочной воды
**Fig. 3**. General view of the water treatment unit with an intelligent automation and control system for water treatment processes (3D model)
K1 – inlet valve; K2 – discharge valve; K3 – outlet valve; K4 – outlet valve;
K5 – filter wash valve; K6 – discharge valve;
K7 – compressed air inlet valve; K8 – wash water drain valve

Основные характеристики установки:

– производительность: 360 л/сут;

– габариты: 830 х 420 х 220 мм;

– масса (без воды): 36 кг;

– межпромывочный ресурс фильтра 2400 л.

Контроль и оценка качества воды происходит по показателю мутности. На первом этапе с помощью измерителя мутности ИМ1 определяется исходное качество воды. В зависимости от измеренного значения мутности интеллектуальная система подбирает режим водоочистки: время очистки и напряженность. Далее исходная вода через клапан входа (К1) заливается в реактор, после окончания процесса в баке очистки вода через клапан выхода (К3) с помощью насоса перекачивается через фильтр тонкой очистки, на выходе из фильтра происходит измерение мутности, если показатель мутности соответствует нормативам, то вода через клапан выхода (К4) поступает в дополнительную емкость. Если измеренное значение мутности не соответствует нормативам, вода возвращается через клапан К6 в реактор на доочистку, либо сливается через клапан К8 в сброс шлама и промывочной воды. Отбор очищенной воды производится через сливной кран. Принятие решения о проведении повторной обработки или слива обработанной воды в шлам принимает интеллектуальная система, которая собирает и аккумулирует данные о параметрах исходной воды, режиме и времени работы, параметрах очищенной воды и других показателей.

Также предполагается режим очистки фильтра с помощью клапана промывки фильтра К5 и клапана впуска сжатого воздуха К7, промывочная вода через клапан К8 сливается в «сброс шлама».

Осадок (шлам), образованный в результате электрокоагуляционной обработки воды, может быть удален в систему канализации.

Разработанная автоматизированная установка обеспечивает адаптивную настройку режима очистки в зависимости от исходного качества воды. Данная

особенность позволяет повысить эффективность процесса электрокоагуляции за счёт оптимального выбора времени обработки и интенсивности действия, что обеспечивает достижение нормативных показателей мутности при минимальных энергозатратах и ресурсах [7].

Применение контроля качества воды с использованием двух измерителей мутности (на входе и после фильтра тонкой очистки) в сочетании с системой возврата или сброса воды повышает надёжность и безопасность работы установки. Интеллектуальная система аккумулирует данные о процессах и параметрах, что позволяет проводить анализ эксплуатационных характеристик и своевременно корректировать режимы очистки, обеспечивая устойчивое качество выходной воды.

Компактные габариты и сравнительно низкая масса установки делают её особенно подходящей для эксплуатации на небольших и автономных объектах, где важны мобильность и простота обслуживания. Встроенный режим промывки фильтра с подачей сжатого воздуха способствует поддержанию производительности и долговечности оборудования без значительных дополнительных затрат труда.

Предложенное решение, сочетая в себе технологию электрокоагуляции и современные методы автоматизации и управления процессами, относится к актуальному и востребованному направлению в области водоочистки. Установка обладает потенциалом широкого практического применения в коммунальном, промышленном и сельскохозяйственном секторах, способствуя снижению потребления химических реагентов, уменьшению трудозатрат на обслуживание и повышению качества очищаемой воды.

**Заключение.** Результаты анализа процессов водоочистки и проведенных экспериментов позволяют заключить, что с помощью внедрения интеллектуальной системы автоматизации возможно оптимизировать электропотребление, уменьшить стоимость очистки воды, снизить временные и трудовые затраты на обслуживание установки на 15–20%.

Предложенная схема автоматизации и управления процессами водоочистки установки водоочистки позволит сократить время обработки воды, увеличить удобство использования установки, а также обеспечить адаптацию под требования и задачи клиентов, что, в свою очередь, будет способствовать повышению конкурентоспособности на рынке водоочистного оборудования.

С целью дальнейшего усовершенствования разработанной установки возможна реализация предиктивной аналитики на основе анализа накопленных данных, что позволит предсказывать необходимость коррекции режимов очистки, оптимизировать расход электроэнергии и эксплуатационные параметры в режиме реального времени.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Смирнова В.О., Жильникова Н.А.* Разработка малогабаритных установок водоочистки методом электрообработки с применением интеллектуальных систем управления // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: V Междунар. форум: сб. ст. / под ред. академика РАН В.В. Окрепилова. СПб.: ГУАП. 2023. С. 138–140.

2. *Липовецкий Я.М., Раппопорт Я.Д.* Электрохимические способы очистки питьевых и сточных вод. М.: ЦБНТИ Минжилкомхоза РСФСР. 1985. 53 с.

3. *Пазенко Т.Я., Халтурина Т.И., Мурашов И.М.* Очистка маслоэмульсионных сточных вод методом электрообработки // Журнал прикладной химии. 1982. Т. 55. № 4. С. 935–940.

4. *Лисин С.Ю., Дмитриев Е.А.* Математическое моделирование процесса электрофлотации с применением стохастического подхода // Успехи в химии и химической технологии. 2007. Т. 21. № 2(70). С. 91–93.

5. *Eugenia P. Ramirez*. Automated electrocoagulation system for wastewater treatment // Electrical & Computer Engineering: An International Journal (ECIJ). Vol. 2, No. 4, December 2013.

6. *Жильникова Н.А.*, *Смирнова В.О., Березина А.А.* // Модели процессов водоочистки методами электрообработки // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: сб. тез. докл. III Междунар. форума. СПб.: ГУАП. 2023. С. 139–142.

7. Жильникова Н.А., Смирнова А.С., Заруцкий И.В., Смирнова В.О., Мателенок И.В., Березина А.А. Установка водоочистки: патент на изобретение РФ № 2842624. Заявитель ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения». Опубл. 01.07.2025. Бюл. № 19.

## ELECTROCOAGULATION WATER PURIFICATION: APPROACHES TO AUTOMATION AND MODELING OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS

**V.O. Smirnova, I.V. Matelenok**

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
RF, Saint Petersburg, Bolshaya Morskaya St., 67
*E-mail: vlada_sm@mail.ru*

The work focuses on the urgent task of developing and modeling automated control systems to improve the efficiency of water treatment processes. An analysis of the current state of electrochemical water purification technologies and units available on the market has been carried out, which showed an insufficient level of their automation. The choice of the electrocoagulation method as one of the most universal was justified. Based on a series of laboratory experiments, key parameters and process stages requiring automatic control were determined. An option for technical implementation of the water treatment unit involving integration of the intelligent control system providing adaptive actuator control based on signals from turbidity sensors was proposed. An equipment spatial arrangement scheme considering the requirements to accessibility to modules for maintenance and compactness to fit tight spaces was selected. The scheme was implemented in a digital three-dimensional model of the unit. Based on the calculations of the electrocoagulator parameters, the design of the electrode block and the skimmer cup for installation in a cylindrical tank was developed. The scheme of the unit operation in treatment and backwashing modes was described. It was shown that the implementation of the proposed system allows reducing labor costs for equipment maintenance by 15–20%.

**Keywords:** electrocoagulation, water treatment, automated systems, automated control systems, modeling

## REFERENCES

1. *Smirnova V.O. and Zhilnikova N.A.* Razrabotka malogabaritnyh ustanovok vodoochistki metodom jelektroobrabotki s primeneniem intellektual'nyh sistem upravlenija (Development of small-scale water purification unit by electric processing using intelligent control systems), Metrologicheskoe obespechenie innovacionnyh tehnologij: V Mezhdunar. forum: sb. st. / pod red. akademika RAN V.V. Okrepilova (Metrological support of innovative technologies: V Intern. forum: Sat. Art. / Ed. Academician of RAS V.V. Okrepilov), Saint-Petersburg: SUAI, 2023, pp. 138–140.

2. *Lipoveckij Ja.M. and Ja. D. Rappoport.* Jelektrohimicheskie sposoby ochistki pit'evyh i stochnyh vod (Electrochemical methods for purification of drinking and waste water), Moscow: CBNTI Minzhilkomhoza RSFSR, 1985, 53 p.

3. *Pazenko T.Ja., Halturina T. I. and Murashov I. M.* Ochistka maslojemul'sionnyh stochnyh vod metodom jelektroobrabotki (Purification of oil emulsion wastewater by electrical treatment). *Zhurnal prikladnoj himii,* 1982. Vol. 55. No. 4, pp. 935–940.

4. *Lisin S.Ju. and Dmitriev E. A.* Matematicheskoe modelirovanie processa jelektroflotacii s primeneniem stohasticheskogo podhoda (Mathematical modeling of the electroflotation process using a stochastic approach). *Uspehi v himii i himicheskoj tehnologii,* 2007, Vol. 21, No. 2(70), pp. 91–93.

5. *Eugenia P. Ramirez*. Automated electrocoagulation system for wastewater treatment. *Electrical & Computer Engineering: An International Journal (ECIJ),* Vol. 2, No. 4, December 2013.

6. *Zhilnikova N.A., Smirnova V.O., and Berezina A.A*. Modeli processov vodoochistki metodami jelektroobrabotki (Methods and models of hydrosocial indicators assessment for water management). Matematicheskie metody i modeli v vysokotehnologichnom proizvodstve: sb. tez. dokl. III Mezhdunar. Foruma (Mathematical methods and models in high-tech production: collection of reports of Int. forum), Saint-Petersburg: SUAI, 2023, pp. 139–142.

7. *Zhilnikova N.A., Smirnova A S., Zaruckij I.V., Smirnova V.O, Matelenok I.V., and Berezina A.A.* Ustanovka vodoochistki (Water purification plant): Russian Federation patent for invention № 2842624. Opubl. 01.07.2025.