

Блохина Тамара Андреевна, магистрант,
Российский государственный гидрометеорологический университет

ЭТИЛЕНГЛИКОЛЬ КАК ПРИОРИТЕТНЫЙ ЗАГРЯЗНИТЕЛЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТОЧНЫХ ВОД АЭРОПОРТОВ: ОБЗОР МЕТОДОВ ОЧИСТКИ

Аннотация. Статья посвящена загрязнению поверхностных сточных вод аэропортов этиленгликолем, который выступает ключевым компонентом противообледенительных жидкостей. Рассмотрены физико-химические свойства и токсикологические характеристики соединения, а также масштабы его поступления в водные объекты. Систематизированы современные методы очистки: физико-химические, биологические, передовые окислительные процессы и комбинированные схемы. Приведены примеры действующих систем в Европе и Северной Америке. Показано, что выбор технологии определяется климатическими условиями, объёмами и концентрациями стоков, а также экономическими факторами.

Ключевые слова: Этиленгликоль, сточные воды аэропортов, противообледенительные жидкости, очистка сточных вод, регенерация гликоля.

Введение

Аэропорты являются источниками специфического загрязнения поверхностных сточных вод, особенно в холодный сезон. Главным загрязнителем выступает этиленгликоль, входящий в состав противообледенительных жидкостей. Его высокая растворимость в воде, значительное химическое потребление кислорода и токсичность для гидробионтов делают это соединение приоритетным загрязнителем, требующим специальных подходов к очистке. Цель настоящей работы – обзор современных методов удаления этиленгликоля из сточных вод аэропортов и анализ практического опыта их применения.

1. Физико-химические свойства, токсикология и источники поступления этиленгликоля

Этиленгликоль, или этандиол-1,2 ($C_2H_6O_2$), представляет собой простейший двухатомный спирт. Это прозрачная бесцветная жидкость без запаха, обладающая сладковатым вкусом. Молекулярная масса составляет 62,07 г/моль, температура плавления – $-12,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, кипения – $197,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, плотность – $1,113\text{ г/см}^3$. За счёт образования водородных связей соединение неограниченно растворяется в воде [1], что затрудняет его удаление отстаиванием и коагуляцией. Этиленгликоль химически активен: образует эфиры, окисляется до гликолевого альдегида, глиоксаля, гликолевой и щавелевой кислот; применяется как мономер для полиэфиров и полиуретанов [2, 3].

Соединение токсично для человека и теплокровных животных: смертельная доза составляет 100–150 мл. Метаболиты – гликолевая и щавелевая кислоты – вызывают метаболический ацидоз, поражение центральной нервной системы и почек [4]. Для водных экосистем этиленгликоль опасен как напрямую, так и за счёт высокого ХПК, приводящего к дефициту кислорода [5].

Основной источник поступления – обработка воздушных судов противообледенительными жидкостями на основе этиленгликоля, диэтиленгликоля или пропиленгликоля. Процедура включает удаление льда (deicing) и защиту от повторного обледенения (anti-icing). Концентрация растворов достигает 50–100 %; расход на одно судно – от сотен до тысяч литров, сезонное потребление в крупных аэропортах – миллионы литров [5, 6]. До 80 % ПОЖ теряется и попадает в ливневую и дренажную системы, особенно при



взлёте и снеготаянии [6]. В составе ПОЖ присутствуют поверхностно-активные вещества, загустители и ингибиторы коррозии, способные подавлять биологическую очистку [8]. Концентрации этиленгликоля в неочищенных стоках достигают 1000–5000 мг/л, в пиковые периоды – более 10 000 мг/л; после разбавления – 50–500 мг/л, что превышает ПДК (0,25 мг/л) в 200–20 000 раз [5, 9]. Сезонная неравномерность выражена сильно: 80–90 % годового выноса приходится на ноябрь–апрель [7].

2. Современные методы очистки сточных вод от этиленгликоля Традиционные механические методы очистки – отстаивание и фильтрация – малоэффективны в отношении растворённых органических соединений. Поэтому для удаления этиленгликоля применяют специализированные технологии, которые можно разделить на физико-химические, биологические, передовые окислительные процессы (Advanced Oxidation Processes, AOP) и комбинированные многоступенчатые схемы. Каждая группа имеет свои преимущества, ограничения и области применения, что и определяет выбор конкретной технологии в зависимости от объёмов стоков, требуемой степени очистки, климатических условий и экономической целесообразности [5, 7].

Физико-химические методы

Физико-химические методы основаны на извлечении или концентрировании загрязнителя без его химического разрушения. Наиболее распространённый подход – регенерация этиленгликоля из отработанных ПОЖ с возвратом в производственный цикл. Такая технология включает сбор концентрированных растворов (обычно с содержанием гликоля более 5 %) и их переработку методами дистилляции, мембранной фильтрации (нанофильтрация, обратный осмос) или вакуумного выпаривания [11, 12]. Регенерация экономически оправдана при больших объёмах стоков с высоким содержанием этиленгликоля, однако требует значительных капитальных вложений и энергозатрат на дистилляцию, а также не решает проблему очистки низкоконцентрированных ливневых стоков [11].

Адсорбционные методы с использованием активированного угля, синтетических смол или природных сорбентов ограниченно применимы к этиленгликолю из-за его высокой полярности и хорошей растворимости в воде. Сорбционная ёмкость традиционных углеродных материалов по отношению к этиленгликолю невелика, а регенерация сорбентов сложна и дорогостояща [13].

Мембранные технологии позволяют эффективно отделять этиленгликоль от воды, создавая концентрат, который может быть направлен на регенерацию, и пермеат, пригодный для сброса. Однако мембраны подвержены засорению взвешенными веществами и органическими добавками, что требует предварительной подготовки стоков и частой замены мембран [14, 7]. Коагуляция и флокуляция, применяемые для удаления взвешенных веществ и коллоидных примесей, неэффективны в отношении растворённого этиленгликоля и могут использоваться лишь как вспомогательные стадии предварительной обработки [5].

Биологическая деструкция

Биологическая деструкция этиленгликоля основана на способности микроорганизмов использовать гликоли в качестве источника углерода и энергии. Этиленгликоль является биоразлагаемым соединением: в аэробных условиях он окисляется до гликолевой кислоты, затем до глиоксалевой и щавелевой кислот с последующей минерализацией до углекислого газа и воды [9]. Аэробные биологические системы — активный ил, биофильтры, мембранные биореакторы (MBR) и реакторы с движущейся загрузкой (MBBR) — демонстрируют высокую эффективность удаления этиленгликоля при концентрациях до нескольких граммов на литр.

Однако биологические методы имеют существенные ограничения в условиях полярных областей и в периоды пиковых нагрузок. Температура стоков ниже 10–15 °С резко снижает скорость ферментативных процессов, увеличивая время очистки до нескольких суток [9].



Кроме того, микроорганизмы чувствительны к токсичным добавкам, присутствующим в ПОЖ (ПАВ, ингибиторы коррозии), которые могут подавлять активность ила [8]. Для низких концентраций (менее 100 мг/л) биологические методы становятся экономически нецелесообразными из-за необходимости поддержания высокой биомассы и аэрации [7]. В качестве альтернативы предлагаются анаэробные процессы с получением биогаза, однако они более чувствительны к условиям среды и требуют строгого контроля pH и температуры [7]. В пилотных проектах применялись также вермифiltrация с использованием червей и плавающие водно-болотные угодья для обработки разбавленных стоков, но эти методы пока не получили широкого промышленного внедрения из-за ограниченной масштабируемости и низкой скорости в холодном климате [7].

Передовые окислительные процессы (AOP)

Методы AOP основаны на генерации высокореакционноспособных гидроксильных радикалов ($\bullet\text{OH}$), которые неселективно окисляют органические соединения, включая этиленгликоль, до полной минерализации. К наиболее изученным AOP для очистки от гликолей относятся озонирование, пероксид водорода в сочетании с УФ-облучением ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$), процессы Фентона и фотоФентона, фотокатализ с диоксидом титана (TiO_2) [13, 15]. Фотокаталитические и фотохимические методы, использующие УФ-излучение в сочетании с катализаторами или окислителями, также демонстрируют высокую эффективность минерализации этиленгликоля.

Сравнительные исследования AOP и адсорбции на композите хитозан–цеолит показали, что AOP превосходят сорбционные методы по степени минерализации, однако требуют значительно больших затрат электроэнергии и реагентов [13]. Основные недостатки AOP – высокое энергопотребление (до 10–50 кВт·ч на кубометр стока), необходимость в дорогостоящем оборудовании и возможное образование побочных продуктов (например, альдегидов или органических кислот), что требует дополнительного контроля [5, 7].

Комбинированные схемы

Учитывая сложный состав аэропортовых стоков и сезонные колебания концентраций этиленгликоля, наиболее эффективным решением является применение комбинированных многоступенчатых схем, сочетающих различные методы для достижения требуемых нормативов сброса. Типовая схема включает предварительную механическую очистку (песколовки, нефтеловушки) для удаления взвешенных веществ и нефтепродуктов, затем основную стадию – биологическую или AOP – и финишную доочистку (сорбция, фильтрация, УФобеззараживание) [14, 10].

3. Практика реализации систем очистки в аэропортах

Практическая реализация систем очистки поверхностных сточных вод от этиленгликоля демонстрирует многообразие технологических подходов, адаптированных к местным климатическим условиям, объемам стоков и экономическим возможностям.

Международный аэропорт Сиракузы Хэнкок (Нью-Йорк, США)

Международный аэропорт Сиракузы Хэнкок реализовал масштабный проект по регенерации этиленгликоля из отработанных ПОЖ. Ежегодно в зимний период на территории аэропорта образуется от 5 до 7 млн галлонов сточных вод, содержащих гликоли в различных концентрациях. Традиционно эти стоки направлялись на городские очистные сооружения, что требовало значительных затрат. В 2023 году была введена в эксплуатацию новая установка регенерации гликоля стоимостью 19,4 млн долларов, реализующая пятиступенчатый процесс переработки.

Ключевая особенность технологии – способность перерабатывать растворы с концентрацией гликоля до 0,25 %, что ранее считалось экономически нецелесообразным. Процесс включает испарение низкоконтентрированного раствора для повышения



концентрации с 0,25 до 10 %, фильтрацию для удаления загустителей и остаточных масел, второе испарение до концентрации 50 %, дистилляцию до чистоты 99,5 % и смешивание с сертифицированными добавками для получения авиационной противообледенительной жидкости типа I по стандарту AMS 1424. Установка производит до 550 тыс. галлонов авиационного деайсера и от 5 до 7 млн галлонов чистой воды ежегодно. Ожидаемое снижение выбросов углекислого газа составляет до 16,5 млн фунтов в год по сравнению с традиционными методами утилизации. Экономический эффект оценивается в экономии около 200 тыс. долларов ежегодно. Установка имеет резерв мощности: при текущих объёмах рейсов используется лишь около 50 % производительности, что создаёт возможность для обслуживания близлежащих аэропортов [7, 16].

Международный аэропорт Буффало-Ниагара (Нью-Йорк, США) Международный аэропорт Буффало-Ниагара реализовал уникальный экологический подход к очистке гликолесодержащих стоков – создание подземных искусственных водно-болотных угодий. Данный объект стал первым в США аэропортовым сооружением подобного типа. Система представляет собой аэрируемое подземное водно-болотное угодье площадью 1,9 га, через которое пропускаются все гликолесодержащие стоки аэропорта.

Технология основана на естественных процессах аэробной биологической деструкции с участием растений и микроорганизмов, обеспечивающих высокую эффективность удаления загрязнений. Система способна обеспечивать 95 %-ное снижение концентрации гликоля за 2–4 дня при средней производительности около 2 млн галлонов в сутки. Для сбора противообледенительной жидкости применяется вакуумная уборка на перроне, позволяющая улавливать до 50 % жидкости. Преимуществами данного решения являются экологичность, низкие эксплуатационные затраты и отсутствие необходимости в сложном механическом оборудовании. Вместе с тем технология требует значительных земельных площадей и чувствительна к климатическим условиям, что ограничивает её применение в регионах с суровым холодным климатом [18].

Аэропорт Братск (Иркутская область, Россия)

Аэропорт Братск – компанией Alta Group разработано и внедрено инженерное решение для очистки поверхностных сточных вод аэропортов от этиленгликоля и пропиленгликоля. Производительность системы составляет 1296 м³/сутки. При проектировании были учтены ключевые условия эксплуатации: суровый климат Иркутской области, сезонный характер поступления стоков, колебания концентраций противообледенительных реагентов и необходимость бесперебойной работы аэропорта.

Технологическая схема организована по двухступенчатому принципу. Первая ступень (предочистка) включает удаление взвешенных веществ, очистку от нефтепродуктов, выравнивание гидравлической нагрузки и подготовку воды к глубокой доочистке. Вторая ступень (основная очистка) предусматривает озонирование – окисление и разрушение молекул гликолей, а также ультрафиолетовое обеззараживание для завершения окислительных процессов и обеспечения санитарной безопасности сброса. Комбинация методов позволяет не просто снижать концентрацию загрязнителей, а разрушать трудноокисляемые органические соединения. По результатам приёмо-сдаточных испытаний подтверждено соответствие нормативам сброса в водоём и отсутствие превышений по концентрациям этиленгликоля и пропиленгликоля. Разработанное решение обладает потенциалом для тиражирования в других аэропортах, расположенных в зонах с холодным климатом, где биологические методы затруднены [10].

Аэропорт Мюнхен (Германия)

Аэропорт Мюнхен – система замкнутого цикла рециклинга противообледенительной жидкости, позволяющая удовлетворять до 70 % потребностей аэропорта в деайсере за счёт



переработки собственных отходов. Сбор отработанной жидкости осуществляется в специально отведённых зонах деайсинга, после чего смесь направляется на перерабатывающий завод, эксплуатируемый компанией Clariant GmbH. Технология рециклинга основана на механическом и химическом разделении гликоля с последующим восстановлением его концентрации и добавлением необходимых присадок для восстановления исходного состава.

Полученная жидкость повторно сертифицируется как авиационный деайсер типа I по стандарту SAE AMS 1424. Завод способен перерабатывать как высококонцентрированные, так и разбавленные стоки. С 2023–2024 зимнего сезона эксплуатация объекта передана компании Vilokan ADF Solutions GmbH. Основное отличие рециклинга от биологической деструкции заключается в том, что гликоль не разрушается, а выделяется и повторно используется, что значительно снижает потребность в производстве нового деайсера и уменьшает экологическую нагрузку [19].

Выводы

Этиленгликоль является приоритетным загрязнителем поверхностных сточных вод аэропортов, что обусловлено его высокой растворимостью, значительным ХПК, токсичностью для гидробионтов и масштабами применения в противообледенительных жидкостях. Концентрации загрязнителя в неочищенных стоках могут превышать нормативы в сотни и тысячи раз, а сезонная неравномерность поступления создаёт пиковые нагрузки на очистные сооружения.

Современные методы очистки включают физико-химические технологии (регенерация, мембранная фильтрация, адсорбция), биологические методы (аэробные реакторы, МВБР, искусственные водно-болотные угодья), передовые окислительные процессы (озонирование, фотокатализ, H_2O_2/UV) и комбинированные схемы. Выбор оптимальной технологии должен основываться на комплексном анализе объёмов стоков, концентрационных профилей, климатических условий, доступных площадей и экономических возможностей.

Для условий полярных областей и Крайнего Севера наиболее перспективными представляются физико-химические и окислительные методы, обеспечивающие стабильную работу при низких температурах и переменных нагрузках. Дальнейшее развитие технологий должно быть направлено на снижение энергозатрат и повышение экономической эффективности комбинированных схем очистки.

Список литературы:

1. Титова А. Г., Крестьянинов М. А., Зайчиков А. М. Термодинамические и структурные характеристики водных растворов гидроксид- и аминодизамещённых этанов // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58, № 6. – С. 30–34.
2. Шишонок М. Высокомолекулярные соединения. – ЛитРес, 2016.
3. Балакин В. М., Полищук Е. Ю. Химия высокомолекулярных соединений. – 2009.
4. Бонитенко Е. Ю. Сравнительная характеристика острых отравлений этиленгликолем и его эфирами // Российский биомедицинский журнал. – 2003. – Т. 4. – С. 486–490.
5. Sulej A. M., Polkowska Ż., Namieśnik J. Pollutants in airport runoff waters // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. – 2012. – Vol. 42, № 16. – P. 1691–1734.
6. Madden M. B. Use of glycol-based chemical deicing agents at airports. – State University of New York College of Environmental Science and Forestry, 1995.
7. Sletten S. J. Modifications to an existing glycol retention pond and alternative technologies review for aircraft deicing operations and glycol recovery and treatment: Dane County Regional Airport. – Embry-Riddle Aeronautical University, 2000.



8. Corsi S. R. et al. Nonylphenol ethoxylates and other additives in aircraft deicers, antiicers, and waters receiving airport runoff // *Environmental Science & Technology*. – 2003. – Vol. 37, № 18. – P. 4031–4037.
9. Azar R. A. Passive nutrient addition for the biodegradation of ethylene glycol in stormwater: дис. – University of Dayton, 1998.
10. Жмаков Г. Н. Разработка и реализация проектов очистных сооружений ливневых стоков аэропортов России // *Научно-технический вестник Поволжья*. – 2014. – № 6. – С. 151–153.
11. Суворова Е. В., Микрюкова Е. М. Удаление этиленгликоля из сточных вод аэропорта, в том числе его регенерация // *Выставка инноваций-2021 (весенняя сессия)*. – 2021. – С. 173–177.
12. Kurowski M. History, Processing, and Usage of Recycled Glycol for Aircraft Deicing and Anti-Icing. – 2001.
13. Azimi P. et al. Comparison of the advanced oxidation processes and adsorption with chitosan-zeolite composite in reducing the amount of airport wastes containing glycol pollution. – 2018.
14. Лесечко А. С., Курбатова А. И. Особенности технологической схемы очистки ливневых стоков в аэропортах // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. – 2016. – № 2. – С. 104–109.
15. Wang Y. et al. Rapid green degradation of ethylene glycol-based antifreeze wastewater via a coupled photolytic and photocatalytic double-pathway mechanism // *Journal of Water Process Engineering*. – 2025. – Vol. 71. – P. 107191.
16. Rajput S. K. et al. Ethylene Glycol: Industrial application and risk assessment // *Hazardous Chemicals*. – 2025. – P. 205–217.
17. Craig G. R. et al. How to Develop Chemical Criteria for Airport Stormwater // *Journal of Water Management Modeling*. – 1998. – Vol. 6.
18. Higgins J. et al. The design & operation of a very large vertical sub-surface flow engineered wetland to treat spent deicing fluids and glycol-contaminated stormwater at Buffalo Niagara International Airport // *Water Practice and Technology*. – 2011. – Vol. 6, № 3. – P. wpt2011044
19. Hoffmann A. An investigation of the feasibility of recycling deicing materials at Munich airport: дис. – Loughborough University, 1998.

