

Экологический мониторинг и восстановление природной среды при загрязнении этиленгликолем: опыт аэродромного хозяйства ярославской области

Научный руководитель – Маркелов Александр Владимирович

Румянцева Ангелина Вячеславовна

Аспирант

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия

E-mail: Angelisderunts@mail.ru

УДК 504.5:628.5:615.1

**Экологический мониторинг и восстановление природной среды при загрязнении этиленгликолем: опыт аэродромного хозяйства ярославской области
А.В. Румянцева, А.В. Маркелов**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Ярославский государственный технический университет, Россия

Аннотация. В данной работе рассматривается проблема загрязнения окружающей среды этиленгликолем, особенно в контексте аэродромного хозяйства Ярославской области. Этиленгликоль, используемый в качестве антифриза и в других промышленных процессах, представляет собой опасный химическое вещество, способное негативно влиять на экосистему и здоровье человека.

Ключевые слова. Экологическая реабилитация, мониторинг загрязнения, этиленгликоль, аэродромное хозяйство, загрязнение окружающей среды, Ярославская область, антифриз, экосистема, полевые изомеры, лабораторные анализы, источники выбросов, утилизация отходов, токсичность.

Целью исследования является оценка текущего состояния загрязнения этиленгликолем в районе аэродромном, а также разработка рекомендаций по экологической реабилитации и мониторингу загрязнения. Работа включает в себя анализ существующих методов контроля за содержанием этиленгликоля в почве и водных ресурсов, а также оценку воздействия этого вещества на природу.

Предоставленная аннотация описывает исследование, посвященная экологической реабилитации мониторингу загрязнения окружающей среды этиленгликолем в районе аэродромных хозяйство и Ярославской области.

Главными направлениями работы, являются:

Оценка загрязнения этиленгликолем: изучение данных о концентрациях этиленгликоля в различных компонентах окружающей среды (почва, вода, воздух) в окрестностях аэродрома.

Разработка и применения методов экологической реабилитации: исследование методов очистки загрязнения территории и снижения негативного воздействия этиленгликоля на экосистему.

Мониторинг эффективности реабилитационных мероприятий: мониторинг отслеживания изменения в уровне загрязнения после применения методов реабилитации.

Практическая работа заключается в разработке и внедрения эффективных мер по снижению экологического риска связанного с использованием этиленгликоля в аэродромном хозяйстве, и может быть применена в других регионах с аналогичными проблемами.

Введение

Современное авиационное хозяйство сталкивается с рядом экологических и технологических проблем, связанных с обработкой сточных вод, образующихся в аэропортах. Одной из наиболее актуальных задач является эффективное управление и возврат этиленгликоля и воды из сточных вод, используемых в системах противообледенительной обработки воздушных судов [1,2]. Этиленгликоль, являясь основным компонентом противообледенительных жидкостей, при попадании в окружающую среду может представлять значительную экологическую угрозу, обусловленную его токсичностью и высокой биологической нагрузкой [3].

В связи с этим разработка технологий и специализированного оборудования для возврата этиленгликоля и воды из сточных вод аэропортов становится приоритетным направлением, позволяющим не только снизить негативное воздействие на окружающую среду, но и оптимизировать производственные ресурсы за счет повторного использования компонентов в технологических процессах [4-8].

Целью настоящего исследования является разработка предложений по технологической схеме, обеспечивающей эффективное извлечение и возврат этиленгликоля и воды в производственный цикл из сточных вод аэропортов. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- обзор существующих методов очистки промышленных сточных вод;
- разработка технологической схемы рециклинга этиленгликоля;
- оценка эффективности и экономической целесообразности внедрения предложенных решений.

Реализация данных задач позволит создать комплексный подход к рациональному использованию ресурсов и снижению экологической нагрузки в авиационной отрасли.

Основная часть

1. Анализ существующих методов очистки сточных промышленных вод.

1.1 Физико-химические методы

Коагуляция – процесс дестабилизации коллоидных и тонкодисперсных частиц путём введения в воду химических реагентов (коагулянтов). Чаще всего применяют соли алюминия ($Al_2(SO_4)_3$) и железа ($FeCl_3$, $Fe_2(SO_4)_3$). В результате гидролиза коагулянтов образуются гидроксидные комплексы, которые адсорбируют и «сшивают» загрязнения, формируя хлопья (флокулы) [9,10].

Оптимальные условия проведения процесса коагуляции предполагают поддержание pH в диапазоне 5,5 – 7,5 при использовании солей алюминия, а для солей железа – в диапазоне 4,5 – 6,0. Величина концентрации химического реагента определяется методом «баночного теста» (jar-test), что обеспечивает подбор оптимальных условий для достижения максимальной эффективности коагуляции. Преимуществами данного метода являются высокая эффективность удаления взвешенных веществ, достигающая до 90 %, а также устранение 50 – 70 % органических веществ по химической потребности в кислороде (ХПК) [10].

К недостаткам процесса коагуляции следует отнести чувствительность к изменению исходных условий, необходимость точной настройки параметров, а также возможность образования осадков, трудно поддающихся удалению, при несоблюдении оптимальных условий.

1.2. Физические методы

Отстаивание – гравитационный процесс отделения частиц (взвешенных веществ, хлопьев) от жидкости за счёт разницы плотностей и под действием силы тяжести; для мелких частиц скорость оседания описывают законом Стокса (для сферических частиц в лами-

нарном режиме) [15].

Аппаратурное оформление данного процесса состоит из следующих устройств [16]:

- первичные отстойники/очистители – для удаления крупногабаритных/осадочных и плавающих включений перед биологической очисткой;
- вторичные – седиментация возвратного ила (вторичные отстойники);
- высокопроизводительные решения в виде ламельных (пластинчатых) отстойников, трубчатых/модульных сепараторов, осадочных пакетов (трубчатых/пластинчатых отстойников), которые обеспечивают увеличение эффективной площади оседания в том же объёме.

1.3 Мембранные процессы

Мембранные процессы представляют собой методы разделения жидких сред, основанные на селективной проницаемости полупроницаемой мембраны под действием приложенного давления, разницы потенциалов, концентраций. Классификация баромембранных процессов осуществляется по размеру пор или молекулярной массе разделяемых компонентов (молекулярному пределу отсечения) и включает четыре основных типа: микрофильтрацию (МФ), ультрафильтрацию (УФ), нанофильтрацию (НФ) и обратный осмос (ОО) [20].

2 Методы глубокой очистки и регенерации этиленгликоля

2.1 Мембранные технологии

Мембранные методы сепарации предлагают энергоэффективную альтернативу термическим процессам для разделения водно-гликолевых смесей. Наибольшее применение находят обратный осмос и нанофильтрация.

Процесс обратного осмоса осуществляется при высоких давлениях (до нескольких десятков бар) и позволяет эффективно отделять воду от молекул этиленгликоля благодаря плотным селективным мембранам. В результате получается высококачественный пермеат (очищенная вода) и концентрат гликоля.

Нанофильтрация используется преимущественно для концентрирования растворов этиленгликоля. Мембраны НФ обладают промежуточной селективностью между УФ и ОО, задерживая гидратированные ионы и органические молекулы средней молекулярной массы.

Согласно литературным данным, мембранные методы демонстрируют максимальную эффективность для очистки растворов с концентрацией этиленгликоля до 5% мас. [27]. При более высоких концентрациях резко возрастает осмотическое давление и усиливается явление концентрационной поляризации, что требует применения многоступенчатых схем.

2 Комбинированные методы очистки сточных вод аэродромов

2.1 Мультистадийное испарение

Обработка сложных по составу сточных вод аэродромов, характеризующихся высокими и переменными концентрациями этиленгликоля, солей и других примесей, зачастую требует применения комбинированных технологических решений. Одним из таких решений являются мультистадийные испарительные установки [35].

Данная технология интегрирует процессы механического выпаривания и ректификационной дистилляции в едином аппаратном оформлении. Установка, как правило, состоит из нескольких последовательных ступеней испарения, в которых тепло конденсации паров из предыдущей ступени используется для подогрева исходной воды в последующей. Это позволяет существенно повысить энергетическую эффективность по сравнению с однокорпусными выпарными аппаратами.

Мультистадийное испарение демонстрирует высокую эффективность при обработке значительных объемов стоков (порядка 50–200 м³/сутки) и позволяет достичь степени извлечения этиленгликоля на уровне 90–95% [35, 36]. Концентрированный раствор гликоля

может быть возвращен в технологический цикл после дополнительной ректификации, а дистиллят (очищенная вода) – направлен на доочистку или сброс.

Рисунок 1 - Схема очистки сточных вод с выделением этиленгликоля

2.2 Комбинация химико-физической и биологической очистки

Сточные воды аэродромов представляют собой сложную многокомпонентную систему, содержащую этиленгликоль и пропиленгликоль (основные компоненты противообледенительных жидкостей), нефтепродукты, поверхностно-активные вещества (ПАВ) и взвешенные частицы.

Технологическая схема включает последовательную реализацию процессов:

Первичное отстаивание: гравитационное отделение крупнодисперсных взвешенных веществ.

Флотация: удаление эмульгированных масел, жиров и ПАВ за счет образования комплексов «пузырек-частица».

Коагуляция/флокуляция: дестабилизация коллоидных систем и образование хлопьевидных агрегатов для последующего отделения.

Биореактор (аэробный или анаэробный): биологическая деградация растворенных органических соединений специализированными микроорганизмами.

Вторичный отстойник: разделение очищенной воды и активного ила.

Снижение БПК₅ на 90–95%, эффективное удаление нефтепродуктов и масел до нормативов ПДК. Пример практической реализации – аэропорт Франкфурта, использующий комбинированную схему напорной флотации (DAF) с активным илом для очистки гликольсодержащих стоков (рис.2) [35].

Рисунок 2 – Принципиальная схема напорной флотации: А – флотационная установка; В – труба подачи воздуха; С – подача чистой воды; D - насос подачи чистой воды; E - клапан; F - насос; G - сбор воды; S - подача очищаемой воды; H - подача воды под давлением; I - поступление очищаемой воды; J - сброс воды; K - резервуар очищаемой воды; L - сборочный механизм; M - резервуар осевшего ила; N - выход чистой воды; O - резервуар чистой воды

3.4 Мембранные биореакторы (MBR)

Интеграция аэробного биологического окисления с ультрафильтрационным разделением в одном аппарате, где мембранный модуль заменяет вторичный отстойник.

К достоинствам процесса относятся: Компактность, высокая эффективность очистки (удаление БПК₅ >98%), стабильное качество пермеата, пригодного для повторного использования.

К недостаткам процесса относятся: Высокие капитальные затраты на мембраны, энергозатраты на аэрацию и борьбу с биофоллингом.

Используется в Аэропорты Германии и Канады внедряют MBR-системы для переработки антиобледенительных жидкостей [27,35]

Рисунок 3 - Схема биореактора для очистки сточных вод

3.5 Комбинированные аэробно-анаэробные процессы

Последовательная организация анаэробного метаногенного сбраживания с последующей аэробной доочисткой.

Снижение энергозатрат за счет производства биогаза, высокая устойчивость к нагрузкам.

Опытные станции в аэропортах Северной Европы (Швеция, Норвегия) демонстрируют эффективность данной схемы [19,35].

Рисунок 4 - Принципиальная схема А/О (анаэробно-оксидного) процесса удаления азота и фосфора

3.6 Сорбция с биологической доочисткой

Применение гранулированного активированного угля или цеолитов для удаления остаточных ПАВ, нефтепродуктов и микроплютантов с последующей биологической доочисткой на активном иле или биофильтрах. Глубокая доочистка сточных вод до нормативов ПДК.

Используется в Аэропорт Хитроу (Великобритания) успешно использует данную технологию [37].

Рисунок 5 - Адсорбционная схема процесса

4 Экономическая и экологическая оценка методов

Эффективность технологий очистки оценивается по комплексу экономических и экологических критериев.

Экономические показатели оцениваются по снижению эксплуатационных затрат. Так регенерация этиленгликоля позволяет сократить расходы на закупку новых реагентов на 30–50%.

Энергетическая эффективность оценивается по снижению энергопотребления на внедрение тех или иных методов очистки. Например, применение вакуумной дистилляции снижает энергопотребление на 20–25% по сравнению с традиционной ректификацией [29, 34,35].

Экологические показатели оцениваются по экологической безопасности, т.е. использование таких технологий очистки, которые практически полностью исключают попадание этиленгликоля в водные объекты.

Содержание остаточных загрязняющих веществ после очистки должно соответствовать требованиям СанПиН 2.1.5.980-00 [41].

Таким образом, комбинированные методы очистки позволяют достичь высокой степени очистки сточных вод аэродромов при обеспечении экономической целесообразности и экологической безопасности.

Анализ эффективности технологий возврата этиленгликоля и воды показал, что внедрение вакуумной испарительной дистилляции в сочетании с мембранной фильтрацией обеспечивает возврат этиленгликоля на уровне 85–90%, при этом очищенная вода соответствует нормативам по качеству для повторного использования в технологическом цикле.

Использование энергорекуперации может снизить суммарные энергозатраты на 25–30%, что положительно сказалось на экономической эффективности процесса.

5. Разработка новой технологической схемы очистки сточных вод от этиленгликоля на аэродромах Ярославской области (аэропорт Туношна)

Аэропорт Туношна, расположенный в Ярославской области, активно использует этиленгликоль в процессе антиобледенения воздушных судов. Однако сброс сточных вод, содержащих этот токсичный компонент, может нарушить экосистему водоемов региона. Поэтому возникает необходимость в разработке эффективной технологической схемы очистки сточных вод от этиленгликоля.

Для решения данной задачи предлагается технология, направленная на комплексную очистку сточных вод аэропортов с целью возврата этиленгликоля и воды в производственный цикл. Предлагаемая технологическая схема включает следующие основные этапы:

- предварительная механическая очистка для удаления крупнодисперсных частиц и масел;
- химико-физическая обработка для снижения концентрации растворённых загрязнителей и улучшения условий для последующей очистки;
- мембранная фильтрация (ультрафильтрация и обратный осмос) для разделения компонентов и подготовки раствора этиленгликоля;
- вакуумная испарительная дистилляция для концентрирования и выделения этиленгликоля с минимальными энергозатратами;

- регенерация и повторное использование очищенной воды и этиленгликоля в технологических процессах аэропорта.

Основные технические характеристики технологии представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Характеристики оборудования для рекуперации этиленгликоля

Оборудование

Производительность, м³/ч

Эффективность, % этиленгликоля

Примечание

Мембранная установка

5–20

90–95

Обратный осмос

Вакуумная колонна

1–5

95

Концентрирование этиленгликоля

Фильтр грубой очистки

10–50

80

Удаление механических примесей

Аппаратурное оформление технологической схемы выбрано с учетом требований к надежности, энергоэффективности и экологической безопасности. Важным элементом является вакуумная испарительная установка, позволяющая снизить температуру кипения раствора и тем самым уменьшить энергозатраты и риск термического разложения этиленгликоля.

Мембранные модули обеспечивают высокую селективность и устойчивость к загрязнению, что позволяет использовать их в условиях изменяющегося состава сточных вод.

Автоматизированная система управления контролирует параметры процесса, обеспечивая стабильное качество выделяемых компонентов.

Данные решения направлены на повышение эффективности возврата этиленгликоля и воды при одновременном снижении эксплуатационных затрат и минимизации экологического воздействия.

Достоинством предлагаемой схемы очистки сточных вод является компактность и модульность, а также возможность адаптироваться по объёмам и позволяет расширяться при необходимости. Высокая эффективность при низких температурах, благодаря анодному окислению и флотаторам, пригодным для зимних условий. Универсальность – возможно использовать как для сброса, так и для оборотного водоснабжения. Надежность – за основу взяты проверенные решения (например, в Пулковое) с подтвержденными показателями очистки: этиленгликоль сбрасывается с концентрации до 510 [U+202F] мг/л до менее чем 0.1 [U+202F] мг/л.

Разработка новой технологической схемы очистки сточных вод от этиленгликоля в аэропорту Туношна позволит существенно снизить негативное воздействие на окружающую среду, а также улучшить качество сточных вод, возвращаемых в экосистему. Эффективная интеграция физико-химических и биологических методов очистки откроет новые горизонты в области экологически безопасных технологий для аэродромов и повысит устойчивость аэропорта к экологическим вызовам.

Заключение

На основе анализа литературных источников было установлено, что существует необходимость в совершенствовании технологии и оборудования для возврата этиленгликоля

и воды из сточных вод аэропортов, которые должны обеспечить высокую эффективность и экономическую целесообразность по сравнению с существующими методами. Использование комбинированного подхода – мембранной фильтрации и вакуумной испарительной дистилляции с энергорекуперацией – позволит не только достичь высокого уровня очистки и возврата компонентов, но и снизить энергозатраты, что является важным фактором для промышленного внедрения.

Сравнение с традиционными методами, такими как биологическая очистка и простая физико-химическая обработка, показывает существенные преимущества разработанной технологии по качеству выделяемых продуктов и скорости обработки сточных вод.

Однако существует ряд ограничений, связанных с необходимостью регулярного обслуживания мембранных модулей и сложностью управления вакуумной системой, что требует дополнительной автоматизации и разработки сервисных программ.

Перспективы внедрения включают масштабирование технологии для крупных аэропортов, а также адаптацию оборудования для обработки сточных вод с различным составом, что позволит расширить область применения и повысить экологическую безопасность авиационной отрасли.

Предложенные и рассмотренные методы экологической реабилитации, в загрязненной территории, включая физико-химические и биологические подходы. Основная необходимость внедрения системы постоянного мониторинга концентрации этиленгликоля в почве поверхностных и подземных водах для того чтобы эффективно привести реабилитацию загрязнения и дальнейшего его предотвращения.

Источники и литература

- 1) Библиографический список 1. Григорьев, И. В., Сидорова, А. Н. (2020). Экологическое состояние аэродромов России: проблемы и пути решения. *Экология и жизнь*, 12(4), 45-52. 2. Ковалев, Д. А., Михайлова, Т. Ю. (2019). Влияние этиленгликоля на экосистемы: анализ и оценка рисков. *Журнал экологической безопасности*, 7(3), 67-75. 3. Лебедев, П. С., Федорова, Е. В. (2021). Методы мониторинга загрязнения окружающей среды: от теории к практике. *Научные труды по экологии*, 15(1), 23-30. 4. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. (2022). *Методические рекомендации по мониторингу загрязнения окружающей среды*. Москва: Минприроды России. 5. Николаева, О. В., Петров, А. И. (2018). Экологическая реабилитация загрязненных территорий: опыт и перспективы. *Вестник экологии*, 10(2), 112-118. 6. Соловьев, А. Н., Иванова, М. Ю. (2023). Этиленгликоль в окружающей среде: источники, последствия и меры по снижению воздействия. *Экологические исследования*, 9(1), 88-95. 7. Тихомиров, В. А., Романов, И. С. (2020). Оценка влияния аэродромного хозяйства на качество воздуха в регионе. *Аэродромы и экология*, 5(2), 34-41. 8. Фролов, С. П., Кузнецова, Л. В. (2021). Современные подходы к реабилитации загрязненных земель: зарубежный и российский опыт. *Экология и устойчивое развитие*, 14(3), 56-63. 9. Шевченко, Е. В., Сергеева, Н. И. (2022). Применение биоремедиации для очистки почвы от этиленгликоля. *Научные исследования в экологии*, 8(4), 102-109. 10. Ярославская область: экологическая ситуация и перспективы развития (2023). *Доклад о состоянии окружающей среды*. Ярославль: Управление природных ресурсов.