

Научная статья

УДК 628.34; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-177-191

## **АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД РЫБОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ЗАВОДА**

✉ **Силинский Виктор Алексеевич.**

**Вологодский государственный университет, г. Вологда, Россия.**

**Соколов Леонид Иванович.**

**Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе,  
Москва, Россия**

✉ [viktor.silinsky@yandex.ru](mailto:viktor.silinsky@yandex.ru)

*Аннотация.* Составлено «дерево анализа неисправностей» технологии электрофлотационной очистки сточных вод рыбоперерабатывающего комбината, обеспечивающее создание логической схемы безопасности всего процесса обработки воды. Установлена численная вероятность возникновения случайных опасностей, событий и аварийных ситуаций, которые приводят к нарушению эксплуатационных и функциональных параметров конкретных узлов и частей электрофлотационной установки. Обоснована методика установления и расчета ликвидируемого эколого-экономического ущерба от загрязнения водных объектов по показателю химической потребности в кислороде. Представлен вероятностный подход к оценке рисков. Спрогнозированы вероятности неблагоприятных событий для окружающей среды при использовании электрохимической очистки сточных вод рыбоперерабатывающего завода. Выявлены факторы, оказывающие негативное влияние на эффективность электрофлотационной очистки сточных вод от рыбопереработки. Проведена оценка эффективности обеззараживающего воздействия на очищенные сточные воды хлорсодержащего реагента, полученного электролитическим способом из артезианских вод с высокой минерализацией.

*Ключевые слова:* стоки от рыбопереработки, химическая потребность в кислороде, электрофлотация, «дерево анализа неисправностей», оценка рисков, вероятность, количественный метод, анализ

**Для цитирования:** Силинский В.А., Соколов Л.И. Анализ безопасности процесса электрофлотационной очистки сточных вод рыбоперерабатывающего завода // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 2 (74). С. 177–191. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-177-191.

Scientific article

## **SAFETY ANALYSIS OF ELECTROFLOTATION WASTEWATER TREATMENT AT A FISH PROCESSING PLANT**

✉ **Silinskiy Victor A.**

**Vologda state university, Vologda, Russia.**

**Sokolov Leonid I.**

**Russian state geological exploration university named after Sergo Ordzhonikidze, Moscow, Russia**

✉ [viktor.silinsky@yandex.ru](mailto:viktor.silinsky@yandex.ru)

*Abstract.* A «fault analysis tree» has been compiled for the technology of electroflotation wastewater treatment at a fish processing plant, which ensures the creation of a logical safety scheme for the entire water treatment process. The numerical probability of occurrence of accidental hazards, events and emergency situations that lead to disruption of the operational and functional parameters of specific components and parts of an electroflotation installation has been established. The method

of establishing and calculating the eliminated ecological and economic damage from pollution of water bodies based on the indicator of chemical oxygen demand is substantiated. A probabilistic approach to risk assessment has been implemented. The probabilities of adverse events for the environment when using electrochemical wastewater treatment at a fish processing plant are predicted. The factors that have a negative impact on the efficiency of electroflotation wastewater treatment from fish processing have been identified. The effectiveness of the disinfection effect on treated wastewater with a chlorine-containing reagent obtained electrolytically from artesian waters with high mineralization has been evaluated.

**Keywords:** fish processing effluents, chemical oxygen demand, electroflotation, «fault analysis tree», risk assessment, probability, quantitative method, analysis

**For citation:** Silinskiy V.A., Sokolov L.I. Safety analysis of electroflotation wastewater treatment at a fish processing plant // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 2 (74). P. 177–191. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-177-191.

## Введение

В результате процесса рыбопереработки образуются сточные воды, требующие очистки. Наибольший расход сточных вод образуется при разгрузке рыбы, работе оборудования для промывки, транспортировки требухи и в результате уборки помещений. Сточные воды, которые образуются на предприятиях пищевой, в частности рыбоперерабатывающей промышленности, имеют определенный химический состав, зависящий от вида и технологии перерабатываемого сырья. К проблемам, связанным с загрязнителями сточных вод, относятся: содержание взвешенных веществ, масел, жиров, аммиака, моющих средств, поверхностно-активных веществ (ПАВ) и высокие концентрации органических веществ. Наличие в воде токсичных органических веществ характеризуется показателем химической потребности в кислороде (ХПК).

Схема очистки сточных вод предприятия рыбоперерабатывающей промышленности включает решетки, отстойники (декантаторы или осветлители – перегниватели), флотаторы (напорные, импеллерные, электрофлотаторы). Особую проблему на рыбоперерабатывающих заводах вызывает очистка и дальнейшая регенерация тузлуков – отработанных солевых растворов после процесса засолки рыбы и икры. При посоле рыбы и икры используют концентрированные ( $140\text{--}160\text{ г/дм}^3$ ) растворы хлорида натрия. Загрязнение белками, жирами ( $43\text{--}55\text{ 000 мг/дм}^3$ ) и азотистыми соединениями ( $29\text{--}500\text{ мг/дм}^3$  по аммонийному азоту) делает их непригодными для многократного использования. Учитывая высокое содержание в них соли, рекомендуется применять электролитические способы очистки (электрофлотацию и электрокоагуляцию). В табл. 1 приведены достоинства и недостатки процесса электрофлотации сточной воды. Электролитические методы очистки стоков обладают следующими преимуществами по сравнению с другими способами очистки сточных вод: более высокая степень очистки; простота эксплуатации и обслуживания; отсутствие реагентов; возможность создания систем повторного использования воды. Также интерес к данной проблеме проявляют такие страны, как Китай, Индия, США и другие страны, где исследуются полномасштабные электрофлотационные установки и демонстрируются технологические достижения, потенциальные возможности, а также перспективное развитие и совершенствование процессов электрофлотации для очистки сточных вод [1–3]. Современные исследования электрофлотационной очистки сточных вод направлены на совершенствование процессов электрофлотации, на разработку материалов и устройств электродов с длительным сроком службы, конструкций реакторов, влияющих на технологические параметры и кинетику процессов, на установление численной вероятности возникновения случайных опасностей, событий и аварийных ситуаций, которые приводят к нарушению эксплуатационных и функциональных параметров конкретных узлов и частей электрофлотационных установок. Оценке вопросов безопасности электрофлотационных процессов при очистке сточных вод, а также анализу эффективности безаварийной работы электрофлотаторов посвящен ряд зарубежных исследований [4–6].

Таблица 1

**Достоинства и недостатки электрофлотации**

Достоинства	Недостатки
1. Очистка сточных вод до требований предельно-допустимых концентраций в водном объекте. 2. Незначительный расход реагентов или их неприменимость. 3. Простота эксплуатации. 4. Малые площади, занимаемые электролитическим оборудованием. 5. Высокая сочетаемость с другими методами. 6. Отсутствие вторичного загрязнения	1. Высокие энергозатраты. 2. Аноды из дефицитного материала.

При реализации процессов очистки возникают аварийные ситуации, отказы в работе электрофлотаторов, что не позволяет составить качественное представление об их безопасности для окружающей среды. Основная идея данной работы состоит в обеспечении безопасности, а именно, в предупреждении, предотвращении и устранении отказов из-за случайных событий при эксплуатации электрофлотационных установок в соответствии с функциональными возможностями и установленными требованиями. Выбор процесса очистки сточных вод в значительной мере зависит от многих параметров, в частности факторов, мешающих проведению процесса очистки сточных вод: содержание в очищаемой воде веществ, разрушающих пену; высокая концентрация органических соединений; наличие ПАВ, обладающих солубилизирующей способностью и экранирующих заряды мицелл; коллоидная форма соединений; большое количество клееподобных продуктов (крахмал, топиоковая мука).

Основной целью анализа надежности, риска и безопасности работы электрофлотаторов является уменьшение вероятности аварий при эксплуатации в процессе очистки сточных вод и связанных с ними экологических нарушений, что и определило актуальность данной работы.

Для обеспечения надежности систем электрофлотационной очистки необходимо учитывать множество факторов на всех этапах их жизненного цикла. Использование качественных материалов при изготовлении электрофлотаторов и соблюдение технологических норм при эксплуатации гарантируют долговечность системы. Эксплуатация системы электрофлотационной очистки требует правильной организации обслуживания, регулярного профилактического ремонта и высокой квалификации обслуживающего персонала [7–10]. Все эти меры направлены на минимизацию рисков и обеспечение стабильной работы системы. Повышение надежности системы, безусловно, влечет за собой увеличение материальных затрат. Однако, учитывая возможные последствия отказов, такие затраты вполне оправданы [11]. Расходы на повышение надежности системы электрофлотационной очистки окупаются снижением материального и экологического ущерба. Если по какой-либо причине снижение производительности выходит за допустимые пределы, происходит отказ системы. Прямое влияние на снижение производительности системы оказывает неисправность или сбой питания (в результате аварии в энергосистеме). Такие события могут привести к отказу всей системы. Таким образом, реальная система очистки сточных вод существует в следующих основных состояниях: полная работоспособность – система способна обеспечивать выполнение задач по очистке сточных вод в соответствии с установленными проектными требованиями и нормами; неполная работоспособность – система может выполнять свои функции на более низком уровне по сравнению с нормальным проектным уровнем в соответствии с наилучшей доступной технологией очистки, но не ниже допустимых пределов, установленных нормами (предельно допустимая концентрация, нормативный допустимый сброс, технические стандарты); неработоспособность (неисправность) – система не способна выполнять функцию очистки воды на приемлемом уровне.

Функциональные процессы системы очистки воды можно оценить по показателям качества и по эффективности ее функционирования. В качестве показателя эффективности системы используется «эффект очистки на выходе (конец трубы)», то есть результаты, достигнутые в ходе эксплуатации электрофлотатора за определенный промежуток времени. Все системы очистки сточных вод являются системами длительного действия [12–16].

Опасности в системах очистки сточных вод часто вызываются сочетанием сразу нескольких типов отказов: отказами оборудования, ошибками персонала, чрезвычайными ситуациями и стихийными бедствиями. Аварийные ситуации при эксплуатации электрофлотаторов могут быть вызваны проблемами с запорно-регулирующей арматурой и нарушением постоянства энергообеспечения установок. В меньшей мере на аварийность электрофлотаторов влияют их базовые детали: корпуса, крышки, стойки, система газоудаления. Они массивны, неподвижны и обычно выполняют свое назначение в течение всего срока эксплуатации. Классификация аварийных ситуаций по условиям их возникновения и признакам проявления отказов представлена в табл. 2.

Таблица 2

### Признаки проявления и виды отказа в работе электрофлотационной установки

Признак проявления отказа	Вид и характер отказа	Факторы
Характер изменения во времени критерия отказа	Внезапный	Отключение энергии, отказ электродной системы, электрооборудования, пробой обмотки статора
	Постепенный	Коррозия дозаторов, запорно-регулирующей арматуры, появление осадка на поверхности катодов, разбалансировка
Связь с другими отказами	Зависимый	Разрушение арматуры, повреждение электродов, износ деталей электродной системы
	Независимый	Внешние факторы носят случайный характер
Время возникновения	Прирабочный (период приработки, пусконаладочных испытаний)	Несовершенство отдельных конструктивных элементов осадки, течь уплотнительных манжет, пробой обмотки статора
	Мгновенный (период нормальной эксплуатации)	В промежутках между плано-предупредительными ремонтами
	Износный (период износа и старения)	Вибрации, разбалансировка, интенсивный износ
Причина возникновения	Конструкционный	Брак конструктивных элементов корпуса, стойки, системы газоудаления
	Технологический	Неравномерный расход сточных вод, изменение pH в процессе очистки
	Эксплуатационный	Износ соприкасающихся поверхностей, возможная вибрация, коррозия, разбалансировка изменение сопротивления обмотки

Выявленные виды отказов (табл. 2) электрофлотаторов позволяют составить лишь качественное представление о его аварийности. Количественная оценка бесперебойности работы электрофлотатора возможна, когда известны вероятностные показатели надежности оборудования (приведена ниже в разделе «Результаты исследования и их обсуждение»).

Основная идея данной работы состоит в предупреждении, предотвращении и устранении отказов из-за случайных событий при эксплуатации электрофлотационной установки в соответствии с функциональными возможностями и установленными требованиями, что обеспечивается анализом современного состояния вопроса, сбором, изучением и обработкой производственных данных о работе действующих систем и сооружений очистки, в частности сооружений электрохимической очистки стоков (электрокоагуляторов, электрофлотаторов).

Показателем надежности электрохимической водоочистной системы является вероятность ее безотказной работы. Например, в течение 12 мес. эксплуатации электрофлотатора не происходят аварийные ситуации и отказы в работе.

Оценка надежности объекта носит вероятностный характер. Основываясь на опыте эксплуатации аналогичных конструкций, можно определить вероятность периода (срока) безотказной работы, среднюю вероятность наступления отказа за определенный период времени и другие показатели, имеющие значение для оценки надежности. Числовые показатели вероятности случайных событий измеряются в долях единицы или процентах. Вероятность, равная 1, характеризует надежное событие, то есть событие, которое обязательно произойдет. Вероятность безотказной работы объекта за определенный период времени и вероятность отказа этого объекта (за тот же период времени) – это противоположные события, сумма которых равна единице. Очевидно, что надежность объекта тем выше, чем больше вероятность его безотказной работы и меньше вероятность его отказа.

Цель работы: определить вероятности возникновения опасностей, аварийных ситуаций и неблагоприятных событий для окружающей среды и человека при использовании электрохимической очистки сточных вод рыбоперерабатывающего завода, а также выявить факторы, мешающие процессу очистки и его безопасности.

Научная новизна:

- предложен вероятностный подход к оценке неблагоприятных событий для процесса электрофлотационной очистки сточных вод на рыбоперерабатывающих предприятиях с наиболее высоким индексом потенциальной опасности;

- разработан новый безопасный способ электрохимической очистки сточных вод. Установлено, что подземные воды с минерализацией выше  $20 \text{ г/дм}^3$  при смешивании со сточными водами рыбоперерабатывающего производства в электрофлотаторе последовательно играют сначала коагулирующую роль, а затем выполняют функцию обеззараживающего агента;

- обоснована методика расчета предотвращенного (ликвидируемого) эколого-экономического ущерба от загрязнения водных объектов по показателю ХПК при реализации технологии очистки сточных вод предприятий рыбоперерабатывающей промышленности.

### **Материалы и методы исследования**

Методы: сравнение, анализ, сопоставление, статистический метод и метод экспертных оценок. Для определения уровня технического риска сброса сточных вод в поверхностные воды был применен метод стоимостного расчетного анализа. Продолжительность электролитической флотации составляет 60–90 мин. В качестве анода использовались электроды на основе рутения и оксида титана, а в качестве катода в электролитическом флотаторе – сталь ORTA. Схема процесса очистки сточных вод в эксперименте следующая: механическое отделение взвешенных частиц (отстаивание в отстойнике-седиментаторе), смешивание с флокулянтами, флокуляция и электролитическая очистка сточных вод в электролитическом флотаторе. В качестве флокулянта использовалась минерализованная подземная вода Вологодской обл. с содержанием хлоридов  $20 \text{ г/дм}^3$  при объемной концентрации 20 % от объема стоков.

Известно, что при проведении электролиза природных хлоридных растворов в анодной области образуется гипохлорит натрия  $\text{NaClO}$ , который быстро дезинфицирует очищаемую воду. Гипохлорит натрия обладает дезинфицирующими свойствами (убивает бактерии, водоросли и грибки) и окислительными по отношению к органическим и неорганическим примесям. Дополнительные дезинфицирующие средства не использовались, что следует признать экономически эффективным.

В качестве лабораторной установки использовался статический электрофлотатор с горизонтальными электродами объемом  $0,003 \text{ м}^3$ . Катод был изготовлен из стальной проволоки диаметром  $0,8 \text{ мм}$ , а площадь сетки ОРТА составляла  $220 \text{ мм}^2$ , расстояние между электродами до  $10 \text{ см}$ . Процесс проводился при напряжении на электродах  $12 \text{ В}$ , плотности тока  $40\text{--}50 \text{ А/м}^2$  и продолжительности включения  $60\text{--}90 \text{ мин}$ . Степень очистки сточных вод проверяли по значению показателя ХПК (ПНД Ф 14.1:2:3.100–97).

Лабораторные эксперименты проводились в лабораторных условиях на модельной установке, включающей три пятилитровых емкости для проведения последовательного (поэтапного) процесса очистки сточных вод. Схема проведения эксперимента представлена на рисунке.

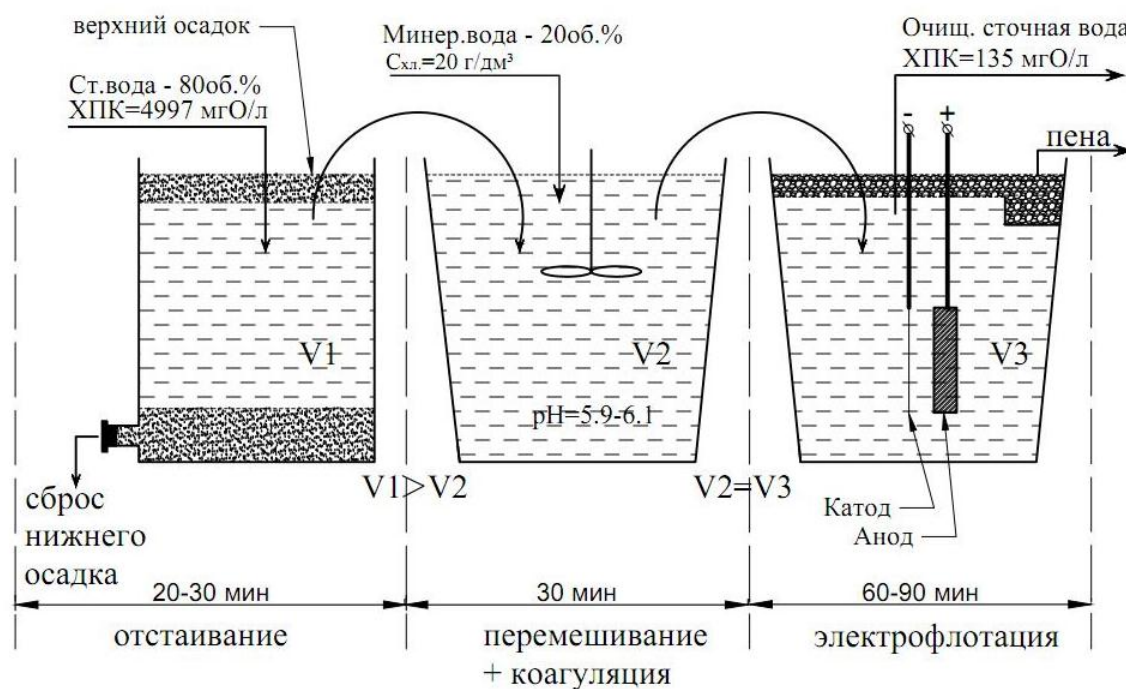


Рис. Схема проведения эксперимента

Для проведения эксперимента было взято  $3 \text{ дм}^3$  (V1) сточных вод с ХПК =  $4\,997 \text{ мг/дм}^3$  рыбоперерабатывающего предприятия – происходило отстаивание в течение 30 мин. Отстоявшуюся сточную воду смешивали с 600 мл минерализованной воды (концентрация хлоридов  $20 \text{ г/дм}^3$ ) – происходил процесс коагуляции. Через 30 мин после коагуляции сточные воды подвергали электрофлотации. V1 больше V2, а V2 больше V3, так как образующиеся осадки и пена обводнены, и при их удалении теряются объемы обрабатываемой сточной воды на каждом этапе, кроме второго, где происходит перемешивание и коагуляция стока. Значения химической потребности в кислороде измерялись дважды: через 30 мин после коагуляции и через 90 мин после начала эксперимента (после электрофлотации). Значения ХПК измерялись в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:3.100–97. ХПК стока до начала эксперимента составлял  $4\,997 \text{ мг/дм}^3$ , после 90 мин обработки его значение снизилось до  $135 \text{ мг/дм}^3$ . Эффективность очистки по ХПК составила 97,3 % [7, 8]. Остаточное содержание хлоридов в очищенном стоке достигало  $500 \text{ мг/дм}^3$ . Эффективность очистки по хлоридам – 97,5 %. Для сравнения в лабораторных условиях был получен результат ультрафильтрационной очистки стока с идентичными показателями на входе. Эффективность очистки ультрафильтрацией по ХПК составила 98 %, по хлоридам – 0 %.

## Результаты исследования и их обсуждение

В результате эксплуатации электрофлотационной установки в ее работе возможны сбои, случайные остановки, снижение эффективности электродных процессов, а значит снижение эффективности очистки. Поэтому требуется оценка эксплуатационной и функциональной опасности действующего при проведении процесса электрофлотации оборудования. Схема расчета («дерево анализа неисправностей») для рассматриваемой схемы очистных сооружений рыбоперерабатывающего завода рассматривалась для элементов, имеющих высокое значение индекса потенциальной опасности, рассчитываемого по формуле:

$$I = C \cdot \frac{Q/Q_{\text{пор}}}{(R/100)^{\beta}},$$

где  $C$  – поправочный коэффициент, учитывающий отклонение от стандартных условий,  $C = 1$ ;  $R$  – расстояние между установкой и человеком, м, принимаем равным 1;  $\beta$  – показатель уменьшения воздействия вредоносных факторов в зависимости от расстояния, принимаем равным 1;  $Q, Q_{\text{пор}}$  – масса вещества в установке и его пороговое значение, т.

Индекс потенциальной опасности определялся по формуле:

$$I = \frac{Q}{Q_{\text{пор}}}.$$

Установка электрокоагуляции, содержащая несколько веществ, находящихся в технологическом процессе, индекс потенциальной опасности определяется суммой индексов этих веществ:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i. \quad (1)$$

Установим остаточное количество загрязнителей после электрофлотации. При коагуляции в электрофлотаторе основным окислителем является активный хлор, обеспечивающий эффективность процесса очистки. В электрофлотаторе при плотности тока  $50 \text{ А/м}^2$  и концентрации хлоридного раствора  $20 \text{ г/дм}^3$  образовывалось  $6,3 \text{ г/дм}^3$  активного хлора.

Расчет объема водорода, образующегося в электролизере на катодах в течение одного часа, определяли по формуле:

$$W_H = \frac{B_T^H \cdot A_3^H \cdot I \cdot 273 + T_3}{273} (\text{м}^3/\text{ч}), \quad (2)$$

где  $B_T^H$  – катодный выход водорода по току, равный  $0,9\text{--}0,95$ , принимаем  $0,95$ ;  $A_3^H$  – эквивалент объемного содержания водорода, равный  $0,00042 \text{ м}^3/(\text{А}\cdot\text{ч})$ ;  $I$  – сила тока, А, ( $I = 1600 \text{ А}$ );  $T_3$  – среднестатистическая температура обрабатываемого вещества, °С,  $T = 10 \text{ °С}$ .

Подставив данные в формулу (1), получаем:

$$W_H = 0,662 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Таким образом, при переработке каждые  $5 \text{ м}^3$  сточных вод образуется  $0,662 \text{ м}^3$  водорода, следовательно, в электрофлотаторе может содержаться:

$$Q_H = \frac{W_H \cdot V \cdot \rho_H}{5} (\text{г}),$$

где  $V$  – объем электрофлотатора (габаритные размеры:  $100 \times 100 \times 300 \text{ мм}$ ), равный  $0,003 \text{ м}^3$ ;  $\rho_H$  – плотность водорода равная  $89,29 \text{ г/м}^3$ .

Подставив полученные данные в формулу (2), найдем количество водорода в электрофлотаторе:

$$Q_H = \frac{0,662 \cdot 0,003 \cdot 89,29}{5} = 0,18 \text{ г.}$$

Кроме того, в стоке, на выходе из флотатора регистрируется остаточные концентрации активного хлора – 140 мг/дм<sup>3</sup>, хлориды – 500 мг/дм<sup>3</sup>, ХПК – 135 мг/дм<sup>3</sup>.

По результатам проведенных исследований установлена степень очистки сточных вод – 97,5 %. Очищенная вода пригодна для промышленного применения.

Эффективность дезинфекции оценивалась по микробиологическим показателям: ОМЧ (общее микробное число) и ОКБ (содержание общих колиформных бактерий). Результаты микробиологических исследований исходной воды и сточных вод после обработки хлорсодержащим реагентом, содержащим гипохлорит и хлорноватистую кислоту, представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты микробиологических исследований исходной и после обработки хлорсодержащим реагентом, полученным из подземной минерализованной воды, сточной воды рыбоперерабатывающего завода (доля подземной воды по отношению к сточным водам составляет 20 об.%)**

№ п/п	ОМЧ (КОЕ/100 мл)	ОКБ (КОЕ/100 мл)
1 – исх. сточная вода	Сплошной рост	10 400
2 – ст. вода после 30 мин обработки	48	1 500
3 – ст. вода после 60 мин обработки	26	340
4 – ст. вода после 90 мин обработки	7	35

Технический результат зависит от времени взаимодействия коагулянта (минерализованной подземной воды) и стоков рыбоперерабатывающей промышленности в электрофлотаторе и их объемного соотношения. Использование подземных вод в качестве коагулянта дает дополнительные преимущества. Процессы очистки с использованием таких коагулянтов не вносят новых загрязнений, например таких, которые присутствуют в морской воде, что создает благоприятные условия для очистки сточных вод. Кроме того, качество морской воды переменчиво по сезонам, подземная же вода стабильна по качеству и отличается постоянством состава.

При электрофлотации в пену уходит белковый продукт сточных вод, который может быть утилизирован, а при необходимости обработан, рециклирован и повторно использован.

**Расчет вероятностей неблагоприятных событий для схемы очистки сточных вод рыбоперерабатывающего завода электрофлотацией**

Вероятность риска оценивалась путем определения вероятности (в виде долей) того, что во время сброса сточных вод рыбоперерабатывающих предприятий произойдет событие, которое может нанести ущерб водным ресурсам. Величина риска рассчитана в результате умножения вероятности на числовое выражение последствий и приведена ниже по результатам исследований. Сначала был сформулирован перечень всех возможных рисков и проведена их идентификация. Для наиболее вероятных и значимых рисков был предусмотрен план противодействия и определен перечень необходимым резервов, включая финансовые резервы на случай проблем. Для своевременного контроля необходим регулярный мониторинг внутренней и внешней среды с целью выявления рисков и ситуаций, приводящих



к их возникновению. Работа с рисками в отношении электрофлотационной очистки сточных вод – это задача менеджмента на очистных сооружениях предприятия.

Для определения вероятности возникновения неблагоприятного события при очистке сточных вод рыбоперерабатывающего завода в электрофлотаторе использовался метод «дерева анализа неисправностей», обеспечивающий создание логической схемы безопасности всего процесса обработки сточной воды (табл. 4).

Таблица 4

**Вероятностный подход к оценке неблагоприятного события  
для процесса электрофлотационной очистки сточных вод**

Вероятности возникновения неблагоприятного события (вероятность события P)	Причины возникновения неблагоприятного события (вероятность события P)	Последствия неблагоприятного события (вероятность события P)
1. Снижение эффективности электродных процессов (P = 0,1265)	1.1. Плотность тока ниже регламентной (P = 0,0617)	1.1.1. Нарушение ППР (P = 0,0006)
		1.1.2. Перегрев масла в выпрямителе [5] (P = 0,0006)
		1.1.3. Ошибки при монтаже (P = 0,059)
		1.1.4. Короткое замыкание [6] (P = 0,0015)
	1.2. Разрушение поверхности электродов [6] (P = 0,0006)	
	1.3. Пассивация поверхности электродов (P = 0,0652)	1.3.1. Неверная установка тока электрооборудования (P = 0,0006)
		1.3.2. Неисправность электрооборудования (P = 0,0646)
2. Недостаточная концентрация активного хлора (P = 0,002637)	2.1. Наличие вводе примесей, снижающих выход активного хлора [7] (P = 0,0006)	
	2.2. Нарушение дозирования NaCl (P = 0,001437)	2.2.1. Неисправность дозирующего устройства [8] (P = 0,000237)
		2.2.2. Низкая концентрация дозируемого раствора [5] (P = 0,0006)
		2.2.3. Ошибка оператора (P = 0,0006)
	2.3. Несоблюдение pH [5] (P = 0,0006)	
3. Другие причины (P = 0,0006)		

Таким образом, снижение эффективности очистки может произойти с вероятностью P = 0,1297.

Ревизия электрофлотационной установки проводится один раз в 3–6 мес. вне зависимости от состояния и качества ее работы. При ревизии проверяется горизонтальность кромок и отверстий сборно-распределительных систем установки (+/- 4–5 мм), вертикальность поверхности электродов, загрязненность осадком поверхности катодов, наличие щелей у стенок установки. Осматриваются внутренние стенки, фиксируются отложения и их динамика, проверяется равномерность работы системы для удаления пены, состояние противокоррозионных покрытий, правильность показаний контрольно-измерительных приборов и плотность арматуры (вентилей, задвижек) и соединений труб. Плановые текущие ремонты проводятся два раза в год (табл. 5). После ревизии состояния установки ее внутренние элементы, неплотную арматуру, неисправные контрольно-измерительные приборы заменяют, выполняют перебивку сальников. Продолжительность ремонта 1–3 дня.

При неплановых аварийных ремонтах в первую очередь устраняются появившиеся повреждения, мешающие нормальной работе установки, заменяются дефектные арматура и контрольно-измерительные приборы.

При капитальных ремонтах, проводимых через 3–4 года, производится выемка электродной системы, в случае необходимости замена или промывка электродов водой, щелочью, кислотой или водой, насыщенной углекислотой, а также полная очистка внутренней поверхности установки от отложений и продуктов коррозии. При этом ремонтируются противокоррозионные покрытия, восстанавливаются или меняются прокорродировавшие детали. Проверяется плотность арматуры, заменяется дефектная. Установка окрашивается снаружи и, если нужно, изнутри. В конце каждого года составляются планы-графики ремонт электрофлотационной установки на следующий год.

Таблица 5

#### Продолжительность ревизий, текущих и капитальных ремонтов электрофлотационной установки

Оборудование	Продолжительность, сут		
	ревизии	текущего ремонта	капитального ремонта
Электрофлотатор	1–2	2–3	3–7
Распределители	0,5	–	1–2
Дозаторы	0,5	–	1–2
Насосы	1	2–3	5–7
Трубопроводы	1	–	3–7

#### Оценка уровня техногенного риска в стоимостном выражении

Наиболее простым методом оценки рисков с учетом вероятности является метод контент-анализа: определение вероятности возникновения риска и ущерба, связанного с его воздействием. Поэтому в первую очередь определим предотвращение экологического ущерба водным ресурсам как фактор обеспечения экологической безопасности при применении предлагаемой технологии очистки сточных вод на рыбоперерабатывающих предприятиях. Определим эколого-экономический ущерб от загрязнения водных ресурсов при применении предлагаемой технологии очистки сточных вод на рыбоперерабатывающих предприятиях по методике определения предотвращенного экологического ущерба с использованием показателя ХПК.

Предотвращенный экологический ущерб – это разница между ущербом, который мог бы быть нанесен по базовому варианту, и ущербом, рассчитанным по предлагаемому варианту очистки сточных вод:

$$Y = Y_6 - Y_{\text{п}}, \text{ усл. } \frac{\text{руб}}{\text{год}},$$

где  $Y_6$  – ущерб, установленный базовым значением, усл. руб./год;  $Y_{\text{п}}$  – рассчитанный ущерб последствий внедрения предлагаемой технологии очистки сточных вод по критерию ХПК, усл. руб./год.

Потенциальный ущерб от годичного выброса загрязняющих веществ, измеряемого по ХПК, в водный объект можно оценить с помощью формулы:

$$Y_{\text{п}} = 400 \cdot K_3 \cdot K \cdot M, \text{ усл. руб./год},$$

где 400 – среднее значение убытков, руб./усл.т;  $K_3$  – коэффициент экологической обстановки – для Вологодской обл. принимается 1,14;  $K$  – коэффициент индексации денежных средств (индексы разрабатываются ежегодно на основе сметно-нормативной базы: для очистных сооружений на 4-й квартал 2023 г. индекс составляет 12,77. Это указано в письме Минстроя

России от 28 ноября 2023 г. № 73528-ИФ/09;  $M$  – рассчитанная масса годового сброса по ХПК в водоем, усл. т/год, определяется по формуле:

$$M = A_{\text{ХПК}} \cdot M_{\text{ХПК, усл. т/год}},$$

где  $A_{\text{ХПК}}$  – показатель экологической опасности ХПК для водоема; усл.т/т;  $M_{\text{ХПК}}$  – общая масса годового сброса по ХПК, т/год.

Показатель экологической опасности для водоема определяется по формуле:

$$A_{\text{ХПК}} = \frac{1}{\text{ПДК}_{\text{ХПК}}}, \text{ усл. т/т},$$

где  $\text{ПДК}_{\text{ХПК}}$  – максимально допустимая концентрация ХПК в воде водных объектов класса Б составляет 80 мг/дм<sup>3</sup> (согласно приложению 2 к технологическим показателям наилучших доступных технологий в области очистки сточных вод – постановление Правительства Российской Федерации от 15 сентября 2020 г. № 1430).

Общий объем загрязнений, сбрасываемых ежегодно по показателю ХПК, рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{ПДК}_{\text{ХПК}} = C_{\text{ХПК}} \cdot Q, \text{ т/год},$$

где  $C_{\text{ХПК}}$  – значение ХПК в сточных водах, поступающих в водоем после очистки по предлагаемой технологической схеме, составляет 135 мг/дм<sup>3</sup>, т/м<sup>3</sup>;  $Q$  – годовой объем сброса сточных вод в водоем категории Б, м<sup>3</sup>/год (в данном случае 328 500 м<sup>3</sup>/год).

Выполним расчеты:

$$A_{\text{ХПК}} = \frac{1}{80} = 0,0125 \text{ усл. т/т};$$

$$Y_{\text{п}} = 400 \cdot 1,14 \cdot 12,77 \cdot 0,554 = 1788,3 \text{ руб/год}.$$

Ущерб по базовому варианту (без применения разработанной технологии) при первоначальном показателе ХПК= 4 997 мг/дм<sup>3</sup> определяется по формуле:

$$Y_{\text{б}} = 400 \cdot 1,14 \cdot 12,77 \cdot 20,55 = 119665,12 \text{ усл. руб/год}.$$

Эколого-экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии очистки сточных вод предприятий рыбоперерабатывающей отрасли (для рек категории Б), оцениваемый по показателю ХПК, позволит предотвратить значительный ущерб окружающей среде, который составит:

$$Y = 119665,12 - 1788,3 = 117876,82 \text{ усл. руб/год}.$$

В таком случае оценка техногенного риска в денежном эквиваленте будет следующей:

$$B = P_a \cdot Y_a + P_p \cdot Y_p,$$

где  $P_a$ ,  $P_p$  – вероятность возникновения инцидента, угрожающего очистным сооружениям, при аварийной ситуации и в процессе плановой эксплуатации электрофлотатора;  $Y_a$ ,  $Y_p$  – ущерб, вызванный инцидентом в аварийной обстановке, и ущерб на регулярное функционирование электрофлотатора.

Оценка техногенных рисков при очистке сточных вод рыбоперерабатывающего завода, требующего комплексного подхода, включающего технические, экологические и организационные меры, составит:

$$B = 0,1297 \cdot 119665,12 + 1 \cdot 1788,3 = 17308,87 \text{ тыс. руб. в год.}$$

Таким образом, установлена вероятность снижения эффективности работы электрофлотатора ( $P = 0,1297$ ), при этом уровень техногенного риска в стоимостном выражении составил 17308,87 тыс. руб. в год.

### Заключение

1. Выполнена классификация аварийных ситуаций, выявлены виды отказов в работе электрофлотаторов, что позволяет составить качественное представление об их аварийности, а значит и их безопасности при очистке сточных вод.

2. Предложен вероятностный подход к оценке неблагоприятных событий для процесса электрофлотационной очистки сточных вод на рыбоперерабатывающих предприятиях с наиболее высоким индексом потенциальной опасности.

3. Разработан новый безопасный способ электрохимической очистки сточных вод. По результатам исследования установлено, что подземные воды с минерализацией выше 20 г/дм<sup>3</sup> при смешивании со сточными водами рыбоперерабатывающего производства в электрофлотаторе последовательно играют сначала коагулирующую роль, а затем выполняют функцию обеззараживающего агента. Образующаяся в процессе электрофлотации пена содержит белковые вещества, которые можно утилизировать и перерабатывать по мере необходимости, а также использовать для производства кормов. Применение данной технологии позволило увеличить выход белковых продуктов на 15 % по сравнению с электроокислением на угольных анодах.

4. В процессе проведения исследования выполнена оценка уровня техногенного риска в стоимостном выражении, обоснована методика установления и расчета ликвидируемого эколого-экономического ущерба от загрязнения водных объектов по показателю химическая потребность в кислороде при реализации технологии очистки сточных вод предприятий рыбоперерабатывающей промышленности.

### Список источников

1. Kinetic study of slaughterhouse wastewater treatment by electrocoagulation using Fe electrodes / N. Yousefi [et al.] // *Water Science & Technology*. 2012. Vol. 66. № 4. P. 754–760. DOI: 10.2166/wst.2012.232.

2. Alam R., Shang J.Q., Khan A.H. Bubble size distribution in a laboratory-scale electroflotation study // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2017. Vol. 189. № 4. P. 191–205. DOI: 10.1007/s10661-017-5888-4.

3. Reduction of COD and TSS from paper industries wastewater using electro-coagulation and chemical coagulation / M. Al-Shannag [et al.] // *Separation Science and Technology*. 2012. Vol. 47. № 5. P. 700–708. DOI: 10.1080/01496395.2011.634474.

4. Mohtashami R., Shang J.Q. Electroflotation for Treatment of Industrial Wastewaters: A Focused Review // *Environmental Processes*. 2019. Vol. 6. № 2. P. 1–29. DOI: 10.1007/s40710-019-00348-z.

5. Вода техногенная: проблемы, технологии, ресурсная ценность / М. Шуленина [и др.]. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 402 с.

6. Boron removal from produced water using electrocoagulation / E.H. Ezechi [et al.] // *Process Safety and Environmental Protection*. 2014. № 92. P. 509–514.

7. Способ очистки сточных вод: пат. 2767943 Рос. Федерация, МПК C02F 1/465, C02F 1/467 / Л.И. Соколов, С.В. Колобова, В.А. Силинский; заявитель и патентообладатель Вологодский гос. ун-т; №: 2021114389; заявл. 21.05.2021; опубл. 22.03.2020, бюл. № 9.

8. Электрофлотация в процессах водоочистки и извлечения ценных компонентов из жидких техногенных отходов. Обзор / В.А. Колесников [и др.] // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51. № 4. С. 361–375.

9. Biomass from microalgae separation by electroflotation with iron and aluminum spiral electrodes / F. Baierle [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. 2015. Vol. 4. № 2. P. 274–281.

10. Бенин Д.М. Диагностика и надежность гидравлических систем в условиях городского хозяйства: монография. М.: МЭСХ, 2018. 201 с.

11. Ogundele O.D., Oyegoke D.A., Anaun T.E. Exploring the potential and challenges of electrochemical processes for sustainable waste water remediation and treatment // Acadlore Trans. Geosci. 2023. Vol. 2. P. 80–93.

12. Review on emerging water contaminants and the application of sustainable removal technologies / R. Kumar [et al.] // Case Studies Chem. Environ. 2022. Vol. 6. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.cscee.2022.100219.

13. Ogundele O.D., Adewumi A.J., Oyegoke D.A. Phycoremediation: Algae as an effective agent for sustainable remediation and waste water treatment // Earth Sci. Res. J. 2023. Vol. 10. № 1. P. 7–17. DOI: 10.18280/eesrj.100102.

14. Trevino-Resendez J.J., Medel A., Meas Yu. Electrochemical technologies for treating petroleum industry wastewater // Cur. Opin. Electroche. 2021. Vol. 27. P. 100690. DOI: 10.1016/j.coelec.2021.100690.

15. Wastewater Treatment and Reuse: a Review of its Applications and Health Implications / K.K. Kesari [et al.] // Water Air Soil Pollut. 2021. Vol. 232. P. 1–28. DOI: 10.1007/s11270-021-05154-8.

16. Ganiyu S.O., Mart'inez-Huitle C.A., Oturan M.A. Electrochemical advanced oxidation processes for wastewater treatment: Advances in formation and detection of reactive species and mechanisms // Oturan Curr. Opin. Electroche. 2021. Vol. 5. P. 100678. DOI: 10.1016/j.coelec.2020.100678.

## References

1. Kinetic study of slaughterhouse wastewater treatment by electrocoagulation using Fe electrodes / N. Yousefi [et al.] // Water Science & Technology. 2012. Vol. 66. № 4. P. 754–760. DOI: 10.2166/wst.2012.232.

2. Alam R., Shang J.Q., Khan A.H. Bubble size distribution in a laboratory-scale electroflotation study // Environmental Monitoring and Assessment. 2017. Vol. 189. № 4. P. 191–205. DOI: 10.1007/s10661-017-5888-4.

3. Reduction of COD and TSS from paper industries wastewater using electro-coagulation and chemical coagulation / M. Al-Shannag [et al.] // Separation Science and Technology. 2012. Vol. 47. № 5. P. 700–708. DOI: 10.1080/01496395.2011.634474.

4. Mohtashami R., Shang J.Q. Electroflotation for Treatment of Industrial Wastewaters: A Focused Review // Environmental Processes. 2019. Vol. 6. № 2. P. 1–29. DOI: 10.1007/s40710-019-00348-z.

5. Voda tekhnogennaya: problemy, tekhnologii, resursnaya cennost' / M. Shulenina [i dr.]. M.: MGTU im. N.E. Bauman, 2015. 402 s.

6. Boron removal from produced water using electrocoagulation / E.H. Ezechi [et al.] // Process Safety and Environmental Protection. 2014. № 92. P. 509–514.

7. Sposob ochistki stochnyh vod: pat. 2767943 Ros. Federaciya, MPK C02F 1/465, C02F 1/467 / L.I. Sokolov, S.V. Kolobova, V.A. Silinskij; zayavitel' i patentoobladatel' Vologodskij gos. un-t; №: 2021114389; zayavl. 21.05.2021; opubl. 22.03.2020, byul. № 9.

8. Elektroflotaciya v processah vodoochistki i izvlecheniya cennyh komponentov iz zhidkih tekhnogennyh othodov. Obzor / V.A. Kolesnikov [i dr.] // Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii. 2017. T. 51. № 4. S. 361–375.
9. Biomass from microalgae separation by electroflotation with iron and aluminum spiral electrodes / F. Baierle [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. 2015. Vol. 4. № 2. P. 274–281.
10. Benin D.M. Diagnostika i nadezhnost' gidravlicheskih sistem v usloviyah gorodskogo hozyajstva: monografiya. M.: MESKH, 2018. 201 s.
11. Ogundele O.D., Oyegoke D.A., Anaun T.E. Exploring the potential and challenges of electrochemical processes for sustainable waste water remediation and treatment // Acadlore Trans. Geosci. 2023. Vol. 2. P. 80–93.
12. Review on emerging water contaminants and the application of sustainable removal technologies / R. Kumar [et al.] // Case Studies Chem. Environ. 2022. Vol. 6. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.cscee.2022.100219.
13. Ogundele O.D., Adewumi A.J., Oyegoke D.A. Phycoremediation: Algae as an effective agent for sustainable remediation and waste water treatment // Earth Sci. Res. J. 2023. Vol. 10. № 1. P. 7–17. DOI: 10.18280/eesrj.100102.
14. Trevino-Resendez J.J., Medel A., Meas Yu. Electrochemical technologies for treating petroleum industry wastewater // Cur. Opin. Electroche. 2021. Vol. 27. P. 100690. DOI: 10.1016/j.coelec.2021.100690.
15. Wastewater Treatment and Reuse: a Review of its Applications and Health Implications / K.K. Kesari [et al.] // Water Air Soil Pollut. 2021. Vol. 208. P. 1–28. DOI: 10.1007/s11270-021-05154-8.
16. Ganiyu S.O., Mart'inez-Huitle C.A., Oturan M.A. Electrochemical advanced oxidation processes for wastewater treatment: Advances in formation and detection of reactive species and mechanisms // Oturan Curr. Opin. Electroche. 2021. Vol. 5. P. 100678. DOI: 10.1016/j.coelec.2020.100678.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 19.02.2025; одобрена после рецензирования: 12.05.2025;  
принята к публикации: 28.05.2025

**The information about article:**

The article was submitted to the editorial office: 19.02.2025; approved after review: 12.05.2025;  
accepted for publication: 28.05.2025

*Информация об авторах:*

**Силинский Виктор Алексеевич**, аспирант кафедры теплогазоводоснабжения Инженерно-строительного института Вологодского государственного университета (160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15), e-mail: [viktor.silinsky@yandex.ru](mailto:viktor.silinsky@yandex.ru), SPIN-код: 4560-4277

**Соколов Леонид Иванович**, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, Москва, Локомотивный проезд, д. 21); профессор кафедры «Строительство систем и сооружений водоснабжения и водоотведения» Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе (117997, Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, д. 23), доктор технических наук, профессор, e-mail: [sokolovli@mail.ru](mailto:sokolovli@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9635-8389>, SPIN-код: 3010-5480

*Information about the authors:*

**Silinskiy Viktor A.**, postgraduate student of the department of heat and gas supply of the Institute of civil engineering of Vologda state university (160000, Vologda, Lenin str., 15), e-mail: [viktor.silinsky@yandex.ru](mailto:viktor.silinsky@yandex.ru), SPIN: 4560-4277

**Sokolov Leonid I.**, chief researcher at the scientific research institute of building physics of the Russian academy of architecture and building sciences (127238, Moscow, Lokomotivny proezd, 21); professor of the department «Construction of water supply and sanitation systems and structures» of the Russian state geological exploration university named after Sergo Ordzhonikidze (117997, Moscow, GSP-7, Miklukho-Maklaya str., 23), doctor of technical sciences, professor, e-mail: [sokolovli@mail.ru](mailto:sokolovli@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9635-8389>, SPIN: 3010-5480