

Оценка взаимосвязи экологических и энергетических характеристик процесса очистки сточных вод в условиях перехода к циркулярной экономике

А. В. Киселев , Е. Р. Магарил  

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия
 magaril67@mail.ru

Аннотация. Очистные сооружения канализации играют ключевую роль в обеспечении экологической безопасности водных объектов. Нормативное качество работы очистных сооружений достигается за счет внедрения наилучших доступных технологий, однако процесс очистки сточных вод и обработки осадка является достаточно энергоемким. При реализации инвестиционных программ руководители предприятий и главы муниципалитетов зачастую уделяют внимание отдельным задачам – повышению качества очистки или энергетической эффективности, однако эти факторы взаимосвязаны: достижение нормативного качества очистки сточных вод за счет внедрения наилучших доступных технологий и увеличения количества технологических стадий обычно приводит к увеличению общего энергопотребления сооружений. Гипотеза исследования заключается в необходимости взаимного учета факторов повышения качества очистки сточных вод и энергетической эффективности при оценке эффективности работы канализационных очистных сооружений. Целью работы является разработка методологического подхода к оценке эффективности работы очистных сооружений, который учитывает качество очистки сточных вод и энергетические затраты на технологический процесс, с последующей его апробацией. Методологический подход включает в себя следующие этапы: 1) оценка качества очистки сточных вод, 2) оценка энергоэффективности и 3) построение индекса устойчивости на корреляционной матрице. Для апробации предлагаемого подхода использованы параметры работы очистных сооружений в городе Екатеринбурге за 2015–2018 гг. Результаты исследования развивают существующие знания относительно оценки эффективности управления на очистных сооружениях и подтверждают сформулированную гипотезу исследования: полученные значения индекса устойчивости коррелируют с техническим состоянием сооружений и в части достижения нормативного качества очистки, и в части энергетической эффективности всего процесса. Практическая значимость исследования заключается в создании удобного и простого управленческого инструмента оценки текущего успеха на очистных сооружениях и прогресса в реализации успешных практик циркулярной экономики. Предлагаемый подход может быть использован в качестве элемента эколого-экономической оценки в энергетике.

Ключевые слова: сточные воды; индекс устойчивости; циркулярная экономика; бенчмаркинг; энергозатраты.

1. Введение

В процессе жизнедеятельности человека образуются хозяйственно-бытовые сточные воды, которые представляют

собой совокупность условно твердой органической фракции и дренажных вод [1]. Недостаточно очищенные сточные воды, а также сточные воды,

не подвергающиеся очистке, содержат большое количество органических веществ, которые загрязняют существующую экосистему.

Таким образом, очистные сооружения канализации (ОСК) играют ключевую роль в обеспечении экологической безопасности водных объектов [2, 3]. Обеспечение нормативного качества очистки сточных вод на ОСК является одной из приоритетных задач, стоящих перед руководством эксплуатирующих организаций. Качественные нормативы очистки достигаются за счет внедрения наилучших доступных технологий.

Очистка сточных вод является достаточно энергоемким процессом. Удельный расход электрической энергии в зависимости от территории и географии работы обычно колеблется в диапазоне 0,4–0,9 кВт × ч на кубометр очищенных сточных вод [4–6] в зависимости от качества притока, масштаба очистных сооружений, климата и распределения. Небольшие по масштабу ОСК характеризуются высоким потреблением электрической энергии, в сравнении с относительно более крупными сооружениями: их удельное потребление выше за счет более «простого» управления, отсутствия достаточных и специализированных ресурсов для оперативной и инвестиционной деятельности. Более того, эффект масштаба в данной отрасли имеет существенное влияние на энергозатраты [6].

Следовательно, повышение энергетической эффективности ОСК является немаловажным вопросом в текущей повестке дня в области устойчивого развития. В соответствии с актуальной концепцией циркулярной экономики, ОСК теперь могут иметь положительный энергетический баланс за счет применения методов рекуперации материальных и энергетических потоков.

Осадок сточных вод как основной побочный продукт ОСК может быть

использован в качестве сырья для производства электрической и тепловой энергии с помощью наилучших доступных технологий [7, 8]. Анаэробное сбраживание осадка сточных вод является наиболее распространенным способом стабилизации на ОСК из-за его доказанной эффективности для дальнейшей обработки и утилизации отходов, минимальными энергетическими затратами на обеспечение процесса, а также в связи с возможностью производства биогаза [9].

Достижение нормативного качества очистки сточных вод за счет внедрения наилучших доступных технологий и увеличения количества технологических стадий обычно приводит к увеличению общего энергопотребления сооружений.

Модернизация и совершенствование ОСК может быть реализовано несколькими альтернативными технологическими решениями, каждое из которых имеет определенные показатели качества очистки и энергетической эффективности, а также объемы инвестиционных и эксплуатационных затрат. Для принятия обоснованных решений о том, какие наилучшие доступные технологии следует внедрять, необходимо одновременно рассматривать их как с точки зрения обеспечения нормативного качества очистки, так и с точки зрения обеспечения энергетической эффективности сооружений.

Более того, на сегодняшний день у руководителей разного уровня (как самих эксплуатирующих организаций, так и руководителей органов местного самоуправления и государственной власти) есть потребность в проведении экспресс-оценки текущего прогресса в развитии конкретных ОСК и сравнении результатов с типовыми объектами или соседями. В перспективе ОСК могут стать драйверами внедрения принципов циркулярной экономики, играя важную

роль в круговороте водных и других материальных ресурсов: это достигается за счет водоочистки и повторного использования воды, производства электрической и тепловой энергии, экстракции различных полезных продуктов из образующихся отходов [10].

Гипотеза исследования заключается в необходимости взаимного учета факторов повышения качества очистки сточных вод и энергетической эффективности при оценке эффективности работы очистных сооружений канализации в условиях перехода отрасли водопроводно-канализационного хозяйства к экономике замкнутого цикла.

Цель исследования состоит в разработке методологического подхода к оценке эффективности работы очистных сооружений канализации, с учетом качества очистки сточных вод и энергетических затрат на технологический процесс, с последующей его апробацией на централизованной системе водоотведения города Екатеринбурга.

Частными задачами исследования являются:

- определение основных критериев, влияющих на эффективность очистных сооружений с учетом принципов циркулярной экономики;

- разработка корреляционной структуры для оценки эффективности очистных сооружений в соответствии с парадигмой циркулярной экономики;

- апробация корреляционной структуры в качестве эталонного инструмента для отраслевого конкурентного сравнения очистных сооружений канализации.

2. Степень изученности проблемы

Большинство исследований по теме эффективности водоочистки и ОСК сосредоточены либо на вопросах обеспечения качества очистки сточных вод, либо на вопросах энергоэффективности.

Однако некоторые источники, посвященные единой методологии, рассматривающей одновременно качество и энергетическую эффективность, все же были найдены. В них используются следующие методологические подходы: оценка жизненного цикла (*Life Cycle Assessment, LCA*), эталонная имитационная модель (*Benchmark Simulation Model, BSM*) и другие модели ОСК, система оценки эффективности (*Performance Assessment System, PAS*) и анализ охвата данных (*Data Envelopment Analysis, DEA*).

Методология оценки жизненного цикла описана в стандарте ISO 14040:2006 и касается экологических аспектов и потенциального воздействия на окружающую среду продуктов и процессов очистных сооружений [11]. В частности, эта методология рассматривает, помимо прочего, взаимосвязь между качеством очистки сточных вод и энергетическими аспектами, однако в целом ориентирована на оценку потенциального воздействия на окружающую среду [12].

Rebello et al. [13] провели литературный обзор 111 исследований по рассматриваемой методологии применительно к ОСК и предложили руководящие принципы, подходящие для городских сооружений.

Lopes et al. [14] представили и обсудили экологические характеристики крупных по масштабу ОСК с использованием методологии LCA, включая этапы строительства и эксплуатации ОСК.

Lorenzo-Toja et al. [15] исследовали две ОСК, расположенные в разных климатических регионах (атлантический и средиземноморский) Испании, используя подход LCA.

Chen et al. [16] использовали новый метод многофакторного глубокого изучения (*Multi Agent Deep Reinforcement Learning, MADRL*), основанный на методологии LCA, для исследования

и оптимизации растворенного кислорода и дозировки химикатов на ОСК.

Все рассмотренные рукописи включают в себя как вопросы качества очистки, так и энергоэффективности, но имеют некоторые ограничения. Метод LCA – мощный инструмент, который можно применять в самых разных случаях в зависимости от масштаба проекта. Он предоставляет огромные возможности, потому что исследователь может проанализировать любой вопрос. Однако данный метод предъявляет высокие требования к качеству проведения такого анализа, требует наличия квалифицированного персонала и специального программного обеспечения, достаточно сложен для понимания рядовым пользователем, сложно масштабируется и, наконец, отсутствует возможность проверить прямую связь между качеством очистки сточных вод и энергетической эффективностью ОСК.

Методология BSM – это среда моделирования, определяющая технологическую компоновку сооружений, имитационную модель, поступающие нагрузки, процедуры испытаний и критерии оценки. Для каждого из этих параметров в методологии были найдены компромиссы, чтобы сочетать простоту с реализмом и общепринятыми стандартами. После того как пользователь подтвердил конфигурацию моделирования, любая стратегия управления может быть протестирована, а производительность оценена в соответствии с определенным набором критериев [17].

Revollar et al. [18] предложили универсальную производственную стратегию управления с использованием методологии BSM2 (улучшенная BSM) для повышения экологической эффективности ОСК. В частности, были рассмотрены показатели эффективности, которые измеряют потенциальную выработку энергии из биогаза, потребление

электроэнергии, выбросы CO₂, производство ОСВ и нормативное качество сточных вод. Подход, предложенный данными авторами, направлен на выбор наиболее подходящей стратегии работы для конкретной ОСК и анализ большого набора показателей, включая энергию и качество. Однако прямая связь между энергоэффективностью и качеством очистки сточных вод отсутствует.

De Ketele et al. [19] анализируют стратегии эксплуатации ОСК с точки зрения перехода к вопросу утилизации ОСВ с использованием BSM по показателям эффективности – индексу качества сточных вод (*Effluent Quality Index, EQI*) и индексу операционных затрат (*Operation Cost Index, OCI*). В этой работе также отсутствует прямая связь между вопросами качества очистки и энергоэффективности.

Zaborowska et al. [20] предложили аутентичную технологическую модель для оценки энергетического баланса и выбросов парниковых газов на крупных ОСК. Модель используется для прогнозирования будущих условий с использованием ключевых показателей эффективности для измерения качества очистки сточных вод, энергии и выбросов парниковых газов, чтобы выбрать наилучшую операционную стратегию и технологическую модернизацию. Интегрированная модель имеет высокую точность прогноза, однако ее трудно масштабировать, так как требуется адаптация.

Cassidy et al. [21] и Silva et al. [22] используют методологию PAS. В них ОСК были изучены по следующим ключевым показателям: энергоэффективность (обе рукописи), эффективность и надежность (обе рукописи) и управление осадком (только первая рукопись). Предложенные инструменты имеют прекрасную интуитивную интерпретацию для разных заинтересованных сторон

и могут использоваться в качестве отраслевого эталона при проведении бенчмаркинга, однако эти показатели никак не связаны друг с другом.

Longo et al. [23] представили улучшенную методологию DEA – REED (*Robust Energy Efficiency DEA*). Другими словами, REED – это методология DEA, разработанная для ОСК. Авторы проанализировали 399 реальных ОСК с помощью данного метода и сделали вывод, что REED является очень масштабируемым инструментом, который можно использовать в качестве отраслевого эталона. Однако REED довольно сложен, поскольку имеет несколько различных условий и показателей, при этом не имеет четкой зависимости между энергоэффективностью и качеством очистки сточных вод.

Киселев и Магарил [24] предложили методику оценки эффективности водоочистки как инструмент для оценки прогресса относительно достижения принципов циркулярной экономики; обоснованы семь индикаторов циркулярности и результирующий интегральный индекс циркулярности. В набор индикаторов циркулярности входит в том числе индикатор оценки качества очистки сточных вод и индикатор оценки энергетической эффективности. Однако авторы выделяют следующие ограничения:

- сложность в оценке взаимной зависимости качества очистки сточных вод и энергетических затрат на производственный процесс;

- использование для оценки качества очистки сточных вод только показателя кратности (интенсивности) негативного воздействия загрязняющих веществ на водные объекты;

- осуществление интерпретации полученных значений качества очистки сточных вод и энергетической эффективности посредством весовых

коэффициентов без использования обоснованных методик.

Пупырев [25] подготовил глобальный обзор сферы очистки сточных вод за последние 20 лет в целом, в том числе рассмотрел критерии оценки эффективности и проблематики в данном секторе, включая вопросы менеджмента и энергоэффективности. Автор проанализировал публикации и материалы ведущих российских предприятий, университетов и известных зарубежных компаний и пришел к следующим выводам: 1) управление в области очистки сточных вод должно учитывать принципы устойчивого развития; 2) в ближайшее время развитие науки и техники выведет на рынок совершенно новые технологии и реагенты, которые позволят значительно повысить эффективность водоочистки; 3) оценка эффективности ОСК является постоянно актуальной темой, где наибольший интерес исследователей будет представлен разработкой интегральных показателей; 4) на текущий момент нет достаточного количества исследований, посвященных моделированию и оценке эффективности работы ОСК в целом, что может быть вызвано недостаточным взаимодействием научного сообщества с представителями проектных и эксплуатационных организаций.

Проведенный анализ работ представляет широкий набор инструментов, которые могут быть использованы для оценки эффективности управления на ОСК или для оценки эффективности процесса водоочистки, однако каждая из методик содержит ряд ограничений или не в полной мере подходит под решение задач настоящего исследования, в том числе:

- учитывает слишком большое количество факторов, требует высокой квалификации и существенного объема исходных данных для проведения оценки;

- не подходит под специфику отрасли водоочистки;
- отсутствует взаимосвязь между качеством водоочистки и энергетическими затратами на производственный процесс;
- имеет низкую практическую значимость.

3. Материалы и методы исследования

3.1. Область исследования

В рамках поставленных цели и задач авторы исследовали централизованную систему водоотведения города Екатеринбурга. Екатеринбург – крупнейший промышленный, научный и торговый центр Российской Федерации, расположенный на границе Европы и Азии. Город является четвертым по численности в Российской Федерации с населением почти 1,5 млн жителей. Общая протяженность сетей канализации в одноканальном исчислении составляет более 1 500 км, которые располагаются в двух основных бассейнах канализования: северном и южном. Каждый бассейн канализования имеет свои ОСК: Северная аэрационная станция и Южная аэрационная станция.

Почти 85 % всего притока сточных вод из города поступает на Южную аэрационную станцию. Эти сооружения были спроектированы в начале 1970-х гг. и введены в эксплуатацию в 1975 г. Станция имеет традиционную двухступенчатую технологию очистки (механическую и биологическую очистку) с дезинфекцией хлором перед сбросом в водный объект-приемник. Сырой осадок и избыточно-активный ил подается в цех механического обезвоживания, где доводится до влажности 75%. Полученный кек вывозится автомобильным транспортом для размещения на полигонах захоронения. Максимальная проектная производительность Южной станции по притоку

составляет 550 тыс. м³/сут. С начала работы сооружения практически не подвергались модернизации или реконструкции и на сегодняшний день данные ОСК морально и технически устарели. Отсутствуют современные энергоэффективные решения. Более того, некоторые бетонные отстойники и бассейны аэрации начали деградировать и разрушаться из-за агрессивного воздействия сточных вод (в частности, из-за воздействия кислотной среды – H₂SO₄).

Оставшиеся сточные воды поступают из города на Северную аэрационную станцию. Данные ОСК также были введены в эксплуатацию в 70-х гг. прошлого столетия и имеют аналогичный технологический процесс очистки сточных вод. Однако в 2002–2008 гг. на Северной станции проведена глобальная модернизация с внедрением наилучших доступных технологий, в том числе вращающихся барабанных решеток тонкой очистки, песколовок с аэрацией, аэротенков с нитрификацией и денитрификацией, УФ-обеззараживанием перед сбросом в водный объект-приемник и др. ОСВ, получаемый в процессе очистки сточных вод, подается в два метантенка с максимальным объемом 5000 м³, где проходит анаэробное (мезофильное) сбраживание с выработкой биогаза. После метантенков осадок сточных вод обезвоживается с применением камерных фильтр-прессов, а биогаз утилизируется для выработки энергии. Текущий технологический процесс на Северной станции соответствует базовым принципам циркулярной экономики.

3.2. Методология исследования

Оценка эффективности работы очистных сооружений должна включать в себя три этапа:

- 1) оценка качества очистки сточных вод;
- 2) оценка энергетической эффективности очистки сточных вод;

3) построение корреляционной матрицы зависимости качества/энергоэффективности ОСК.

3.2.1. Методический подход к оценке качества очистки сточных вод

Авторами определено шесть критических загрязняющих веществ, оказывающих наибольшее загрязняющее действие при поступлении в водный объект вместе с недостаточно очищенными сточными водами. Эти загрязняющие вещества были упомянуты в работе Киселева и Магарил [26], включая (i) взвешенные вещества; (ii) биохимическую потребность в кислороде за 20 дней (BPK_{20}); (iii) фосфор фосфатов; (iv) нитрат-ион; (v) нитрит-ион; и (vi) азот аммонийный.

Согласно рекомендациям Рукавишниковой и др. [27], авторы использовали годовые маркеры кратности и повторяемости для проб сточных вод, отобранных в рамках производственного лабораторного контроля. Маркер кратности i -го загрязняющего вещества MP_i рассчитывается следующим образом:

$$MP_i = \frac{F_i^p}{ПДК_i^p}, \quad (1)$$

где F_i^p – фактическая среднегодовая концентрация i -го загрязняющего вещества (mg/dm^3) и $ПДК_i^p$ – предельно-допустимая концентрация (ПДК) i -го загрязняющего вещества (mg/dm^3).

Маркер повторяемости i -го загрязняющего вещества R_i рассчитывается следующим образом:

$$R_i = \frac{N_i^{ex}}{N_i}, \quad (2)$$

где N_i^{ex} – годовое количество отобранных проб i -го загрязняющего вещества, которое превышает ПДК (ед.) и N_i – годовое количество всех отобранных проб i -го загрязняющего вещества (ед.).

Авторы предложили использовать весовой коэффициент (AV, табл. 1) для определения фактора кратности/повторяемости каждого выбранного загрязняющего вещества.

В табл. 1 за основу была выбрана классификация качества воды в водных объектах, проведенная на основе значений удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ). Эта классификация представлена в руководящем документе¹, анализ которого проведен авторами [28].

Итоговый весовой коэффициент (RAV) по всем шести загрязняющим веществам рассчитывается следующим образом:

$$RAV = \frac{\sum_{i=1}^6 AV_i}{6}. \quad (3)$$

¹РД 52.24.643-2002 «Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям». <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293831/4293831806.pdf>

Таблица 1. Весовые коэффициенты для оценки качества очистки сточных вод
Table 1. Weight coefficients for assessing the quality of wastewater treatment

Кратность / повторяемость	$MP \leq 1$	$1 < MP \leq 2$	$2 < MP \leq 10$	$MP > 10$
0,0–0,1	1	1	0,6	0,25
0,1–0,3	1	0,9	0,5	0,2
0,3–0,5	0,95	0,8	0,4	0,1
0,5–1,0	0,9	0,7	0,25	0

3.2.2. Методический подход к оценке повышения энергетической эффективности очистки сточных вод

Для обеспечения работы всех узлов и механизмов на ОСК требуется поставка значительных энергетических ресурсов. Энергетический бенчмаркинг в сфере очистки сточных вод является мощным инструментом управления для постоянного совершенствования деятельности [29]. Согласно Gurgung et al. [6], одним из наиболее популярных показателей энергетической эффективности является среднее потребление энергии на единицу пропущенных через ОСК сточных вод (q), которое рассчитывается следующим образом:

$$q = \frac{P_{\text{сеть}}}{V}, \quad (4)$$

где $P_{\text{сеть}}$ – энергия, поступившая из сети (кВт×ч/год), и V – общий объем сточных вод, пропущенных через ОСК (м³/год).

Применение соответствующих практик циркулярной экономики на ОСК подразумевает оценку показателя нетто-энергопотребления. Согласно Киселеву и др. [30], средний удельный показатель нетто-энергопотребления ($q_{\text{нет}}$) рассчитывается следующим образом:

$$q_{\text{нет}} = \frac{P_{\text{сеть}} - P_{\text{ген}}}{V}, \quad (5)$$

где $P_{\text{ген}}$ – энергия, произведенная ОСК за счет собственной генерации (кВт×ч/год).

3.2.3. Индекс устойчивости и корреляционная матрица

Последним этапом методологии является оценка взаимосвязи между качеством очистки на ОСК и затратами на электроэнергию. Авторы предложили корреляционную матрицу, которая содержит пограничные значения как для энергоэффективности, так и для качества очистки.

Выходные данные по качеству очистки и энергоэффективности, полученные с помощью уравнений (3)–(5), наносятся на матрицу (график) по соответствующим осям. Полученное значение попадает в определенный квадрант. Шаблон корреляционной матрицы представлен в табл. 2.

4. Результаты

Образцы сточных вод были отобраны с помощью производственного лабораторного контроля, проанализированы по шести основным загрязняющим веществам и усреднены до годовых значений (рис. 1).

Показатель $ПДК_i^p$ устанавливается местными органами власти, ответственными за охрану окружающей среды, для каждой ОСК с учетом нескольких критериев, поэтому на рис. 1 приводятся разные значения показателя в разрезе ОСК и разных отчетных периодов. Показатели кратности и повторяемости были рассчитаны с использованием уравнений (1) и (2) (рис. 2).

Первый элемент корреляционной пары зависимостей качество очистки/энергетическая эффективность был получен с помощью весовых коэффициентов для оценки качества очистки сточных вод, описанных в табл. 1 (рис. 3).

Второй элемент корреляционной пары зависимостей качество очистки/энергетическая эффективность был получен с использованием уравнений (4) и (5) (рис. 4).

Можно наблюдать одинаковые значения q и $q_{\text{нет}}$ для Северной и Южной аэрационных станций на всем рассматриваемом периоде, за исключением 2018 г. Процесс анаэробного сбраживания на Северной станции недавно был внедрен с утилизацией биогаза на когенерационной установке. В 2018 г. этот блок еще не достроен. Тем не менее авторы сделали небольшую аппроксимацию

Таблица 2. Корреляционная матрица зависимостей качества очистки и энергетической эффективности

Table 2. Correlation matrix of dependences of cleaning quality and energy efficiency

Удельный показатель энергопотребления	Итоговый весовой коэффициент оценки качества водоочистки				
	$RAV \leq 0,2$	$0,2 < RAV \leq 0,4$	$0,4 < RAV \leq 0,6$	$0,6 < RAV \leq 0,8$	$0,8 < RAV \leq 1$
$q > 0,9$					
$0,8 < q \leq 0,9$					
$0,7 < q \leq 0,8$					
$0,6 < q \leq 0,7$					
$0,5 < q \leq 0,6$					
$0,4 < q \leq 0,5$					
$0,3 < q \leq 0,4$					
$0,2 < q \leq 0,3$					
$0,1 < q \leq 0,2$					
$q \leq 0,1$					

Для оценки текущего результата на корреляционной матрице используется цветовая индикация квадрантов, которая имеет следующую интерпретацию: темно-зеленый – отличный результат; зеленый – хороший результат; желтый – средний результат; оранжевый – неудовлетворительный результат; красный – критический результат.

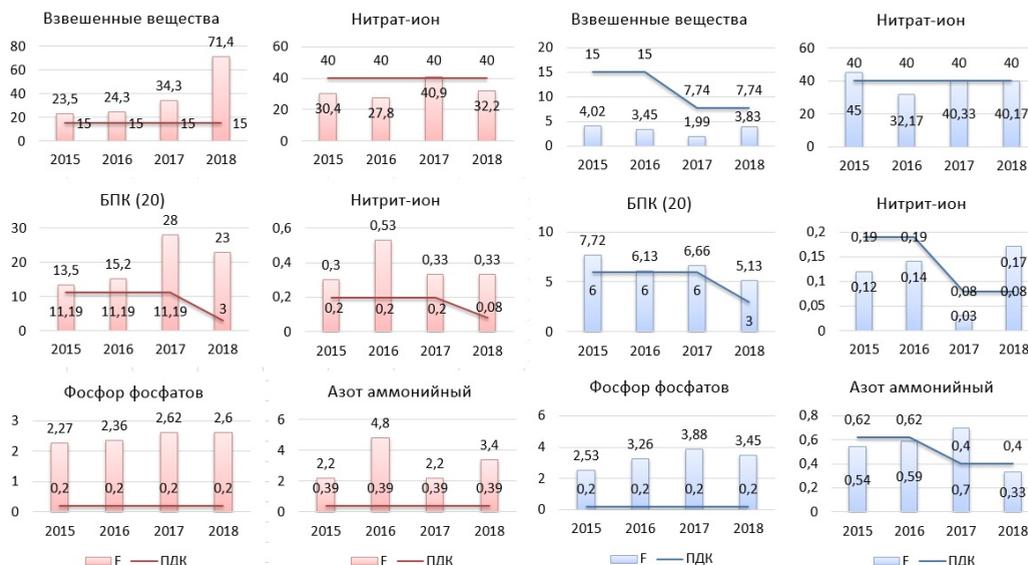


Рис. 1. Результаты анализа проб сточных вод для Северной (синий цвет) и Южной (красный цвет) аэрационных станций за 2015–2018 гг.

Figure 1. Results of analysis of wastewater samples for the North (blue) and South (red) aeration stations for 2015–2018

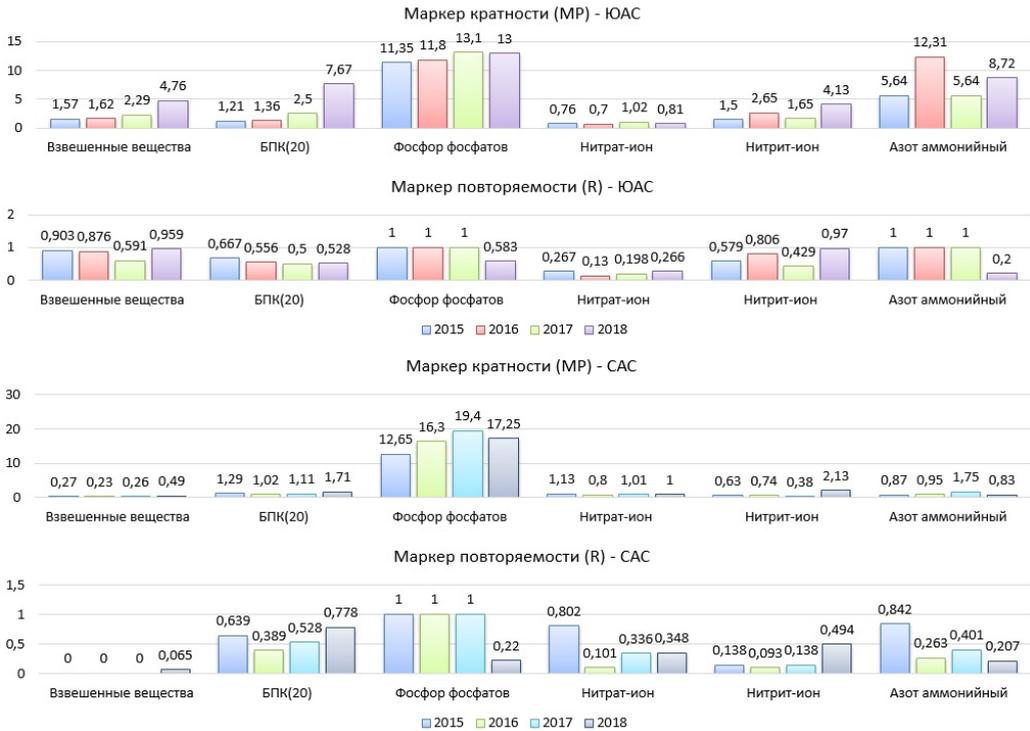


Рис. 2. Полученные результаты по кратности и повторяемости для Южной аэрационной станции

Figure 2. Results obtained in terms of multiplicity and repeatability for the South aeration station

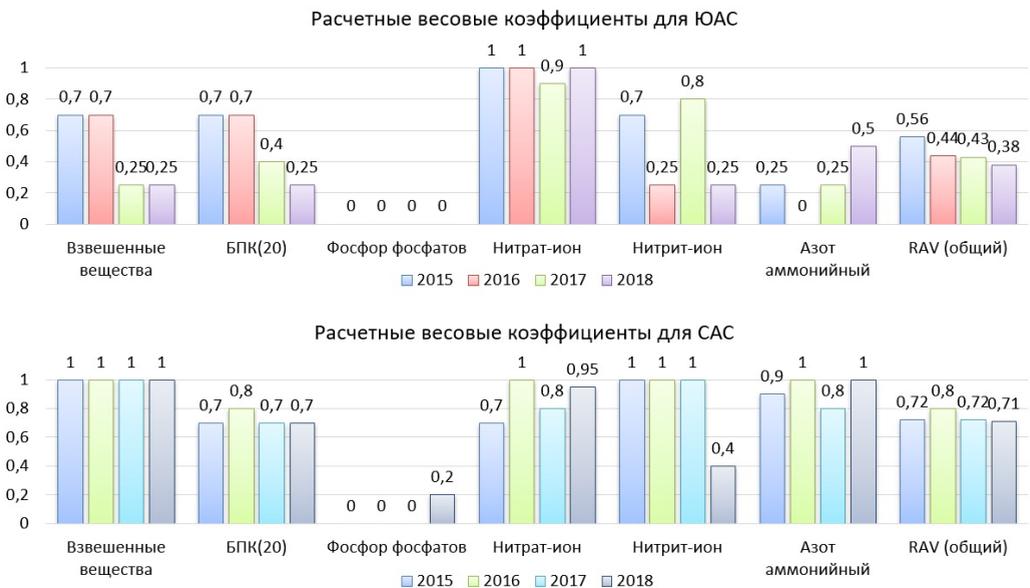


Рис. 3. Расчетные весовые коэффициенты AV и RAV для Северной и Южной аэрационных станций

Figure 3. Calculated weighting factors AV and RAV for the North and South aeration stations

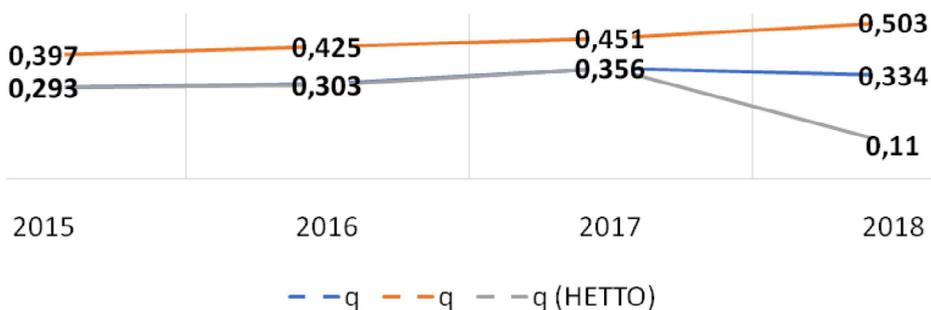


Рис. 4. Результаты q и q_{net} для Северной и Южной аэрационных станций
Figure 4. q and q_{net} results for North and South aeration stations

для показателя и использовали проектную производительность ($\text{кВт} \times \text{ч}$) в качестве исходных данных.

В соответствии с описанной методологией, авторы сделали последний шаг и перевели полученные данные в табличное представление (табл. 3).

В сравнении с ранее разработанными методологическими подходами, основанными на методе оценки жизненного

цикла (LCA), представленные в работах Li et al. [12], Rebello et al. [13], Lopes et al. [14] и Lorenzo-Toja et al. [15], предлагаемый в настоящем исследовании подход представляет более наглядное графическое отображение текущего положения дел на ОСК и интуитивно-понятную интерпретацию итогов.

Нет сомнений в том, что переход в зеленую зону для Южной аэрационной

Таблица 3. Корреляционная матрица зависимостей качества очистки и энергетической эффективности с результатами исследования*

Table 3. Correlation matrix of dependences of cleaning quality and energy efficiency with the results of the study

	$RAV \leq 0,2$	$0,2 < RAV \leq 0,4$	$0,4 < RAV \leq 0,6$	$0,6 < RAV \leq 0,8$	$0,8 < RAV \leq 1$
$q > 0,9$					
$0,8 < q \leq 0,9$					
$0,7 < q \leq 0,8$					
$0,6 < q \leq 0,7$					
$0,5 < q \leq 0,6$		ЮАС 18			
$0,4 < q \leq 0,5$			ЮАС 16, 17		
$0,3 < q \leq 0,4$			ЮАС 15	САС 16, 17, 18	
$0,2 < q \leq 0,3$				САС 15	
$0,1 < q \leq 0,2$				САС 18 (q НЕТТО)	
$q \leq 0,1$					

Примечание: для Северной аэрационной станции – синий шрифт для q и голубой для q_{net} ; для Южной аэрационной станции – красный шрифт для q ; отчетный период указывается в формате XX после наименования ОСК, где XX – две последние цифры года

станции требует проведения глобальных мероприятий по модернизации всего технологического процесса ОСК.

5. Обсуждение

Рассуждая о возможных стратегиях в эксплуатации ОСК на основе полученных результатов в различных цветовых зонах корреляционной матрицы, можно выделить следующие особенности:

Темно-зеленая зона: технология очистки сточных вод обеспечивает максимальную эффективность при минимальном потреблении электрической энергии (из сети) – это наиболее устойчивый результат, который в большей степени может быть достигнут при использовании перспективных технологий преобразования отходов в энергию. Лучшим примером является использование технологии анаэробного сбраживания осадка сточных вод с получением биогаза, который затем используется в мини-ТЭЦ для выработки электрической и тепловой энергии.

Еще одной хорошей практикой является применение технологии пиролиза. Помимо обеспечения высокой энергоэффективности с использованием возобновляемых источников энергии для собственного потребления (и даже для отпуска излишков электроэнергии в сеть), эти технологии решают проблему обработки и утилизации осадка сточных вод.

Однако предлагаемый методический подход имеет некоторые ограничения, так как не учитывает выбросы загрязняющих веществ в результате функционирования ОСК в атмосферный воздух. Говоря о воздействии на окружающую среду, авторы в данном исследовании уделили особое внимание водопользованию, поскольку воздействие, которое ОСК оказывает на водные объекты, значительно превышает воздействие на любые другие среды.

Зеленая зона: также считается достаточно устойчивым результатом. Попадание в зеленую зону означает, что на ОСК либо имеется эффективная технология очистки, которая позволяет обеспечить нормативное качество сбрасываемых сточных вод, но без применения современных энергоэффективных практик, либо наоборот: имеются определенные ограничения (технологические или организационные) в достижении установленных нормативов по ряду показателей; при этом на ОСК применяются современные энергоэффективные решения.

Желтая зона: указывает на удовлетворительные показатели качества очищенных сточных вод, но наблюдаются крайне высокие затраты на электроэнергию, которые не отвечают современным стандартам энергетической эффективности.

Оранжевые и красные зоны: указывают на общую низкую и даже угрожающую эффективность ОСК, что требует немедленного реагирования. Эти коммунальные предприятия сбрасывают сточные воды со значительным превышением установленных нормативов для допустимого сброса, а энергозатраты в данном контексте значения уже не имеют. Необходимо срочно провести аудит и принять соответствующие управленческие решения.

Рассмотренная в разделе 2 методология BSMи BSM2 в сравнении с настоящим подходом обладает гораздо более высокой точностью, однако ее применение в изменяющихся условиях трудозатратно и требует наличия специализированного программного обеспечения и соответствующей квалификации персонала, а при использовании для нужд бенчмаркинга становится не целесообразным.

Корреляционная матрица зависимостей качество очистки/энергетическая

эффективность имеет доступное видение ретроспективы по нескольким ОСК, однако визуализация сотен очистных сооружений приведет к ухудшению читаемости. В этом случае можно использовать опыт Longo et al. [23], когда интегрированные результаты представляются с помощью гистограммы – это может быть отличным решением в текущей ситуации.

Оценка эффективности работы ОСК при переходе отрасли водопроводно-канализационного хозяйства к экономике замкнутого цикла, основным принципом которой является 3R подход «reduce – reuse – recycle» (сокращать – повторно использовать – перерабатывать), невозможно без взаимного учета вопросов качества водоочистки и энергозатрат, что подтверждает поставленную гипотезу исследования.

Методологический подход к оценке взаимосвязи энергетических и экологических факторов также может быть использован в других отраслях народного хозяйства в качестве элемента эколого-экономической оценки, например в энергетическом секторе, который характеризуется высокой ресурсо- и природоемкостью. Достижение экологической нейтральности и высоких показателей энергоэффективности обеспечивает переход энергетических объектов к принципам циркулярной экономики, а возможность сопоставлять хозяйствующие субъекты между собой и выявлять лидеров отрасли позволяет значительно ускорить эти процессы.

Настоящая работа создает научный задел для проведения дополнительных исследований с целью формирования набора метрик и инструментов оценки эффективности операционной и инвестиционной деятельности как отдельных сетевых организаций, так и административно-территориальных единиц и даже отрасли в целом, а оценка может

иметь ретроспективный или перспективный (прогнозный, с учетом альтернативных сценариев развития) характер.

6. Заключение

Результаты проведенного исследования подтвердили гипотезу исследования – предлагаемый индекс устойчивости и его интерпретация коррелируют с техническим состоянием сооружений и эффективностью их работы как в части достижения нормативного качества очистки, так и в части энергетической эффективности всего процесса.

Рейтинг Северной аэрационной станции попадает в зеленую зону благодаря недавним мероприятиям по модернизации сооружений. Однако имеются предпосылки перехода в темно-зеленую зону за счет реализации лучших практик циркулярной экономики (в частности, рекомендовано увеличить интенсивность процесса анаэробного сбраживания осадка сточных вод с увеличением выработки биогаза и генерации тепловой и электрической энергии на мини-ТЭЦ).

Деятельность Южной аэрационной станции в рассматриваемый период имеет неудовлетворительный рейтинг, и с 2015 г. ситуация постоянно ухудшается: рейтинг за последний год наблюдений вышел в красную зону. Основными факторами такой негативной тенденции являются ухудшение качества очистки сточных вод за счет серьезного физического износа бетонных бассейнов и оборудования, а также увеличение удельных энергозатрат на технологический процесс (так как общее количество очищенных сточных вод уменьшилось). Ключевым управленческим решением для действующих канализационных очистных сооружений является проведение полной модернизации с внедрением наилучших доступных технологий и лучших практик циркулярной экономики с учетом положительного

опыта реконструкции Северной аэрационной станции.

Предложенный методологический подход для оценки корреляционной зависимости экологических и энергетических характеристик процесса очистки сточных вод создает сильный, но в то же время простой инструмент для менеджеров. С его помощью можно оценить текущий успех в работе очистных сооружений канализации при переходе к принципам устойчивого развития и циркулярной экономики. Более того, применение данного подхода не ограничивается только рассматриваемой отраслью: он может быть использован в качестве элемента эколого-экономической оценки на энергетических объектах, включая объекты малой генерации и объекты, работающие

на возобновляемых источниках энергии (например, биогазовые мини-ТЭЦ).

Описанный инструмент интуитивно понятен и прост для широкого круга стейкхолдеров. Сопоставление результатов текущего года с предыдущими позволяет объективно оценить работу как коллектива, так и самого руководителя. Графическая визуализация результатов работы очистных сооружений канализации может быть использована в качестве отраслевой системы национального бенчмаркинга в качестве общей платформы для непрерывного совершенствования деятельности, основанного на поиске и внедрении лучших практик, а также в качестве инструмента для общественного контроля над деятельностью по очистке сточных вод и внедрением практик циркулярной экономики.

Список использованных источников

1. *Ostoich M., Serena F., Zacchello C., Falletti L., Zambon M., Tomiato L.* Discharge quality from municipal wastewater treatment plants and the Sludge Biotic Index for activated sludge: Integrative assessment // *Water Practice and Technology*. 2017. Vol. 12, Issue 4. Pp. 857–870. DOI: <https://doi.org/10.2166/wpt.2017.092>.
2. *Huang B., He C., Fan N., Jin R., Yu H.* Envisaging wastewater-to-energy practices for sustainable urban water pollution control: Current achievements and future prospects // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 134. P. 110134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110134>.
3. *Mor J., Dolédec S., Acuña V., Sabater S., Muñoz I.* Invertebrate community responses to urban wastewater effluent pollution under different hydro-morphological conditions // *Environmental Pollution*. 2019. Vol. 252, Part A. Pp. 483–492. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.114>.
4. *Zaborowska E., Czerwionka K., Makinia J.* Strategies for achieving energy neutrality in biological nutrient removal systems – a case study of the Slupsk WWTP (northern Poland) // *Water Science & Technology*. 2017. Vol. 75, Issue 3. Pp. 727–740. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2016.564>.
5. *Siatou A., Manali A., Gikas P.* Energy Consumption and Internal Distribution in Activated Sludge Wastewater Treatment Plants of Greece // *Water*. 2020. Vol. 12, Issue 4. P. 1204. DOI: <https://doi.org/10.3390/W12041204>.
6. *Gurung K., Tang W., Sillanpää M.* Unit Energy Consumption as Benchmark to Select Energy Positive Retrofitting Strategies for Finnish Wastewater Treatment Plants (WWTPs): A Case Study of Mikkeli WWTP // *Environmental Processes*. 2018. Vol. 5. Pp. 667–681. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40710-018-0310-y>.
7. *Valenti F., Toscano A.* A GIS-based Model to Assess the Potential of Wastewater Treatment Plants for Enhancing Bioenergy Production within the Context of Water-Energy Nexus // *Energies*. 2021. Vol. 14, Issue 10. P. 2838. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14102838>.

8. Borzooei S., Campo G., Cerutti A., Meucci L., Panepinto D., Ravina M., Riggio V., Ruffino B., Scibilia G., Zanetti M. Feasibility Analysis for Reduction of Carbon Footprint in a Wastewater Treatment Plant // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 271. P. 122526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122526>.
9. Shrestha B., Hernandez R., Fortela D., Sharp W., Chistoserdov A., Gang D., Revellame E., Holmes W., Zappi M. A Review of Pretreatment Methods to Enhance Solids Reduction during Anaerobic Digestion of Municipal Wastewater Sludges and the Resulting Digester Performance: Implications to Future Urban Biorefineries // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, Issue 24. P. 9141. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10249141>.
10. Fighir D., Teodosiu C., Fiore S. Environmental and Energy Assessment of Municipal Wastewater Treatment Plants in Italy and Romania: A Comparative Study // *Water*. 2019. Vol. 11, Issue 8. P. 1611. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11081611>.
11. Raghuvanshi S., Bhakar V., Sowmya C., Sangwan K. S. Waste Water Treatment Plant Life Cycle Assessment: Treatment Process to Reuse of Water // *Procedia CIRP*. 2017. Vol. 61. Pp. 761–766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.170>.
12. Li Y., Luo X., Huang X., Wang D., Zhang W. Life Cycle Assessment of a municipal wastewater treatment plant: A case study in Suzhou, China // *Journal of Cleaner Production*. 2013. Vol. 57. Pp. 221–227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.035>.
13. Rebello T., Roque R., Goncalves R., Calmon J., Queiroz L. Life cycle assessment of urban wastewater treatment plants: A critical analysis and guideline proposal // *Water Science & Technology*. 2021. Vol. 83, Issue 3. Pp. 501–514. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.608>.
14. Lopes T., Queiroz L., Torres E., Kiperstok A. Low complexity wastewater treatment process in developing countries: A LCA approach to evaluate environmental gains // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 720. P. 137593. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137593>.
15. Lorenzo-Toja Y., Alfonsin C., Amores M., Aldea X., Marin D., Moreira M., Feijoo G. Beyond the conventional life cycle inventory in wastewater treatment plants // *Science of The Total Environment*. 2016. Vol. 553. Pp. 71–82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.073>.
16. Chen K., Wang H., Valverde-Perez B., Zhai S., Vezzaro L., Wang A. Optimal control towards sustainable wastewater treatment plants based on multi-agent reinforcement learning // *Chemosphere*. 2021. Vol. 279. P. 130498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130498>.
17. Alex J., Benedetti L., Copp J., Gernaey K. V., Jeppsson U., Nopens I., Pons M.-N., Rieger L., Rosen C., Steyer J. P., Vanrolleghem P., Winkler S. Benchmark Simulation Model no. 1 (BSM1). Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation Lund University, 2008. URL: <https://www.iea.lth.se/publications/Reports/LTH-IEA-7229.pdf>.
18. Revollar S., Meneses M., Vilanova R., Vega P., Francisco M. Eco-Efficiency Assessment of Control Actions in Wastewater Treatment Plants // *Water*. 2021. Vol. 13, Issue 5. P. 612. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13050612>.
19. De Ketele J., Davister D., Ikumi D. Applying performance indices in plantwide modelling for a comparative study of wastewater treatment plant operational strategies // *Water SA*. 2018. Vol. 44, No. 4. Pp. 539–550. DOI: <https://doi.org/10.4314/wsa.v44i4.03>.
20. Zaborowska E., Czerwionka K., Makinia J. Integrated plant-wide modelling for evaluation of the energy balance and greenhouse gas footprint in large wastewater treatment plants // *Applied Energy*. 2021. Vol. 282, Part A. P. 116126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116126>.
21. Cassidy J., Silva T., Semiao N., Ramalho P., Santos A., Feliciano J. Improving wastewater treatment plants operational efficiency and effectiveness through an integrated performance assessment system // *H₂Open Journal*. 2020. Vol. 3, No. 1. Pp. 276–287. DOI: <https://doi.org/10.2166/h2oj.2020.007>.
22. Silva C., Saldanha Matos J., Rosa M. A comprehensive approach for diagnosing opportunities for improving the performance of WWTP // *Water Science & Technology*. 2016. Vol. 74, Issue 12. Pp. 2935–2945. DOI: [10.2166/wst.2016.432](https://doi.org/10.2166/wst.2016.432).

23. Longo S., Hospido A., Lema J. M., Mauricio-Iglesias M. A systematic methodology for the robust quantification of energy efficiency at wastewater treatment plants featuring Data Envelopment Analysis // *Water Research*. 2018. Vol. 141. Pp. 317–328. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.04.067>.
24. Киселев А. В., Магарил Е. Р. Обеспечение эффективности водоочистки в условиях циркулярной экономики как элемент эколого-экономической безопасности территорий // *Вестник УРФУ. Серия экономика и управление*. 2019. Т. 18, № 6. С. 911–929. DOI: <https://doi.org/10.15826/vestnik.2019.18.6.044>.
25. Пуньрев Е. И. Сбор и очистка хозяйственно-бытовых сточных вод: критический обзор достигнутых результатов // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14, № 11. С. 1365–1407. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.11.1365-1407>.
26. Kiselev A., Magaril E., Rada E. C. Energy and sustainability assessment of municipal wastewater treatment under circular economy paradigm // *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2019. Vol. 237. Pp. 109–120. DOI: <https://doi.org/10.2495/ESUS190101>.
27. Rukavishnikova I., Kiselev A., Berezyuk M., Ashirova I. Improvement of the methodology for assessing domestic wastewater treatment quality using benchmarking tools // *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2018. Vol. 228. Pp. 209–219. DOI: <https://doi.org/10.2495/WP180211>.
28. Валиев В. С., Иванов Д. В., Шагидуллин Р. Р., Шамаев Д. Е., Мустафина Л. К., Шурмина Н. В., Абуллина Ф. М., Богданова О. А., Зиганшин И. И. Оценка вклада загрязняющих веществ в формирование класса загрязненности поверхностных вод // *Российский журнал прикладной экологии*. 2018. № 3. С. 57–64.
29. Belloir C., Stanford C., Soares A. Energy benchmarking in wastewater treatment plants: The importance of site operation and layout // *Environmental Technology*. 2015. Vol. 36, Issue 2. Pp. 260–269. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.951403>.
30. Киселев А. В., Магарил Е. Р., Глушанкова И. С., Рудакова Л. В. Оценка технологий обработки осадков сточных вод в условиях перехода к циркулярной экономике // *Journal of Applied Economic Research*. 2020. Т. 19, № 3. С. 329–347. DOI: <https://doi.org/10.15826/vestnik.2020.19.3.016>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Киселев Андрей Владимирович

Младший научный сотрудник кафедры экономики природопользования Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19); ORCID 0000-0002-4199-2582; e-mail: ipkiselyov@mail.ru.

Магарил Елена Роменовна

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой экономики природопользования Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19); ORCID 0000-0003-3034-9978; e-mail: magaril67@mail.ru.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-28-01740, <https://rscf.ru/project/22-28-01740/>.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Киселев А. В., Магарил Е. Р. Оценка взаимосвязи экологических и энергетических характеристик процесса очистки сточных вод в условиях перехода к циркулярной экономике // Journal of Applied Economic Research. 2023. Т. 22, № 1. С. 99–119. <https://doi.org/10.15826/vestnik.2023.22.1.005>.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

Дата поступления 27 сентября 2022 г.; дата поступления после рецензирования 8 ноября 2022 г.; дата принятия к печати 22 ноября 2022 г.

Correlation Assessment of Environmental and Energy Features of Wastewater Treatment Plants Towards Circular Economy

Andrey V. Kiselev , Elena R. Magaril  

Ural Federal University
named after the First President of Russia B. N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russia
 magaril67@mail.ru

Abstract. Wastewater treatment plays an important role in ensuring ecological safety for water bodies. The achievement of the standard quality of wastewater treatment is being fulfilled through the introduction of the best available techniques. However, the process of wastewater treatment and sludge utilization itself is quite energy intensive. In the course of investment program planning and implementation, corporate managers and local authorities often focus on individual tasks such as how to improve the wastewater treatment quality or to improve energy efficiency; these factors are, however, however inter-related. Achieving the standard quality of wastewater treatment through the introduction of best available techniques and an increase in the number of technological stages usually leads to an increase in the overall energy consumption of the facilities. The hypothesis of the research suggests that the performance assessment of wastewater treatment plants needs mutual accounting of two main factors: wastewater treatment quality and energy efficiency. The main purpose of this work is to develop a methodological approach for assessing the effectiveness of wastewater treatment plants on the way towards the implementation of circular economy principles, followed by its trial application. The authors proposed a methodological framework that consists of three stages: (1) assessing the quality of wastewater treatment, (2) assessing energy efficiency, and (3) constructing a sustainability index on a correlation matrix. The outputs of the operation activities of wastewater treatment plants in Yekaterinburg for 2015–2018 were used for methodological framework approbation. The results of the investigation develop existing knowledge regarding the assessment of the effectiveness of management at treatment facilities and confirm the research hypothesis: the obtained values of the sustainable index correlate with the technical condition of the facilities both in terms of the achievement of the standard treatment quality the energy efficiency of the technological process. The practical significance of the study lies in the creation of a convenient and simple management tool for assessing the current success of wastewater treatment plants and progress in implementing successful circular economy practices. The proposed approach can be used as an element of environmental and economic assessment in the energy sector.

Key words: wastewater; sustainable management; circular economy; benchmark; energy.

JEL Q56

References

1. Ostoich, M., Serena, F., Zacchello, C., Falletti, L., Zambon, M., Tomiato, L. (2017). Discharge quality from municipal wastewater treatment plants and the Sludge Biotic Index for activated sludge: Integrative assessment. *Water Practice and Technology*, Vol. 12, Issue 4, 857–870. DOI: <https://doi.org/10.2166/wpt.2017.092>.
2. Huang, B., He, C., Fan, N., Jin, R., Yu, H. (2020). Envisaging wastewater-to-energy practices for sustainable urban water pollution control: Current achievements and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 134, 110134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110134>.

3. Mor, J., Dolédec, S., Acuña, V., Sabater, S., Muñoz, I. (2019). Invertebrate community responses to urban wastewater effluent pollution under different hydro-morphological conditions. *Environmental Pollution*, Vol. 252, Part A, 483–492. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.114>.
4. Zaborowska, E., Czerwionka, K., Makinia, J. (2017). Strategies for achieving energy neutrality in biological nutrient removal systems – a case study of the Slupsk WWTP (northern Poland). *Water Science & Technology*, Vol. 75, Issue 3, 727–740. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2016.564>.
5. Siatou, A., Manali, A., Gikas, P. (2020). Energy Consumption and Internal Distribution in Activated Sludge Wastewater Treatment Plants of Greece. *Water*, Vol. 12, Issue 4, 1204. DOI: <https://doi.org/10.3390/W12041204>.
6. Gurung, K., Tang, W., Sillanpää, M. (2018). Unit Energy Consumption as Benchmark to Select Energy Positive Retrofitting Strategies for Finnish Wastewater Treatment Plants (WWTPs): A Case Study of Mikkeli WWTP. *Environmental Processes*, Vol. 5, 667–681. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40710-018-0310-y>.
7. Valenti, F., Toscano, A. (2021). A GIS-based Model to Assess the Potential of Wastewater Treatment Plants for Enhancing Bioenergy Production within the Context of Water-Energy Nexus. *Energies*, Vol. 14, Issue 10, 2838. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14102838>.
8. Borzooei, S., Campo, G., Cerutti, A., Meucci, L., Panepinto, D., Ravina, M., Riggio, V., Ruffino, B., Scibilia, G., Zanetti, M. (2020). Feasibility Analysis for Reduction of Carbon Footprint in a Wastewater Treatment Plant. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 271, 122526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122526>.
9. Shrestha, B., Hernandez, R., Fortela, D., Sharp, W., Chistoserdov, A., Gang, D., Revellame, E., Holmes, W., Zappi, M. (2020). A Review of Pretreatment Methods to Enhance Solids Reduction during Anaerobic Digestion of Municipal Wastewater Sludges and the Resulting Digester Performance: Implications to Future Urban Biorefineries. *Applied Sciences*, Vol. 10, Issue 24, 9141. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10249141>.
10. Fighir, D., Teodosiu, C., Fiore, S. (2019). Environmental and Energy Assessment of Municipal Wastewater Treatment Plants in Italy and Romania: A Comparative Study. *Water*, Vol. 11, Issue 8, 1611. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11081611>.
11. Raghuvanshi, S., Bhakar, V., Sowmya, C., Sangwan, K.S. (2017). Waste Water Treatment Plant Life Cycle Assessment: Treatment Process to Reuse of Water. *Procedia CIRP*, Vol. 61, 761–766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.170>.
12. Li, Y., Luo, X., Huang, X., Wang, D., Zhang, W. (2013). Life Cycle Assessment of a municipal wastewater treatment plant: A case study in Suzhou, China. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 57, 221–227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.035>.
13. Rebello, T., Roque, R., Goncalves, R., Calmon, J., Queiroz, L. (2021). Life cycle assessment of urban wastewater treatment plants: A critical analysis and guideline proposal. *Water Science & Technology*, Vol. 83, Issue 3, 501–514. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.608>.
14. Lopes, T., Queiroz, L., Torres, E., Kiperstok, A. (2020). Low complexity wastewater treatment process in developing countries: A LCA approach to evaluate environmental gains. *Science of The Total Environment*, Vol. 720, 137593. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137593>.
15. Lorenzo-Toja, Y., Alfonsin, C., Amores, M., Aldea, X., Marin, D., Moreira, M., Feijoo, G. (2016). Beyond the conventional life cycle inventory in wastewater treatment plants. *Science of The Total Environment*, Vol. 553, 71–82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.073>.
16. Chen, K., Wang, H., Valverde-Perez, B., Zhai, S., Vezzano, L., Wang, A. (2021). Optimal control towards sustainable wastewater treatment plants based on multi-agent reinforcement learning. *Chemosphere*, Vol. 279, 130498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130498>.
17. Alex, J., Benedetti, L., Copp, J., Gernaey, K.V., Jeppsson, U., Nopens, I., Pons, M.-N., Rieger, L., Rosen, C., Steyer, J.P., Vanrolleghem, P., Winkler, S. (2008). *Benchmark Simulation*

Model no. 1 (BSMI). Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation Lund University. Available at: <https://www.iea.lth.se/publications/Reports/LTH-IEA-7229.pdf>.

18. Revollar, S., Meneses, M., Vilanova, R., Vega, P., Francisco, M. (2021). Eco-Efficiency Assessment of Control Actions in Wastewater Treatment Plants. *Water*, Vol. 13, Issue 5, 612. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13050612>.

19. De Ketele, J., Davister, D., Ikumi, D. (2018). Applying performance indices in plantwide modelling for a comparative study of wastewater treatment plant operational strategies. *Water SA*, Vol. 44, No. 4, 539–550. DOI: <https://doi.org/10.4314/wsa.v44i4.03>.

20. Zaborowska, E., Czerwionka, K., Makinia, J. (2021). Integrated plant-wide modelling for evaluation of the energy balance and greenhouse gas footprint in large wastewater treatment plants. *Applied Energy*, Vol. 282, Part A, 116126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116126>.

21. Cassidy, J., Silva, T., Semiao, N., Ramalho, P., Santos, A., Feliciano, J. (2020). Improving wastewater treatment plants operational efficiency and effectiveness through an integrated performance assessment system. *H₂Open Journal*, Vol. 3, No. 1, 276–287. DOI: <https://doi.org/10.2166/h2oj.2020.007>.

22. Silva, C., Saldanha Matos, J., Rosa, M. (2016). A comprehensive approach for diagnosing opportunities for improving the performance of WWTP. *Water Science & Technology*, Vol. 74, Issue 12, 2935–2945. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2016.432>.

23. Longo, S., Hospido, A., Lema, J.M., Mauricio-Iglesias, M. (2018). A systematic methodology for the robust quantification of energy efficiency at wastewater treatment plants featuring Data Envelopment Analysis. *Water Research*, Vol. 141, 317–328. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.04.067>.

24. Kiselev, A.V., Magaril, E.R. (2019). Obespechenie effektivnosti vodoочистki v usloviakh tsirkuliarnoi ekonomiki kak element ekologo-ekonomicheskoi bezopasnosti territorii (Ensuring Water Treatment Assessment Within Spatial Ecological and Economic Security Framework Towards Circular Economy). *Vestnik URFU. Seriya ekonomika i upravlenie (Bulletin of UrfU. Series Economics and Management)*, Vol. 18, No. 6, 911–929. DOI: <https://doi.org/10.15826/vestnik.2019.18.6.044>. (In Russ.).

25. Pupyrev, E.I. (2019). Sbor i ochistka khoziaistvenno-bytovykh stochnykh vod: kriticheskii obzor dostignutykh rezultatov (Collection and treatment of domestic wastewater: a critical review of the achieved results). *Vestnik MGSU (Vestnik MGSU. Monthly Journal on Construction and Architecture)*, Vol. 14, No. 11, 1365–1407. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.11.1365-1407>. (In Russ.).

26. Kiselev, A., Magaril, E., Rada, E.C. (2019). Energy and sustainability assessment of municipal wastewater treatment under circular economy paradigm. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Vol. 237, 109–120. DOI: <https://doi.org/10.2495/ESUS190101>.

27. Rukavishnikova, I., Kiselev, A., Berezyuk, M., Ashirova, I. (2018). Improvement of the methodology for assessing domestic wastewater treatment quality using benchmarking tools. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Vol. 228, 209–219. DOI: <https://doi.org/10.2495/WPI80211>.

28. Valiev, V.S., Ivanov, D.V., Shagidullin, R.R., Shamaev, D.E., Mustafina, L.K., Shurmina, N.V., Abdullina, F.M., Bogdanova, O.A., Ziganshin, I.I. (2018). Otsenka vklada zagriazniaiushchikh veshchestv v formirovanie klassa zagriaznennosti poverkhnostnykh vod (Estimation of pollutants contribution to the formation of the surface waters pollution class). *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii (Russian Journal of Applied Ecology)*, No. 3, 57–64. (In Russ.).

29. Belloir, C., Stanford, C., Soares, A. (2015). Energy benchmarking in wastewater treatment plants: The importance of site operation and layout. *Environmental Technology*, Vol. 36, Issue 2, 260–269. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.951403>.

30. Kiselev, A.V., Magaril, E.R., Glushankova, I.S., Rudakova, L.V. (2020). Otsenka tekhnologii obrabotki osadkov stochnykh vod v usloviakh perekhoda k tsirkuliarnoi ekonomike (Analysis of Sewage Sludge Alternatives Towards Circular Economy). *Journal of Applied Economic Research*, Vol. 19, No. 3, 329–347. DOI: <https://doi.org/10.15826/vestnik.2020.19.3.016>. (In Russ.).

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Andrey Vladimirovich Kiselev

Junior Research Fellow, Department of Environmental Economics, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia (620002, Yekaterinburg, Mira street, 19); ORCID 0000-0002-4199-2582; e-mail: ipkiseliov@mail.ru.

Elena Romanovna Magaril

Doctor of Technical Science, Professor, Head of Department of Environmental Economics, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia (620002, Yekaterinburg, Mira street, 19); ORCID 0000-0003-3034-9978; e-mail: magaril67@mail.ru.

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-28-01740, <https://rscf.ru/project/22-28-01740/>.

FOR CITATION

Kiselev, A.V., Magaril, E.R. (2023). Correlation Assessment of Environmental and Energy Features of Wastewater Treatment Plants Towards Circular Economy. *Journal of Applied Economic Research*, Vol. 22, No. 1, 99–119. <https://doi.org/10.15826/vestnik.2023.22.1.005>.

ARTICLE INFO

Received September 27, 2022; Revised November 8, 2022; Accepted November 22, 2022.

