

## Оценка технологий обработки осадков сточных вод в условиях перехода к циркулярной экономике

*А. В. Киселев<sup>1</sup>  , Е. Р. Магарил<sup>1</sup> , И. С. Глушанкова<sup>2</sup> , Л. В. Рудакова<sup>2</sup> *

*<sup>1</sup>Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург, Россия*

*<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет  
г. Пермь, Россия  
ipkiselyov@mail.ru*

**Аннотация.** В статье исследованы пути решения актуальной проблемы загрязнения водосточников вследствие несовершенства технической и технологической оснащенности муниципальных сооружений очистки сточных вод, которая рассматривается с позиции перехода к экономике замкнутого цикла. Одним из ключевых элементов стратегии устойчивого развития в условиях экономики замкнутого цикла является разработка и реализация политики в области модернизации муниципальных станций очистки сточных вод с целью сокращения негативного воздействия на окружающую среду. Целью работы является создание системы комплексной оценки различных технологических решений обработки осадков сточных вод с использованием методов оценки жизненного цикла и анализа материальных потоков в условиях перехода к циркулярной экономике. Гипотеза настоящего исследования предполагает наличие определенного набора технологий, основанных на принципе «отходы-в-энергию», при котором возможно достижение чистого нулевого энергопотребления на станции очистки сточных вод. Предложен методический инструментарий к оценке полного цикла обработки и утилизации осадка сточных вод с применением методов оценки жизненного цикла и анализа материальных и энергетических потоков. Визуализация результатов произведена с использованием диаграммы Sankey. Авторы проводят апробацию предложенного метода по данным, представленным с реальных очистных сооружений, которые работают в городах-миллионниках Екатеринбурге и Перми. В результате исследования мы выяснили, что применение некоторых технологий обработки осадков сточных вод, основанных на принципе «отходы-в-энергию» не приводит к ожидаемому сокращению показателя среднего чистого потребления энергии совместно с сокращением массы отходов. По итогам исследования выявлены технологии-лидеры, которые делают возможным достижение чистого нулевого энергопотребления станции очистки сточных вод. Результаты исследования являются наглядными и простыми для интерпретации и могут быть использованы менеджерами разного уровня для выбора оптимального набора технологических стадий обработки и утилизации осадка сточных вод в соответствии с принципами циркулярной экономики, в том числе для эталонного сравнения в составе национальной отраслевой системы бенчмаркинга.

**Ключевые слова:** циркулярная экономика; осадок сточных вод; оценка; отходы в энергию; анаэробное сбраживание; термическая сушка; пиролиз.

### 1. Актуальность темы исследования

Одним из ключевых элементов стратегии устойчивого развития в ус-

ловиях экономики замкнутого цикла является разработка и реализация политики в области модернизации муниципальных станций очистки сточных

вод (СОСВ) с целью сокращения негативного воздействия на окружающую среду [1–3]. Развитие производственных процессов, а также создание дополнительных стадий обработки осадка зачастую приводят к интенсификации технологии и росту затрат на энергоносители [4–6].

Достижение чистого нулевого энергопотребления (когда собственная генерация покрывает текущие потребности в энергии) на СОСВ за счет внедрения энергоэффективных решений, систем когенерации и других возобновляемых источников энергии не является сегодня приоритетом для большинства организаций коммунального сектора в связи с необходимостью решать более острые проблемы, связанные с возможностью размещения значительных объемов осадка сточных вод на полигонах захоронения [7]. Тем не менее вопрос достижения чистого нулевого энергопотребления весьма важен в условиях бурного роста населения планеты и интенсивного пути совершенствования технологических процессов на СОСВ, что особенно актуально для развивающихся стран [8–10].

В настоящее время становится очевидно, что существующая модель хозяйствования СОСВ, основанная на традиционном (линейном) экономическом подходе, не позволяет в полной мере решать актуальные угрозы современности, с которыми человечество столкнется в ближайшие десятилетия: деградация окружающей среды и истощение природных ресурсов. Таким образом, скорейшее внедрение передовых практик рационального природопользования имеет огромное значение для сохранения среды обитания, а также для достижения позитивных результатов в вопросах экономики и энергоэффективности. Переход к экономике замкнутого цикла представляется со-

временным, актуальным и практичным вариантом достижения целей устойчивого развития [11, 12]. Такой подход фокусируется на сокращении использования возобновляемых и невозобновляемых ресурсов, а также на рециклинге производственных процессов и создании дополнительных замкнутых контуров для повторной переработки материалов, что в конечном итоге приводит к значительному сокращению отходов или их полную трансформацию в энергию или новые товарные продукты [12, 13].

В настоящее время годовой объем образования осадков сточных вод оценивается на уровне 14, 6, 13 и 3 миллионов тонн сухого вещества в Европе, Китае, Соединенных Штатах Америки и Российской Федерации, соответственно, и будет только расти с дальнейшим ростом экономики и населения [14, 15].

Процесс очистки сточных вод и образовавшегося осадка сточных вод требует значительных энергетических затрат, при этом основная его часть сосредоточена на процессе аэрации активированного ила (более 60%), а также на перекачке и обезвоживании осадков сточных вод. Удельное энергопотребление блока биологической очистки на СОСВ в Российской Федерации составляет около 0,1 кВт/ч в день на 1 эквивалентного жителя, потенциальное потребление энергии для процесса аэрации по всей стране составляет 240 МВт/ч (почти 5800 МВт в день). Снижение энергетических затрат на СОСВ является важной и приоритетной задачей.

Внедрение наилучших доступных технологий обработки и утилизации осадков сточных вод путем широкого применения решений, основанных на принципе «отходы-в-энергию», является адекватной реакцией, направленной на решение существую-

ших проблем. Согласно опубликованным научным данным, теплотворная способность образцов осадков сточных вод с влажностью 80% составляет  $4 \times 10^3$  кДж/кг, с влажностью 20% –  $25 \times 10^3$  кДж/кг [16, 17].

На сегодняшний день на передовых СОСВ применяются следующие решения по обработке осадков сточных вод, основанные на принципе «отходы-в-энергию»: анаэробное сбраживание, сжигание, пиролиз и газификация, в соответствии с рис. 1 [15]. Учитывая высокое содержание органических веществ, процесс коксования также может быть применен для обработки осадков сточных вод, используя разработанную технологию переработки твердых бытовых органических отходов или интегрированные технологии [18–20].

Разработка методологических подходов для оценки альтернативных практик, основанных на принципе «отходы-в-энергию», и выбора наиболее

оптимального решения значительно увеличит рентабельность СОСВ и сократит затраты на технологические процессы.

Целью работы является создание системы комплексной оценки различных технологических решений обработки осадков сточных вод с использованием методов оценки жизненного цикла и анализа материальных потоков в условиях перехода к циркулярной экономике.

Гипотеза настоящего исследования предполагает наличие определенного набора технологий, основанных на принципе «отходы-в-энергию», при котором возможно достижение чистого нулевого энергопотребления на станции очистки сточных вод.

## 2. Степень проработанности проблемы

Описание методов повышения энергетической эффективности станций очистки сточных вод встречается в отечественной литературе достаточ-

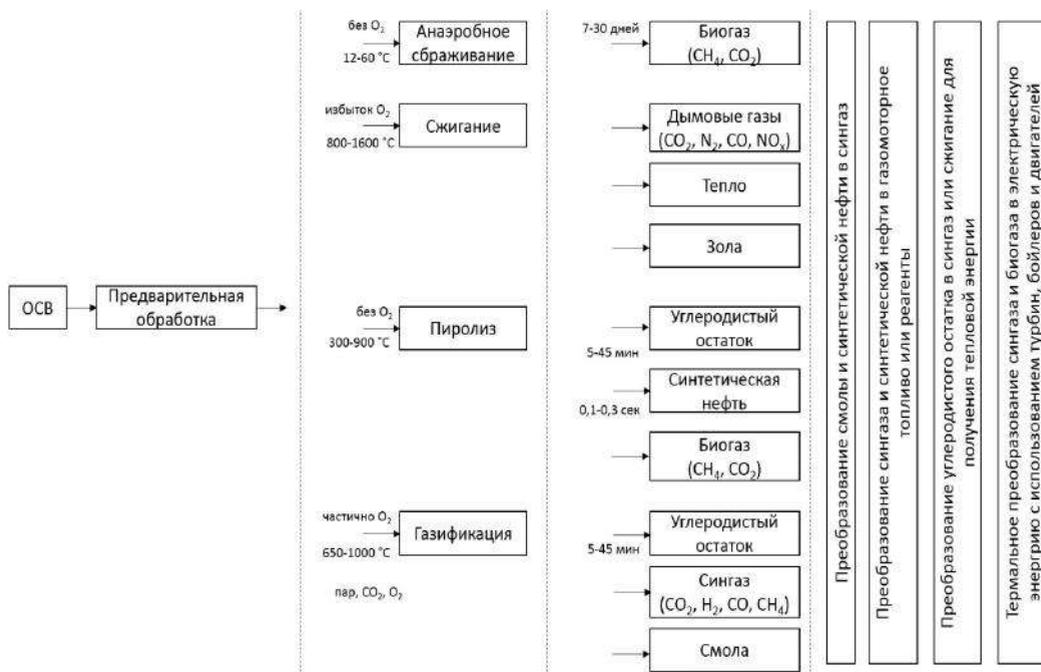


Рис. 1. Перспективные технологии обработки осадков сточных вод, основанные на принципе «отходы-в-энергию» [15]

Fig. 1. Potential sewage sludge treatment techniques based on waste-to-energy principle

но часто, однако вопросы оценки энергетического потенциала различных технологий обработки осадка сточных вод в условиях перехода к экономике замкнутого цикла почти не затрагиваются. Напротив, в Европе в связи с принятием директивы Совета ЕС 91/271/ЕЕС от 21 мая 1991 г. можно отметить повсеместное внедрение технологий повторного использования осадков сточных вод, что нашло отражение в практических исследованиях, направленных на оценку энергетического и материального потенциала таких отходов. В связи с этим авторы настоящей статьи анализировали научные труды зарубежных авторов.

Наиболее распространенным подходом к оценке процесса обработки осадка сточных вод в парадигме экономики замкнутого цикла является метод оценки жизненного цикла. Например, в работе Pintilie et al. авторы рассматривают оценку рационального природопользования с применением метода оценки жизненного цикла для повторного использования сточных вод по категориям воздействия [21]. В работе Molina-Moreno et al. использована основа метода оценки жизненного цикла для разработки и проведения оценки по показателям эффективности использования ресурсов в условиях экономики замкнутого цикла с целью уменьшения образования отходов и превращения свиного навоза в технологическое питательное вещество [22]. Vuonoscore et al. использовали подходы к оценки жизненного цикла для сравнения экологических характеристик различных сценариев рационального управления процессом обработки илов на очистных сооружениях [23]. Grönlund разработал метод оценки управления осадками сточных вод с использованием инструментов оценки жизненного цикла, эксергетического и экономического

анализа, анализа чрезвычайных ситуаций и оценки экологических рисков [24].

Анализ материальных потоков считается целесообразным для оценки очистных сооружений в рамках циркулярной экономики. Например, в работе Parangelou et al. [25] представлена система круговорота продовольствия и фосфора в столичном регионе Брюсселя, основанная на структуре анализа материальных потоков для оценки решений с учетом развития экономики замкнутого цикла для лучшего управления ресурсами.

На данный момент в отечественной и зарубежной научной литературе отсутствуют актуальные исследования успешного практического применения на крупных СОСВ технологий, основанных на принципе «отходы-в-энергию», которые реализуются в условиях перехода к циркулярной экономике.

### **3. Предлагаемые методы и подходы к исследованию**

Представленное исследование было выполнено с применением базовых принципов методов оценки жизненного цикла и анализа материальных потоков к эмпирическим данным, собранным авторами на станциях очистки сточных вод. Методологический подход включает описание области исследования; построение методологической основы системы оценки.

#### **3.1. Описание области исследования**

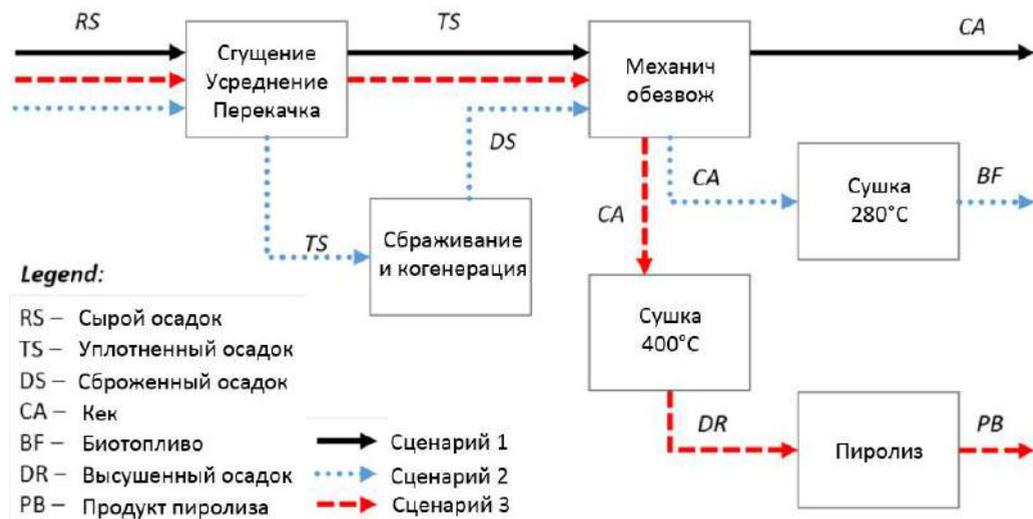
Авторы выбрали три типовых сценария для наиболее распространенных методов обработки осадков сточных вод, которые представлены на рис. 2; они соответствуют реальным СОСВ, которые работают в двух крупнейших городах Российской Федерации с населением более 1 млн человек.

Первый сценарий, названный авторами базовым, используется

на Южной аэрационной станции в городе Екатеринбурге. На Южной аэрационной станции перерабатывается до 85 % всех сточных вод города; ее максимальная производительность составляет 550 000 м<sup>3</sup>/сут. Технологический процесс обработки осадка состоит из перекачивания, сгущения и усреднения сырого осадка (СО) и избыточно активного ила с последующим механическим обезвоживанием (МД) в камерном фильтр-прессе. Для повышения эффективности водоотдачи применяются специальные химические реагенты, например СаО. В настоящее время осадок после механического обезвоживания, называемый кеком, вывозится для размещения на специализированных полигонах. Это означает, что вся потенциальная энергия теряется. Кроме того, несмотря на специальную подготовку площадки, биодegradация кека на полигонах сопровождается эмиссиями токсичных загрязняющих веществ,

тяжелых металлов в грунтовые воды и почву [27].

Второй сценарий, названный авторами *интенсивным с сушкой*, является частично циркулярной структурой. Эта схема используется на Северной аэрационной станции в Екатеринбурге, на которую поступает до 15 % сточных вод из города; ее максимальная производительность составляет 100 000 м<sup>3</sup>/сут. Технологический процесс аналогичен первому сценарию, однако предусмотрено анаэробное сбраживание (АД) осадков сточных вод с комбинированной выработкой тепла и энергии путем когенерации на газопоршневых установках (СНП) и последующей низкотемпературной сушкой кека (DRY). Анаэробное сбраживание используется для достижения требуемого уровня стерилизации и уничтожения патогенных микроорганизмов с уменьшением количества сухого вещества осадков сточных вод для утилизации и произ-



**Рис. 2.** Рассматриваемые сценарии: а – сценарий 1, основанный на технологическом процессе Южной станции очистки сточных вод Екатеринбурга; б – сценарий 2, основанный на технологическом процессе Северной станции очистки сточных вод Екатеринбурга; в – сценарий 3, основанный на технологическом процессе станции очистки сточных вод Перми

**Fig. 2.** Scenarios under consideration: (a) Scenario 1, based on Ekaterinburg Southern WWTP technological process; (b) scenario 2, based on Ekaterinburg Northern WWTP technological process; (c) scenario 3, based on Perm WWTP technological process

водства богатого метаном биогаза [28]. Сгущенная и усредненная смесь сырого осадка и избыточно активного ила перемещается в два метантенка с мезофильным режимом сбраживания. Биогаз, получаемый в результате анаэробного сбраживания, утилизируется на когенерационной установке с установленной электрической мощностью 635 кВт, тепловой мощностью 674 кВт.

Осадок сточных вод после сбраживания подается для дальнейшего механического обезвоживания, а затем в сооружение сушки. Сушка происходит в процессе прохождения осадка через специальные турбо-сушильные агрегаты, где благодаря центробежной силе создается тонкий слой осадка по всей поверхности нагреваемого цилиндра. На выходе после сушки осадок, состоящий примерно на 80 % из сухого вещества, спрессовывается в гранулы и может быть использован в качестве биотоплива при производстве порландцементного клинкера. Цементная печь с температурой 2000 °С создает благоприятные условия для полного использования энергии и материала: горючая часть используется для выработки тепла, а негорючая часть (зола) – в качестве добавок в цемент. Средняя теплотворная способность высушенного осадка сточных вод составляет ориентировочно 10250 МДж/кг, или 2847,22 кВт ч/кг [29].

Третий сценарий, названный авторами *интенсивным с пиролизом*, применяется на очистных сооружениях в городе Перми. Производительность биологических очистных сооружений Перми составляет 400 000 м<sup>3</sup>/сут. В процессе очистки ежедневно образуется 1800–2000 т сырых осадков с влажностью 98 %.

Сгущенные осадки обезвоживаются в присутствии флокулянтов на декантерных центрифугах до влажности

75 %. Одна часть обезвоженного осадка (88,0 т/сут) поступает на иловые карты, другая часть (72 т/сут) – на пилотную установку термической обработки осадков, где подвергается сушке и газификации. Сушка осадков сточных вод осуществляется в сушилке барабанного типа под воздействием горячего теплоносителя – дымового газа с температурой до 400 °С, образующегося при пиролизе/газификации осадков. Высушенный материал подается на пиролиз/газификацию в реактор. Реактор-газификатор сконструирован на основе многоподовой печи. Сухой осадок подается в верхнюю часть реактора. Вращением вала с лопатками, расположенным внутри, обеспечивается непрерывное перемещение материала с вышележащих подов на нижележащие. Выгрузка золы производится с нижнего пода реактора. При запуске реактор требует внешнего источника тепла для разогрева (используются дизельные горелки), после запуска реактор работает в автотермическом режиме без подвода тепла.

В многоподовой печи происходит полная газификация органической части осадков сточных вод с получением генераторного газа, минеральный остаток выводится в виде золы. Образующийся генераторный газ подается для сжигания в высокотемпературное горелочное устройство. Использование отдельного внешнего горелочного устройства позволяет обеспечить в камере сгорания объемное окисление генераторного газа при температуре более 1100 °С. Далее дымовой газ поступает в вихревой смеситель, где организовано его охлаждение холодным выпаром из сушилки. Таким образом подготавливается теплоноситель нужной температуры. Полученный теплоноситель направляется в сушилку.

Выпар из сушилки частично возвращается для разбавления и охлаждения дымовых газов в вихревой смеситель, а избыточный выпар выводится из сушилки и направляется на очистку в скруббер. В скруббере происходит очистка от пылевых частиц и газообразных загрязнителей (соединений хлора, фтора, серы), а также конденсация водяного пара, осушение потока дымовых газов перед выбросом в атмосферу. Выброс осуществляется через вытяжную трубу.

Количество тепловой энергии, полученной при сжигании генераторного газа достаточно для обеспечения процесса автотермической сушки осадков сточных вод. Тепловая энергия на первоначальный разогрев реактора и электроэнергия для привода механизмов комплекса, которые берутся извне, составляют лишь небольшую часть по сравнению с энергозатратами на сушку осадков.

После отработки режима эксплуатации установки пиролиза весь объем осадков сточных вод будет подвергаться термическому обезвреживанию.

### **3.2. Методологическая основа системы оценки**

Метод оценки жизненного цикла имеет отношение к международным стандартам управления окружающей средой ISO 14000 и способен обеспечивать комплексную оценку на всех этапах технологического процесса от приобретения сырья до производства продукции, ее использования, обработки по окончании срока службы и утилизации [30]. Метод оценки жизненного цикла всесторонне рассматривает текущее и потенциальное влияние системы на окружающую среду. Пошаговый план действий оценки жизненного цикла, описанный в ISO 14040:2006, включает четыре последовательных этапа: 1) определение цели и области приме-

нения; 2) анализ запасов; 3) анализ воздействия; 4) интерпретация результатов.

Анализ материальных потоков считается важным инструментом оценки и управления экологической устойчивостью, который тесно связан с принципами экономики замкнутого цикла. Данная процедура количественно определяет потоки материалов и энергии в рассматриваемой экономической системе. Она отражает балансы масс в экономике, где затраты (добыча + импорт) равны объемам производства (потребление + экспорт + накопление + отходы) [31].

Проведенное в статье исследование основано на комбинированном применении принципов и подходов оценки жизненного цикла и анализа материальных потоков. Эти методы создают возможности для определения энергетического и материального баланса очистных сооружений в целях устойчивого совершенствования управления в рамках парадигмы экономики замкнутого цикла. Применение данного конструкта поможет создать надежную среду для принятия управленческих решений при разработке операционной и модернизационной политики предприятия. Применение инструмента анализа материальных потоков совместно с оценкой жизненного цикла создает простой и интуитивно понятный метод, который обеспечивает целостную оценку процесса очистки осадка сточных вод в определенных границах исследования для поиска лучшего эталона управления.

Потоки энергии и массы при обработке осадка сточных вод в ежедневном режиме собирались в течение 1 года (2018) и в итоге были консолидированы и усреднены в суточных значениях (кВт ч/день и т/день) для всех сценариев. Текущее исследование сфокусировано на общем уменьшении мас-

сы и определении энергетического баланса (потребляемая/произведенная энергия) для этого процесса, эмиссии загрязняющих веществ не оценивались. Для оценки энергетического баланса авторы использовали показатель чистого энергопотребления (*NEC*), который рассчитывается путем вычитания из общей энергии, потребленной в ходе эксплуатации объекта, энергии, произведенной из вторичного топлива и энергоносителей, полученных в ходе технологического процесса [7], используя следующее уравнение:

$$NEC = EC - EG, \quad (1)$$

где *EC* – энергия, потребленная из сети; *EG* – энергия, полученная в результате технологического процесса или потенциальная энергия, которая может быть получена за рамками границ рассматриваемых сценариев (например, высушенный осадок сточных вод может быть использован в качестве биотоплива в печах для производства портландцементного клинкера).

### 3.3. Порядок интерпретации результатов

Для визуализации полученных результатов авторы использовали диаграмму Sankey, так как она позволяет сосредоточиться на потоках энергии и массы и их трансформациях в различных рассматриваемых системах. Это выражается стрелками потоков, ширина которых определяет величину потока [32]. Энергетические и материальные пределы систем связаны с временными и пространственными измерениями.

Результаты построения диаграммы Sankey после их интерпретации используются для повышения энергетической эффективности и сокращения отходов за счет внедрения технологий повторного использования и переработки и создания замкнутых контуров (рецикли-

нга процессов). Переход к экономике замкнутого цикла дает возможность компании значительно уменьшить первоначальный, объем осадка сточных вод и повысить энергоэффективность производственного процесса. Прозрачная и естественная визуализация ключевых моментов при обработке и утилизации осадков сточных вод позволяет управленцам стремиться к технологическим совершенствованиям путем переосмысления и перестройки самой операционной системы.

Несмотря на то, что рассматриваемые очистные сооружения собирают сточные воды, образующиеся в крупнейших городах Российской Федерации с населением более 1 млн человек, каждый объект имеет свой масштаб. Для сравнения данных, полученных с различных очистных сооружений, авторы использовали следующие усредненные показатели: эффективность снижения массы (*MDE*), среднее потребление энергии (*AEC*), среднее чистое потребление энергии (*ANEC*).

Показатель эффективности снижения массы (*MDE*) показывает процентное отношение массы осадка сточных вод, полученного в результате технологического процесса, в сравнении с исходным осадком, и рассчитывается следующим образом:

$$MDE = \frac{M_{FS}}{M_{RS}}, \quad (2)$$

где  $M_{FS}$  – общая масса осадка сточных вод, полученного в результате реализации полного технологического цикла;  $M_{RS}$  – общая масса исходного осадка сточных вод.

Индикатор среднего энергопотребления отражает количество энергии, потребляемой для процесса очистки осадка сточных вод, по отношению к массе исходного необработанного осадка сточных вод. Среднее потребление

ние энергии ( $AEC$ ) можно рассчитать как для полного технологического процесса, так и для его части (конкретного этапа). Этот показатель рассчитывается с использованием следующего уравнения:

$$AEC = \frac{EC}{M_{RS}}, \quad (3)$$

где  $EC$  – энергия, потребленная из сети;  $M_{RS}$  – общая масса исходного осадка сточных вод.

При расчете индикатора среднего чистого энергопотребления вместо энергопотребления ( $EC$ ) используется чистое энергопотребление ( $NEC$ ). Этот показатель рассчитывается по уравнению (4):

$$ANEC = \frac{NEC}{M_{RS}}, \quad (4)$$

где  $NEC$  – чистое энергопотребление, рассчитанное с применением формулы (1);  $M_{RS}$  – общая масса исходного осадка сточных вод. Авторы использовали оба индикатора – среднее потребление энергии ( $AEC$ ) и среднее чистое

потребление энергии ( $ANEC$ ) – для того, чтобы продемонстрировать, как возобновляемые источники энергии влияют на энергетический баланс очистных сооружений.

#### 4. Полученные результаты

Полученные результаты для сценария 1 с использованием диаграммы Sankey представлены на рис. 3.

Стоит отметить, что данный сценарий является типовым для большинства СОСВ в Российской Федерации. Индикатор «Эффективность снижения массы ( $MDE$ )», рассчитанный с использованием уравнения (2), составляет 10,65%, что является удовлетворительным значением для обеспечения технологического процесса обработки осадков сточных вод. Кек вывозится с территории СОСВ и размещается на специально подготовленных площадках, которые позволяют исключить возможность негативного воздействия отходов на здоровье человека и окружающую среду. Однако вся потенциальная энергия теряется. Потребление энер-



Рис. 3. Результаты сценария 1 на диаграмме Sankey  
Fig. 3. Energy and material Sankey diagram for scenario 1

гии (EC) на процесс сгущения, усреднения и перекачивания осадков сточных вод в несколько раз превышает затраты на механическое обезвоживание, таким образом руководителям СОСВ необходимо рассматривать повышение энергетической эффективности сооружений в качестве одной из приоритетных целей при проведении модернизационной политики.

Загрязненные сточные воды, получаемые в результате разделения жидкой и твердой фракции (WR1 и WR2), возвращаются в основной технологический процесс очистки сточных вод. Однако, в зависимости от применяемых практик и действующего законодательства, они могут быть повторно использованы для решения проблем нехватки пресной воды [2, 33, 34].

Результаты, полученные для сценария 2, показывают более совершенную технологию обработки и утилизации осадков сточных вод (рис. 4).

Общий показатель эффективности снижения массы (MDE) составляет 2,41 %, однако можно считать, что данный показатель равен нулю, так

как высушенный осадок, получаемый в результате технологического процесса, после сжигания в печи для обжига портландцементного клинкера перестает существовать в качестве отхода водоочистки и трансформируется материально и энергетически в новую сущность. На рис. 4 можно увидеть, что значительные энергозатраты требуются на процесс сушки, что вполне естественно, учитывая необходимость нагрева осадков сточных вод до температуры 280 °С. С другой стороны, дополнительная энергия может быть получена в результате процесса когенерации и утилизации биогаза в газопоршневых установках.

Анализ полученных данных по сценарию 3 в соответствии с представленной диаграммой на рис. 5 показывает, что значение индикатора «Эффективность снижения массы (MDE)» для процесса пиролиза/газификации составляет 4,5%. Конечным продуктом процесса пиролиза/газификации является зола, которая представляет собой неорганический остаток, содержащий диоксид кремния, плохо

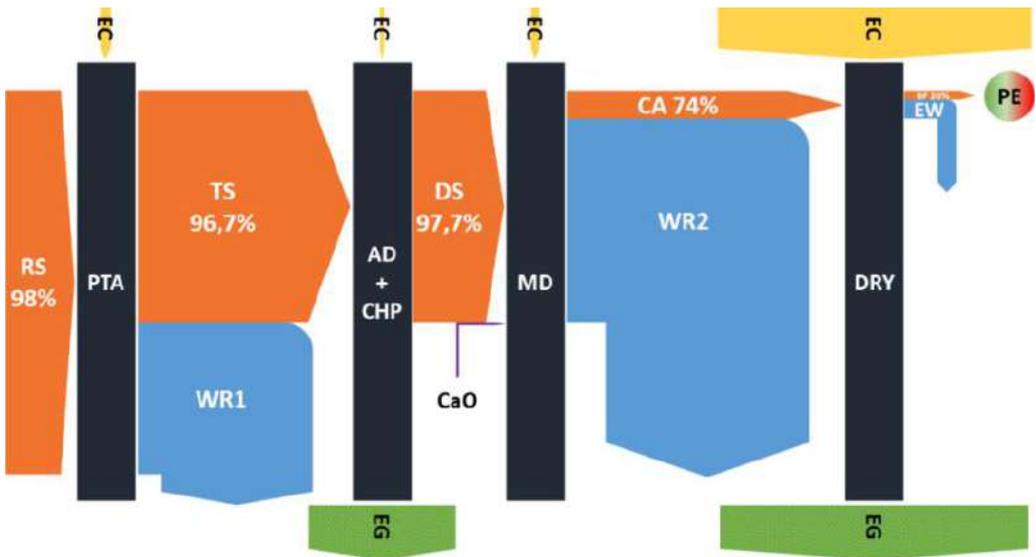


Рис. 4. Результаты сценария 2 на диаграмме Sankey  
 Fig. 4. Energy and material Sankey diagram for scenario 2

растворимые фосфаты (до 5–6%) и ионы тяжелых металлов. Зола может быть использована в качестве комплексного минерального удобрения с помощью специальных методов восстановления – следовательно, значение показателя эффективности снижения массы (*MDE*) может быть значительно улучшено.

Чтобы оценить удельные показатели эффективности для всех рассматриваемых сценариев, результаты индикаторов «Эффективность снижения массы (*MDE*)», «Среднее потребление энергии (*AEC*)» и «Среднее чистое потребление энергии (*ANEC*)» были нанесены на один график, представленный на рис. 6. Можно заметить, что результаты второго сценария могут быть отмечены в качестве эталона для достижения чистого нулевого энергопотребления СОСВ.

Что касается третьего сценария, следует учитывать, что текущий процесс газификации находится в стадии испытаний, и в настоящее время генераторный газ, полученный из органического компонента осадков сточных вод, полностью расходуется на процесс суш-

ки кека. После запуска в эксплуатацию полного технологического комплекса, ожидается дополнительная энергия от генераторного газа.

Аналогичный результат для сценария 3 может быть получен, если на СОСВ в Перми будет внедрена технология анаэробного сбраживания совместно с установкой блока мини-ТЭЦ для совместной выработки тепловой и электрической энергии. До этого момента удельное потребление энергии для сценария 3 будет превышать потребление для сценария 1, хотя снижение массы здесь является более эффективным.

Несмотря на наглядные результаты, предложенная модель имеет ряд допущений и упрощений. Расходы на отопление зданий и сооружений, обслуживающих технологический процесс на всех этапах, не учитывались. Достижение чистого нулевого потребления при очистке сточных вод выходит за рамки исследований, представленных в этой статье, так как оно включает потребление энергии для основного процесса очистки сточных вод,

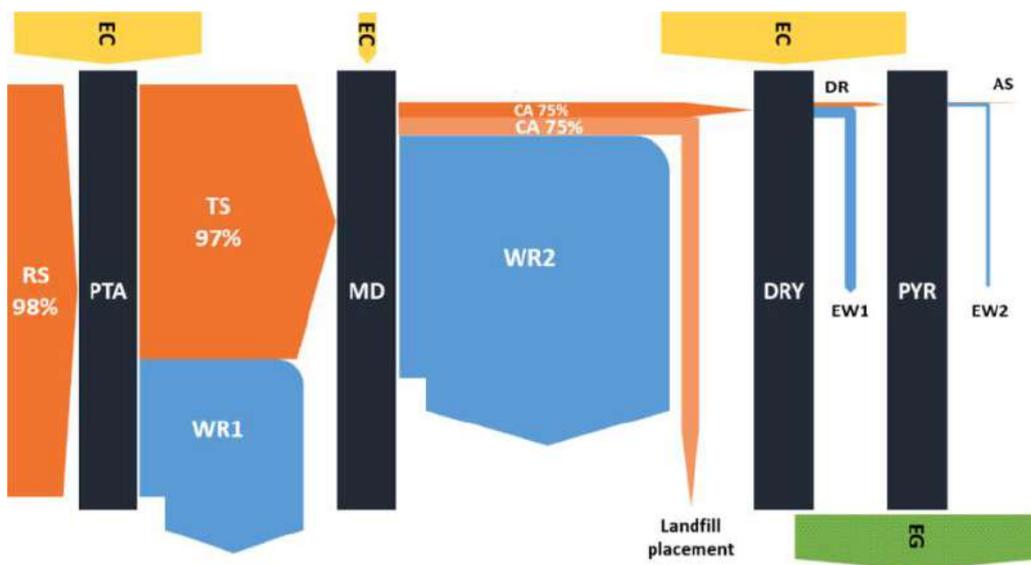


Рис. 5. Результаты сценария 3 на диаграмме Sankey  
Fig. 5. Energy and material Sankey diagram for scenario 3

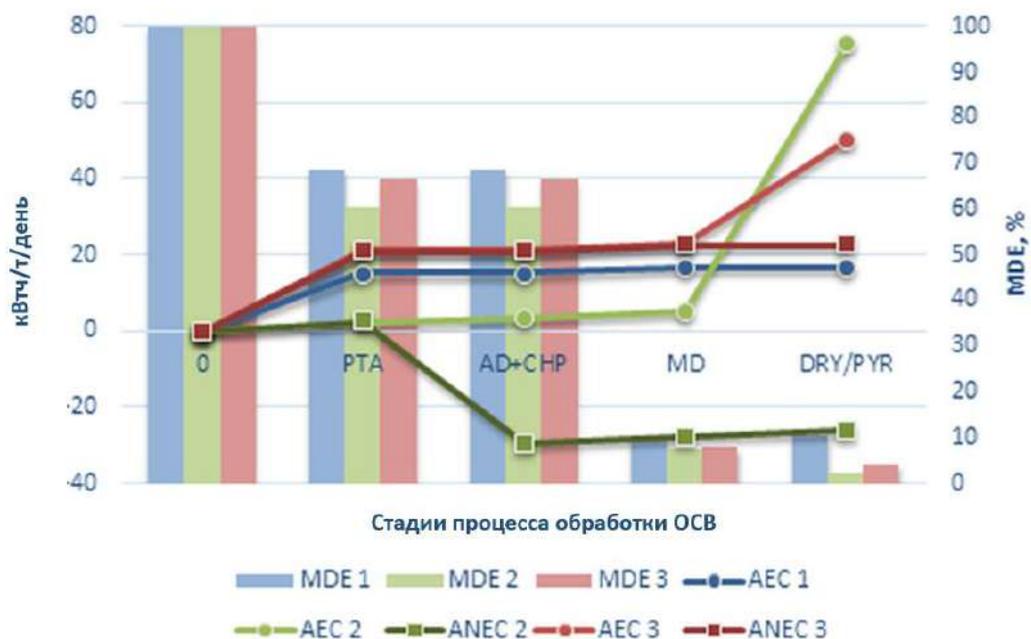


Рис. 6. Удельные индикаторы энергетической и материальной эффективности  
 Fig. 6. Mass and energy efficiency output

тогда как практически нет возможности генерировать энергию. Расширенное изучение этого явления должно быть проведено в будущих работах.

### 5. Выводы

Важной особенностью применения предлагаемого метода для оценки технологий обработки осадков сточных вод, основанных на принципе «отходы-в-энергию», является тот факт, что полученные на диаграмме Sankey результаты можно легко сопоставить как в отношении потребления/генерации по каждому сценарию, так и среди всех сценариев, легко выявляя технологических лидеров. Использование относительных удельных индикаторов позволяет сравнивать разные по масштабу станции очистки сточных вод, а также оценивать пары «Эффективность снижения массы (MDE)/Чистое энергопотребление (NEC)» и «Эффективность снижения массы (MDE)/Среднее чистое потребление энергии (ANEC)» для

поиска наиболее энергоэффективных решений.

В результате исследования мы выяснили, что применение некоторых технологий обработки осадков сточных вод, основанных на принципе «отходы-в-энергию», не приводит к ожидаемому сокращению показателя среднего чистого потребления энергии совместно с сокращением массы отходов (в частности, в результате сценария 3 вся потенциальная энергия уходит на собственные нужды и не ведет к достижению чистого нулевого энергопотребления станциями очистки сточных вод).

Практическое применение предложенного метода создает мощный, но в то же время простой инструмент для менеджеров для работы над переходом к экономике замкнутого цикла на станциях очистки сточных вод. Данный подход может применяться обособленно или совместно с матричным набором индикаторов циркулярности.

Все возможные основные потоки энергии и материалов могут быть приняты во внимание и проанализированы для возможности рециклинга технологических процессов и производств. В случае наличия альтернатив в технологических методах обработки осадков сточных вод данный

подход поможет определить наиболее устойчивый вариант. Кроме того, может быть отслежен прогресс в достижении чистого нулевого потребления посредством эталонного сравнения предложенных показателей эффективности в национальной системе бенчмаркинга.

### Список использованных источников

1. *Gherghel A., Teodosiu C., Notarnicola M., de Gisi S.* Sustainable design of large wastewater treatment plants considering multi-criteria decision analysis and stakeholders' involvement // *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 261. Pp. 110158. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110158.
2. *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: 10.2495/ESUS190101.
3. *Casiano Flores C., Bressers H., Gutierrez C., de Boer C.* Towards circular economy – a wastewater treatment perspective, the Presa Guadalupe case // *Management Research Review*. 2018. Vol. 41, Issue 5. Pp. 554–571. DOI: 10.1108/MRR-02-2018-0056.
4. *Capodaglio A. G., Olsson G.* Energy issues in sustainable urban wastewater management: Use, demand reduction and recovery in the urban water cycle // *Sustainability*. 2020. Vol. 12, Issue 1. Pp. 266. DOI: 10.3390/su12010266.
5. *Yu Y., Zou Z., Wang S.* Statistical regression modeling for energy consumption in wastewater treatment // *Journal of Environmental Sciences*. 2019. Vol. 75. Pp. 201–208. DOI: 10.1016/j.jes.2018.03.023.
6. *Langone M., Ferrentino R., Trombino G., Waubert De Puiseau D, Rada E. C., Ragazzi M.* Application of a novel hydrodynamic cavitation system in wastewater treatment plants // *UPB Scientific Bulletin. Series D*. 2015. Vol. 77, Issue 1. Pp. 225–234.
7. *Yan P., Qin R.-C., Guo J.-S., Yu Q., Li Z., Shen Y., Fang F.* Net-zero-energy model for sustainable wastewater treatment // *Environmental Science and Technology*. 2017. Vol. 51, Issue 2. Pp. 1017–1023. DOI: 10.1021/acs.est.6b04735.
8. *Awad H., Gar Alalm M., El-Etriby H. K.* Environmental and cost life cycle assessment of different alternatives for improvement of wastewater treatment plants in developing countries // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 660. Pp. 57–68. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.386.
9. *Hares M., Dayem M. A.* Difficulties encountered in executing and running of waste water plants in developing countries. Coating Conference // *Proceedings of the Technical Association of the Pulp and Paper Industry*. 2017. Pp. 175–185.
10. *Ragazzi M., Catellani R., Rada E. C., Torretta V., Salazar-Valenzuela X.* Management of urban wastewater on one of the Galapagos Islands // *Sustainability*. 2016. Vol. 8, Issue 3. Pp. 208. DOI: 10.3390/su8030208.
11. *Saidani M., Yannou B., Leroy Y., Cluzel F., Kendall A.* A taxonomy of circular economy indicators // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 207. Pp. 542–559. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.014.
12. *Pinter L.* International Experience in Establishing Indicators for the Circular Economy and Considerations for China // *Report for the Environment and Social Development Sector Unit. East Asia and Pacific Region. The World Bank, 2006.* [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.iisd.org/sites/default/files/publications/measure\\_circular\\_economy\\_china.pdf](https://www.iisd.org/sites/default/files/publications/measure_circular_economy_china.pdf) (дата обращения: 22.02.2020).

13. Lind M., Witherspoon J., Gokul B., Surti J. From wastewater treatment to total resource recovery – Changes are Happening in Auckland // 86th Annual Water Environment Federation Technical Exhibition and Conference. 2013. Vol. 9. Pp. 5729–5747.
14. Oladejo J., Shi K., Luo X., Yang G., Wu T. A Review of Sludge-to-Energy Recovery Methods // *Energies*. 2019. Vol. 12, Issue 1. Pp. 60. DOI: 10.3390/en12010060.
15. Kiselev A., Magaril E., Magaril R., Panepinto D., Ravina M., Zanetti M. C. Towards circular economy: evaluation of sewage sludge biogas solutions // *Resources*. 2019. Vol. 8, Issue 2. Pp. 91. DOI: 10.3390/resources8020091.
16. Туровский И. С. Осадки сточных вод. Обезвоживание и обеззараживание. М.: ДеЛи принт, 2008. 375 с.
17. Bernadiner I. M., Stepanova T. A., Klyuchniko A. D., Chevychelov D. D., Khoreva P. V., Nikolayev D. A., Tomanovsky V. A., Bernadiner M. N. Thermal methods of sewage sludge neutralization // *Ecology and Industry of Russia*. 2012. no. 7. Pp. 4–7.
18. Paukov A., Magaril R., Magaril E. An investigation of the feasibility of the organic municipal solid waste processing by coking // *Sustainability*. 2019. Vol. 11, Issue 2. Pp. 389. DOI: 10.3390/su11020389.
19. Merzari F., Langone M., Andreottola G., Fiori L. Methane production from process water of sewage sludge hydrothermal carbonization. A review. Valorising sludge through hydrothermal carbonization // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2019. Vol. 49, Issue 11. Pp. 947–988. DOI: 10.1080/10643389.2018.1561104.
20. Rada E. C., Ragazzi M., Villotti S., Torretta V. Sewage sludge drying by energy recovery from OFMSW composting: Preliminary feasibility evaluation // *Waste Management*. 2014. Vol. 34, Issue 5. Pp. 859–866. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.02.013.
21. Pintilie L., Torres C. M., Teodosiu C., Castells F. Urban wastewater reclamation for industrial reuse: An LCA case study // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 139, Issue 15. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.209.
22. Molina-Moreno V., Leyva-Díaz J. C., Llorens-Montes F. J., Cortés-García F. G. Design of indicators of circular economy as instruments for the evaluation of sustainability and efficiency in wastewater from pig farming industry // *Water*. 2017. Vol. 9, Issue 9. Pp. 653. DOI: 10.3390/w9090653.
23. Buonocore E., Mellino S., De Angelis G., Liu G., Ulgiati S. Life cycle assessment indicators of urban wastewater and sewage sludge treatment // *Ecological Indicators*. 2018. Vol. 94, Part 3. Pp. 13–23. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.04.047.
24. Grönlund S. E. Indicators and methods to assess sustainability of wastewater sludge management in the perspective of two systems ecology models // *Ecological Indicators*. 2019. Vol. 100. Pp. 45–54. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.07.013.
25. Papangelou A., Achten W., Mathijs E. Phosphorus and energy flows through the food system of Brussels capital region // *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. Vol. 156. Pp. 104687. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104687.
26. Fisher R. M., Alvarez-Gaitan J. P., Stuetz R. M., Moore S. J. Sulfur flows and biosolids processing: using material flux analysis (MFA) principles at wastewater treatment plants // *Journal of Environmental Management*. 2017. Vol. 198. Pp. 153–162. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.04.056.
27. Yuan H., Xing S., Lu T., Huhetaoli, Chen Y., Kobayashi N. Main organic pollutants migration and transformation laws in sewage sludge landfill and composting process // *WIT Transactions on Biomedicine and Health*. 2014. Vol. 18. Pp. 1183–1190. DOI: 10.2495/HHME131342.
28. Mills N., Pearce P., Farrow J., Thrope R. B., Kirkby N. F. Environmental & economic life cycle assessment of current & future sewage sludge to energy technologies // *Waste Management*. 2014. Vol. 34. Pp. 185–195. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.08.024.
29. Grile V., Mislej V., Šalej S. Thermal utilisation of biologically stabilised and dried waste sludge from wastewater treatment plants // 3rd International Symposium on Energy from Biomass and Waste. Venice, 2010.

30. *Chen G., Wang X., Li J., Yan B., Wang Y., Wu X., Velichkova R., Cheng Zh., Ma W.* Environmental, energy, and economic analysis of integrated treatment of municipal solid waste and sewage sludge: A case study in China // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 647. Pp. 1433–1443. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.104.

31. *Pincetl S.* A living city: using urban metabolism analysis to view cities as life forms // *Metropolitan Sustainability. Understanding and Improving the Urban Environment*. Woodhead Publishing Series in Energy, 2012. Pp. 3–25. DOI: 10.1533/9780857096463.1.3.

32. *Soundararajan K., Ho H. K., Su B.* Sankey diagram framework for energy and exergy flows // *Applied Energy*. 2014. Vol. 136. Pp. 1035–1042. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.08.070.

33. *Trulli E., Torretta V., Rada E. C.* Water restoration of an urbanized karst stream by free-water-surface constructed wetlands as municipal wastewater post treatment // *UPB Scientific Bulletin. Series D*. 2016. Vol. 78, Issue 4. Pp. 163–174.

34. *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: 10.15826/vestnik.2019.18.6.044.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Киселев Андрей Владимирович**

Аспирант, 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.

### **Глушанкова Ирина Самуиловна**

Доктор технических наук, профессор кафедры охраны окружающей среды Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, Россия (614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29); ORCID 0000-0003-3376-8000; e-mail: irina\_chem@mail.ru.

### **Рудакова Лариса Васильевна**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой охраны окружающей среды Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, Россия (614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29); ORCID 0000-0003-3292-8359; e-mail: larisa.rudakova.007@gmail.com.

## ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

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: 10.15826/vestnik.2020.19.3.016.

## ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

Дата поступления 19 мая 2020 г.; дата поступления после рецензирования 15 июля 2020 г.; дата принятия к печати 24 июля 2020 г.

## Analysis of Sewage Sludge Alternatives Towards Circular Economy

A. V. Kiselev<sup>1</sup>  , E. R. Magaril<sup>1</sup> , I. S. Glushankova<sup>2</sup> , L. V. Rudakova<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Ural Federal University

named after the First President of Russia B. N. Yeltsin,  
Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University  
Perm, Russia

 [ipkiselyov@mail.ru](mailto:ipkiselyov@mail.ru)

**Abstract.** The article describes ways to solve the urgent Issue of the pollution of water sources due to the imperfection of the technical and technological equipment of municipal wastewater treatment plants. The subject matter is considered from the perspective of the transition to the circular economy. One of the key elements of a sustainable development strategy in a circular economy is the development and implementation of policies for the modernization of municipal wastewater treatment plants in order to reduce the negative impact on the environment. The goal of this research is to create a holistic assessment system of various technological solutions for the treatment of sewage sludge using life cycle assessment and material flow analysis methods for the transition towards the circular economy. The hypothesis of the present study assumes a specific set of technologies based on the waste-to-energy principle, in which it is possible to achieve net zero energy consumption in a wastewater treatment plant. A methodological framework for assessing the complete technological cycle of sewage sludge treatment and disposal using life cycle analysis and material flow analysis tools is proposed. The results are visualized using the Sankey chart. The authors test the proposed method according to data presented from real treatment facilities that operate in Ekaterinburg and Perm. As a result of the study, we found that the use of some waste-to-energy technologies for treating sewage sludge does not lead to the expected reduction in average net energy consumption along with a reduction in waste mass. Based on the research, leading techniques have been identified that make it possible to achieve net zero energy consumption of a wastewater treatment plant. The results of the study are clear and easy to interpret and can be used by managers of different levels to select the most optimal set of technological stages for the treatment and disposal of sewage sludge in accordance with the principles of the circular economy, including reference comparison through the national sectoral benchmarking system.

**Key words:** sustainable development; economic security; assessment; wastewater treatment; sewage sludge; circular economy; key performance indicators; anaerobic digestion; pyrolysis; drying.

JEL Q01, Q32

### References

1. Gherghel, A., Teodosiu, C., Notarnicola, M., de Gisi, S. (2020). Sustainable design of large wastewater treatment plants considering multi-criteria decision analysis and stakeholders' involvement. *Journal of Environmental Management*, Vol. 261, 110158. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110158.
2. 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: 10.2495/ESUS190101.
3. Casiano Flores, C., Bressers, H., Gutierrez, C., de Boer, C. (2018). Towards circular economy – a wastewater treatment perspective, the Presa Guadalupe case. *Management Research Review*, Vol. 41, Issue 5, 554–571. DOI: 10.1108/MRR-02-2018-0056.

4. Capodaglio, A. G., Olsson, G. (2020). Energy issues in sustainable urban wastewater management: Use, demand reduction and recovery in the urban water cycle. *Sustainability*, Vol. 12, Issue 1, 266. DOI: 10.3390/su12010266.
5. Yu, Y., Zou, Z., Wang, S. (2019). Statistical regression modeling for energy consumption in wastewater treatment. *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 75, 201–208. DOI: 10.1016/j.jes.2018.03.023.
6. Langone, M., Ferrentino, R., Trombino, G., Waubert De Puiseau, D., Rada, E.C., Ragazzi, M. (2015). Application of a novel hydrodynamic cavitation system in wastewater treatment plants. *UPB Scientific Bulletin. Series D*, Vol. 77, Issue 1, 225–234.
7. Yan, P., Qin, R.-C., Guo, J.-S., Yu, Q., Li, Z., Shen, Y., Fang, F. (2017). Net-zero-energy model for sustainable wastewater treatment. *Environmental Science and Technology*, Vol. 51, Issue 2, 1017–1023. DOI: 10.1021/acs.est.6b04735.
8. Awad, H., Gar Alalm, M., El-Etriby, H.K. (2019). Environmental and cost life cycle assessment of different alternatives for improvement of wastewater treatment plants in developing countries. *Science of the Total Environment*, Vol. 660, 57–68. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.386.
9. Hares, M., Dayem, M. A. (2017). Difficulties encountered in executing and running of waste water plants in developing countries. Coating Conference. *Proceedings of the Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, 175–185.
10. Ragazzi, M., Catellani, R., Rada, E. C., Torretta, V., Salazar-Valenzuela, X. (2016). Management of urban wastewater on one of the Galapagos Islands. *Sustainability*, Vol. 8, Issue 3, 208. DOI: 10.3390/su8030208.
11. Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F., Kendall, A. (2019). A taxonomy of circular economy indicators. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 207, 542–559. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.014.
12. Pinter, L. (2006). International Experience in Establishing Indicators for the Circular Economy and Considerations for China. *Report for the Environment and Social Development Sector Unit. East Asia and Pacific Region*. The World Bank. Available at: [https://www.iisd.org/sites/default/files/publications/measure\\_circular\\_economy\\_china.pdf](https://www.iisd.org/sites/default/files/publications/measure_circular_economy_china.pdf).
13. Lind, M., Witherspoon, J., Gokul, B., Surti, J. (2013). From wastewater treatment to total resource recovery – Changes are Happening in Auckland. *86th Annual Water Environment Federation Technical Exhibition and Conference*, Vol. 9, 5729–5747.
14. Oladejo, J., Shi, K., Luo, X., Yang, G., Wu, T. (2019). A Review of Sludge-to-Energy Recovery Methods. *Energies*, Vol. 12, Issue 1, 60. DOI: 10.3390/en12010060.
15. Kiselev, A., Magaril, E., Magaril, R., Panepinto, D., Ravina, M., Zanetti, M.C. (2019). Towards circular economy: evaluation of sewage sludge biogas solutions. *Resources*, Vol. 8, Issue 2, 91. DOI: 10.3390/resources8020091.
16. Turovsky, I. S. (2008). *Osadki stochnykh vod. Obezvozhivanie i obezzarazhivanie (Treatment of sewage sludge)*. Moscow, DeLi print.
17. Bernadiner, I. M., Stepanova, T. A., Klyuchniko, A. D., Chevychelov, D. D., Khoreva, P. V., Nikolayev, D. A., Toumanovsky, V. A., Bernadiner, M. N. (2012). Thermal methods of sewage sludge neutralization. *Ecology and Industry of Russia*, no. 7, 4–7.
18. Paukov, A., Magaril, R., Magaril, E. (2019). An investigation of the feasibility of the organic municipal solid waste processing by coking. *Sustainability*, Vol. 11, Issue 2, 389. DOI: 10.3390/su11020389.
19. Merzari, F., Langone, M., Andreottola, G., Fiori, L. (2019). Methane production from process water of sewage sludge hydrothermal carbonization. A review. Valorising sludge through hydrothermal carbonization. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Vol. 49, Issue 11, 947–988. DOI: 10.1080/10643389.2018.1561104.
20. Rada, E. C., Ragazzi, M., Villotti, S., Torretta, V. (2014). Sewage sludge drying by energy recovery from OFMSW composting: Preliminary feasibility evaluation. *Waste Management*, Vol. 34, Issue 5, 859–866. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.02.013.

21. Pintilie, L., Torres, C.M., Teodosiu, C., Castells, F. (2016). Urban wastewater reclamation for industrial reuse: An LCA case study. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 139, Issue 15, 1–14. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.209.
22. Molina-Moreno, V., Leyva-Díaz, J.C., Llorens-Montes, F.J., Cortés-García, F.G. (2017). Design of indicators of circular economy as instruments for the evaluation of sustainability and efficiency in wastewater from pig farming industry. *Water*, Vol. 9, Issue 9, 653. DOI: 10.3390/w9090653.
23. Buonocore, E., Mellino, S., De Angelis, G., Liu, G., Ulgiati, S. (2018). Life cycle assessment indicators of urban wastewater and sewage sludge treatment. *Ecological Indicators*, Vol. 94, Part 3, 13–23. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.04.047.
24. Grönlund, S.E. (2019). Indicators and methods to assess sustainability of wastewater sludge management in the perspective of two systems ecology models. *Ecological Indicators*, Vol. 100, 45–54. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.07.013.
25. Papangelou, A., Achten, W., Mathijs, E. (2020). Phosphorus and energy flows through the food system of Brussels capital region. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 156, 104687. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104687.
26. Fisher, R.M., Alvarez-Gaitan, J.P., Stuetz, R.M., Moore, S.J. (2017). Sulfur flows and biosolids processing: using material flux analysis (MFA) principles at wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management*, Vol. 198, 153–162. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.04.056.
27. Yuan, H., Xing, S., Lu, T., Huhetaoli, Chen, Y., Kobayashi, N. (2014). Main organic pollutants migration and transformation laws in sewage sludge landfill and composting process. *WIT Transactions on Biomedicine and Health*, Vol. 18, 1183–1190. DOI: 10.2495/HHME131342.
28. Mills, N., Pearce, P., Farrow, J., Thrope, R.B., Kirkby, N.F. (2014). Environmental & economic life cycle assessment of current & future sewage sludge to energy technologies. *Waste Management*, Vol. 34, 185–195. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.08.024.
29. Grilc, V., Mislej, V., Šalej, S. (2010). Thermal utilisation of biologically stabilised and dried waste sludge from wastewater treatment plants. *3rd International Symposium on Energy from Biomass and Waste*. Venice.
30. Chen, G., Wang, X., Li, J., Yan, B., Wang, Y., Wu, X., Velichkova, R., Cheng, Zh., Ma, W. (2019). Environmental, energy, and economic analysis of integrated treatment of municipal solid waste and sewage sludge: A case study in China. *Science of the Total Environment*, Vol. 647, 1433–1443. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.104.
31. Pincetl, S. (2012). A living city: using urban metabolism analysis to view cities as life forms. *Metropolitan Sustainability. Understanding and Improving the Urban Environment. Woodhead Publishing Series in Energy*, 3–25. DOI: 10.1533/9780857096463.1.3.
32. Soundararajan, K., Ho, H.K., Su, B. (2014). Sankey diagram framework for energy and exergy flows. *Applied Energy*, Vol. 136, 1035–1042. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.08.070.
33. Trulli, E., Torretta, V., Rada, E.C. (2016). Water restoration of an urbanized karst stream by free-water-surface constructed wetlands as municipal wastewater post treatment. *UPB Scientific Bulletin. Series D*, Vol. 78, Issue 4, 163–174.
34. Kiselev, A.V., Magaril, E.R. (2019). Ensuring Water Treatment Assessment within Spatial Ecological and Economic Security Framework Towards Circular Economy (Obespechenie effektivnosti vodoochistki v usloviiakh tsirkuliarnoi ekonomiki kak element ekologo-ekonomicheskoi bezopasnosti territorii). *Vestnik UrFU. Seriya ekonomika i upravlenie (Bulletin of Ural Federal University. Series Economics and Management)*, Vol. 18, no. 6, 911–929 (In Russ.).

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

### Kiselev Andrey Vladimirovich

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

**Magaril Elena Romenovna**

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

**Glushankova Irina Samuilovna**

Doctor of Technical Science, Professor, Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia (614990, Perm, Komsomolsky avenue, 29); ORCID 0000-0003-3376-8000; e-mail: irina\_chem@mail.ru.

**Rudakova Larisa Vasilyevna**

Doctor of Technical Science, Professor, Head of Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia (614990, Perm, Komsomolsky avenue, 29); ORCID 0000-0003-3292-8359; e-mail: larisa.rudakova.007@gmail.com.

**FOR CITATION**

Kiselev A. V., Magaril E. R., Glushankova I. S., Rudakova L. V. Analysis of Sewage Sludge Alternatives Towards Circular Economy. Journal of Applied Economic Research, 2020, Vol. 19, no. 3, 329–347. DOI: 10.15826/vestnik.2020.19.3.016.

**ARTICLE INFO**

Received May 19, 2020; Revised July 15, 2020; Accepted July 24, 2020.

