








Методический подход к эколого-экономической оценке проектов биогазовой энергетики

Е. Р. Магарил  , *Л. Д. Гительман* , *А. П. Караева* ,
А. В. Киселев , *М. В. Кожевников* 

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

Аннотация. Задача рационального энергообеспечения промышленных предприятий, особенно энергоемких, с одновременной минимизацией негативного экологического воздействия, приобретает особую актуальность на пути четвертого энергетического перехода и при формировании циркулярной экономики, нацеленной на ресурсную оптимизацию, энергосбережение, углеродно-нейтральные технологии, безотходное производство. В данном контексте для России ценным ресурсом мог бы стать весьма значительный объем накопленных органических отходов, пополняемый ежегодно. Одним из потенциальных направлений, определяющих эффективность их энергетического использования, является развитие и внедрение биогазовых технологий. Целью исследования является разработка методического подхода к эколого-экономической оценке проектов биогазовой энергетики. Гипотеза исследования заключается в необходимости учета стратегий и принципов циркулярной экономики при эколого-экономической оценке биогазовых энерготехнологий. Изучены возможности и особенности введения установок на биогазе и других возобновляемых источников энергии в систему региональной энергетики России, показано их соответствие принципам циркулярной экономики. На основе обобщения подходов к определению эффективности реализации стратегий циркулярной экономики и учета технико-экономических особенностей отрасли сформированы соответствующие показатели эколого-экономической оценки энергетических инвестиционных проектов. Обоснованы методические особенности эколого-экономической оценки объектов энергетики с учетом предельных показателей эффективности, соответствующих реализации стратегий циркулярной экономики, сформулированы принципы и этапы оценки. Разработаны альтернативные подходы к эколого-экономической оценке инвестиционных проектов с использованием интегрального показателя эколого-экономической эффективности, рассчитываемого с учетом значимой для региона совокупности возникающих как положительных, так и отрицательных последствий экологического и экономического характера; агрегированных частных показателей, учитывающих природоёмкость и экологичность проектов; комплексной балльной оценки. Сформированный подход может быть использован при эколого-экономической оценке внедрения биогазовых технологий, а также при сравнении альтернативных вариантов проектов модернизации в энергетике и упрощают расчеты, облегчая принятие управленческих решений, ввиду учета только наиболее значимых для региона реализации проекта его положительных и отрицательных результатов.

Ключевые слова: циркулярная экономика; энергетический переход; региональная энергетика; биогазовые энерготехнологии; эколого-экономическая оценка; углеродно-нейтральная энергия; безотходное производство.

1. Введение

Переход к циркулярной экономике, взаимосвязанный с энергопереходом к низкоуглеродному производству, стал приоритетом развития во многих странах мира, определяющим кардинальные изменения в государственной политике^{1, 2} [1]. Цели относительно снижения объемов отходов, повышения эффективности использования материальных и энергетических ресурсов устанавливаются для экономики в целом и отдельных отраслей промышленности, среди которых ведущая роль

¹ CACE Overview, 2018. URL: <http://en.chinacace.org/about?tag=Overview>.

² Towards the Circular Economy. Economic and business rationale for an accelerated transition. URL: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>.

отводится энергетике, одновременно производящей и потребляющей значительный объем отходов разного типа. Так, в России объем отходов энергетического сектора превышает 90%^{3, 4, 5}.

Особое внимание уделяется возрастанию воздействия энергетики на окружающую среду, которое при росте потребления энергии без изменения технологий и вида энергоносителей вызывает серьезные негативные экологические последствия, в том числе климатические изменения (рис. 1).

³ OECD Statistics. URL: <https://stats.oecd.org>

⁴ Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/>

⁵ Circular Economy with Focus on Waste, Renewable Energy and Sustainable Bioenergy in Estonia. European Parliament briefing, 2017. URL: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2017/602038/IPOL_BRI\(2017\)602038_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2017/602038/IPOL_BRI(2017)602038_EN.pdf)



Рис. 1. Основные факторы воздействия энергетики на окружающую среду

Fig. 1. Key factors of the energy sector’s impact on the environment

Это, в частности, определяет высокую значимость повышения эффективности использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Энергетическое использование биогаза, получаемого из органических отходов, позволяет снизить потребление ископаемых топлив, одновременно переводя отходы в категорию вторичных энергетических ресурсов. Однако для повышения объективности принятия управленческих решений по внедрению соответствующих проектов в условиях перехода к циркулярной экономике требуется разработка методических подходов к их эколого-экономической оценке, которые на сегодняшний день в целостном виде не сформулированы.

Целью исследования является разработка методического подхода к эколого-экономической оценке проектов биогазовой энергетики.

Гипотеза исследования заключается в необходимости учета стратегий и принципов циркулярной экономики при эколого-экономической оценке биогазовых энерготехнологий.

2. Теоретическая проработанность проблемы

2.1. Теоретические аспекты трансформации энергетики в условиях перехода к циркулярной экономике

Для энергетики идеология циркулярной экономики, согласно данным [2–4], может быть реализована в трех траекториях:

1) *взаимодействие с конечными потребителями и разработка соответствующих инновационных бизнес-моделей* прежде всего на основе программ управления спросом, развития двухсторонних (платформенных) рынков электро- и теплоэнергии, углубления электрификации бытовых и промышленных процессов;

2) *формирование устойчивой кооперации «энергетика – промышленность – коммунальное хозяйство – муниципалитет (регион)»*, обеспечивающее оптимизацию энергетических и материальных потоков, внедрение механизмов минимизации потерь энергоносителей, развитие распределенной генерации;

3) *организация замкнутого цикла непосредственно энергетического производства*. Приоритетом здесь являются использование ВИЭ, утилизация отходов и их применения в повторном производственном цикле.

В основе указанных траекторий лежит идея перехода к безотходному энергетическому производству за счет использования энергетических ресурсов в замкнутом цикле «первичное сырье – производство – потребление – вторичное сырье (рис. 2).

Изменения в характере производственных процессов, происходящие в контексте циркулярной экономики, приводят к трансформации бизнес-моделей промышленных предприятий (*первая траектория*), в которых доходная часть зависит не столько от продаж конечных продуктов и сервисов, сколько от оптимизации материальных потоков и разнообразного использования ресурсов, материалов и конечных продуктов в течение продолжительного времени, а ориентация направлена на повышение операционной эффективности и организационного порядка. В табл. 1 приведены различные варианты таких бизнес-моделей применительно к энергетическому контуру.

При реализации *второй траектории* районное производство тепла и электроэнергии, водоснабжение и канализация, сектор утилизации отходов могут представлять единую технологическую систему [8, 9]. В качестве примера можно привести район Стокгольма Хаммарби Съестада, дизайн

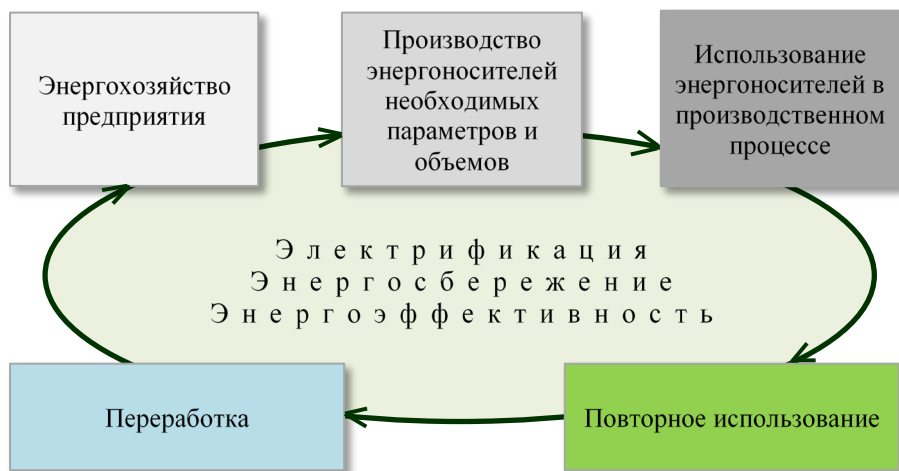


Рис. 2. Функционирование промышленной энергетики в циркулярной экономике
 Fig. 2. The functioning of industrial energy in the circular economy

Таблица 1. Бизнес-модели, соответствующие циркулярной экономике
 Table 1. Business models that correspond to the circular economy

Тип	Характеристика	Пример из энергетики
Круговые цепочки добавленной стоимости	Замена ограниченных ресурсов на полностью возобновляемые источники	Royal DSM разработала целлюлозный биоэтанол, в котором сельскохозяйственные отходы преобразуются в возобновляемое топливо для генерации
Восстановление и переработка	Использование технологических возможностей для восстановления и повторного применения ресурсов	Fortum реализует пилотные проекты экопоселений, в которых биоотходы, отходы пластмассы, металлов и топлива перерабатываются для энергоснабжения промышленных производств
Увеличение жизненного цикла продукта	Продление срока получения экономической выгоды посредством восстановления, ремонта, модернизации или ремаркетинга продукта	E.On осуществляет ремонтное обслуживание энергетического оборудования по состоянию генерирующих активов
Обмен и совместное потребление	Создание платформ для обмена товарами или активами, имеющими небольшой коэффициент использования. Создание единых экосистем промышленных, коммунальных предприятий и потребителей	Yandex использует тепло, вырабатываемое оборудованием российского дата-центра в Мянцеале (Финляндия), в сети районного централизованного теплоснабжения. При этом снижаются операционные затраты Yandex, общая потребность в топливе для нужд централизованного отопления, а также выбросы углекислого газа

Окончание табл. 1

End of table 1

Тип	Характеристика	Пример из энергетики
Продукт как услуга	Клиенты используют продукцию путем «аренды» с оплатой по факту использования	Philips при поставках энергетического оборудования оставляет за собой право владения им. Клиенты не платят за монтаж и устранение неисправностей – это является сервисной составляющей договора

Источник: составлено авторами по данным^{*,**} [5–7]

* Circular economy in the energy industry. Deloitte, 2018. URL: https://energia.fi/files/2287/Deloitte_2018_-_Circular_economy_in_the_energy_industry_-_Summary_report...pdf

** Circular Advantage: Innovative Business Models and Technologies to Create Value in a World without Limits to Growth. URL: https://www.accenture.com/t20150523T053139__w__us-en/_acnmedia/Accenture/Conversion-Assets/DotCom/Documents/Global/PDF/Strategy_6/Accenture-Circular-Advantage-Innovative-BusinessModels-Technologies-Value-Growth.pdf

и строительство которого велось полностью в соответствии с канонами модели экономики замкнутого цикла [10, 11]. Централизованное теплоснабжение этого района осуществляется за счет двух источников: мини-ТЭЦ, работающей на биомассе (древесной стружке), и выработки пара, произведенного на очистных сооружениях. Метан из сточных вод используется для бытовых нужд и в качестве транспортного топлива, в то время как ил с очистных сооружений применяется для удобрения леса.

Другим примером является один из промышленных кластеров Дании. Производитель лекарств NovoNordisk, производитель ферментов Novozymes и DONGEnergy вместе с крупнейшим нефтеперерабатывающим заводом Дании, которым управляет Statoil, обмениваются доходами и побочными продуктами [12]. Statoil также сократил выбросы, превратив серу и азот в удобрения, а использованную воду возвращает электростанции и в водохранилище.

С точки зрения движения по *третьей траектории* представляется целесообразной реализация технологического сжигания топлива в кипящем слое, что приводит к повышению КПД

энергоблока, обеспечивает экологическую безопасность, а также позволяет применять образующуюся золу при производстве строительных материалов. Другой вариант – минимизация отходов за счет создания автономных систем электроснабжения (рис. 3), которые могут включать фотоэлектрические преобразователи, мини-ТЭЦ, работающую, например, на топливной древесной щепе, дизельную электростанцию, котельную, использующую топливные гранулы – пеллеты [13], установки на биогазе и биометане [14, 15] и другое оборудование.

Для реализации всех обозначенных траекторий особую актуальность представляют биогазовые технологии. В европейских и некоторых азиатских странах приняты специальные меморандумы по развитию биогазовой энергетики. Например, в Индии суммарная установленная мощность ВИЭ уже в 2022 г. должна достигнуть 175 ГВт, что является одним из самых высоких показателей в странах G20 и достигается в первую очередь за счет использования биогаза⁶.

⁶ Global energy transformation. A roadmap to 2050 // IRENA. 2018. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf

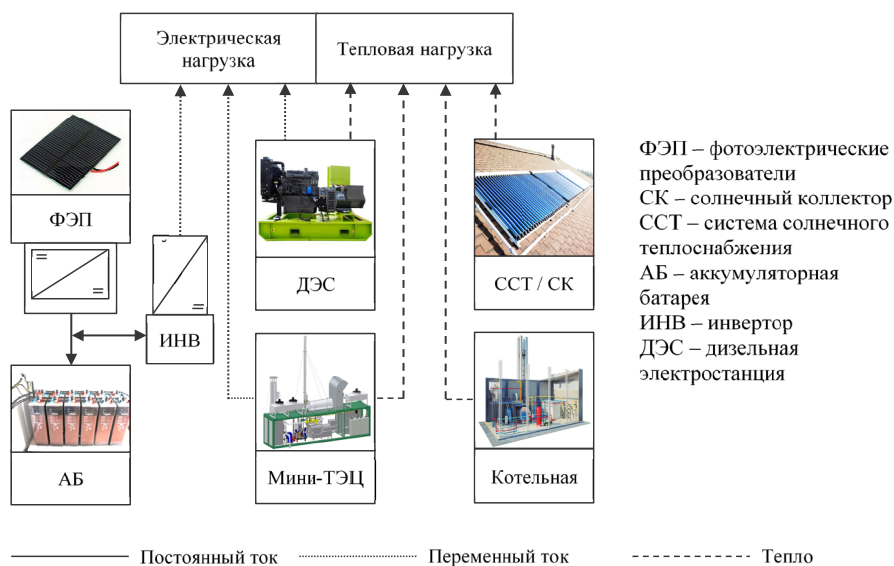


Рис. 3. Пример автономной системы энергоснабжения промышленного предприятия
Fig. 3. An example of the autonomous power supply system of an industrial enterprise

Финский город Лаппеенранта к 2028 г. планирует полностью перейти на биогаз как основной энергоноситель для генерации электро- и теплотенергии [16], а для Европы в целом наибольший интерес биогазовые технологии представляют при развитии экологически чистого авто- и авиатранспорта⁷.

Глобальную энергетическую мощность биогазовых установок по состоянию на конец 2020 г. оценило международное агентство по возобновляемой энергетике (International Renewable Energy Agency – IRENA) (рис. 4).

Как видно из представленных на рис. 4 данных, глобальными лидерами в области создания и эксплуатации генерирующих мощностей, работающих на энергии биогаза, являются страны Европейского союза, Соединенные Штаты Америки и Китай. В России реализация таких проектов носит единичный характер.

⁷ Sector Coupling in Europe: Powering Decarbonization. Potential and Policy Implications of Electrifying the Economy. URL: <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Sector-Coupling-Report-Feb-2020.pdf>

На уровне ООН также ведется разработка мероприятий развития низкоуглеродного транспорта на основе принципа вариативности использования ВИЭ (в первую очередь технологий биоэнергетики и водорода) с глубокой проработкой сценариев электрификации; разрабатываются планы по расширению использования биомассы и в других секторах экономики, особенно в качестве замены топлива с высокой плотностью энергии (плутоний, уголь)⁸. Получают распространение международные инициативы по развитию биоэнергетики, например, Global Bioenergy Partnership (Глобальное партнерство в области биоэнергетики⁹) и Biofuture Platform (Платформа биобудущего¹⁰).

⁸ Theme report on energy transition. Towards the achievement of SDG 7 and net-zero emissions. United Nations. 2021. URL: https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/2021-twg_2-062321.pdf

⁹ GBEP – Global Bioenergy Partnership. URL: <http://www.globalbioenergy.org>

¹⁰ Biofuture Platform. URL: <http://www.biofutureplatform.org>

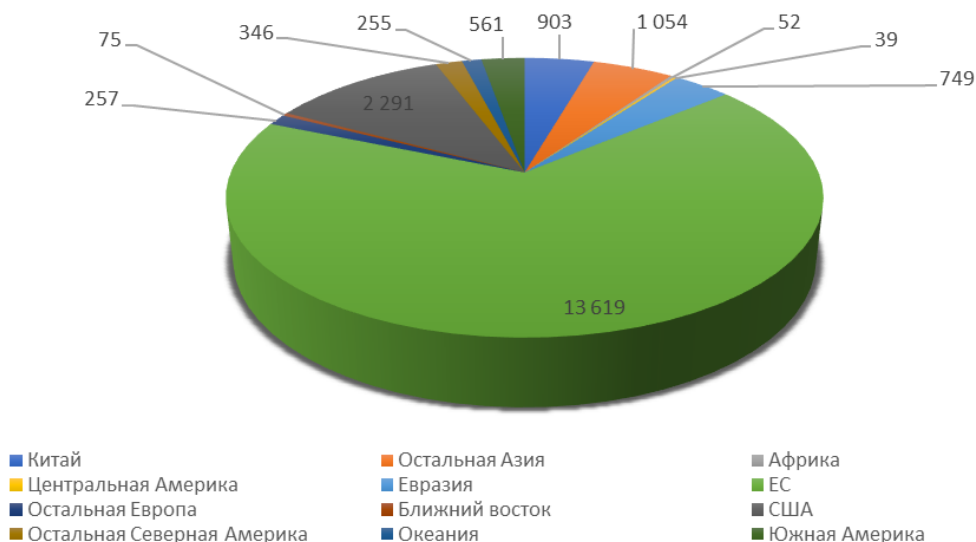


Рис. 4. Глобальная энергетическая мощность биогазовых установок в МВт по состоянию на конец 2020 г.

Fig. 4. Global energy capacity of biogas plants in MW as of Dec 2020

Источник: Renewable capacity statistics 2021. IRENA. 2021. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Apr/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2021.pdf

В России основные намерения по развитию биогазовых энергетических технологий зафиксированы в дорожной карте «Биоэнергетика в Российской Федерации», подготовленной в рамках деятельности специализированной технологической платформы¹¹.

2.2. Теоретические основы эколого-экономической оценки биогазовых энерготехнологий

В настоящее время не существует единых признанных подходов к оценке эколого-экономической эффективности инвестиционных проектов как в целом, так и применительно к реализации проектов биогазовой энергетики. Большинство стран мира в качестве базовых рекомендаций к оценке эффективности проектов используют «Evaluation Manual», разработанный

United Nations Industrial Development Organization (UNIDO)¹², на территории Европейского союза (ЕС) действуют рекомендации, разработанные Европейской Комиссией «Guideto Cost-Benefit Analysis of Investment Projects»¹³, в России таким документом является «Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов»¹⁴.

Наиболее распространенными подходами к оценке эколого-экономической эффективности являются подходы

¹² Evaluation Manual. UNIDO Independent Evaluation Division. URL: <https://www.unido.org/sites/default/files/files/2018-04/Evaluation%20Manual%20e-book.pdf>

¹³ Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects. URL: https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/studies/pdf/cba_guide.pdf

¹⁴ Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (утв. Минэкономки РФ, Минфин РФ, Госстроем РФ 21.06.1999 № ВК 477). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_28224/

¹¹ Биоэнергетика в Российской Федерации. Дорожная карта на 2019–2030 гг. URL: http://tp-bioenergy.ru/upload/file/dorozhnaya_karta_tp_bioehnergetika.pdf

«затраты – выгоды» и «затраты – эффективность». Оба подхода в большей степени сфокусированы на экономической эффективности проекта, экологическая составляющая оценивается на уровне экологических затрат или экологических выгод [17].

Для проведения полноценной оценки экологической эффективности инвестиционных проектов необходимо использовать дополнительные инструменты и рекомендации^{15, 16, 17}, так как упоминаемые выше рекомендации и подходы не содержат полной процедуры ее проведения. Кроме этого, для повышения результативности оценки необходимо адаптировать подходы под разные сектора экономики [17].

Обзор научной литературы позволил выделить наиболее распространенный подход к оценке экологической эффективности – Life Cycle Assessment (LCA), который подразумевает оценку влияния проекта на окружающую среду на всех стадиях и подробная процедура которого представлена в международном стандарте ISO 14040:2006¹⁸. Несмотря на стандартизированную процедуру проведения LCA, результаты оценки могут значительно различаться в зависимости от выбранной функциональной единицы (количественно выраженная

результативность системы жизненного цикла продукции, используемая в качестве единицы сравнения) [18].

Так, при оценке биогазового энергетического проекта авторы [18, 19] используют в качестве функциональной единицы объем производимой энергии для повышения объективности оценки; в работе [20] авторы используют 1 МДж биотоплива как функциональную единицу, чтобы устранить широкий разброс результатов из-за различий в виде биотоплив. Некоторые ученые отмечают, что возможность самостоятельно выбирать функциональную единицу свидетельствует о субъективности подхода [21] и неточности получаемых результатов [22].

С целью повышения объективности оценки экологической эффективности проектов в биоэнергетике Martin-Gamboa et al. и ряд других авторов [23–25] предлагают использование в рамках LCA анализа среды функционирования (Data Envelopment Analysis – DAE), который позволяет проводить сравнительный анализ деятельности сложных систем. Включение DAE позволяет расширить перечень критериев оценки, и оценивать экологическую эффективность совместно с техническими, экономическими и социальными факторами.

A. Roos и S. Ahlgren [26] отмечают, что современные подходы к оценке эффективности проектов биогазовой энергетики должны отображать, насколько проект соответствует принципам устойчивого развития и циркулярной экономики. N. Escobar et al. и другие авторы в работах [27, 28] предлагают применять процедуру последовательного LCA вместо атрибутивного, так как его проще интегрировать в общую процедуру эколога-экономической оценки, и он позволит оценивать экологическую эффективность проекта в долгосрочной

¹⁵ Environmental Impact Assessment of Projects. Guidance on Scoping. URL: https://ec.europa.eu/environment/eia/pdf/EIA_guidance_Scoping_final.pdf

¹⁶ Приказ Минприроды России от 01.12.2020 № 999 «Об утверждении требований к материалам оценки воздействия на окружающую среду». URL: <https://docs.cntd.ru/document/573339130>

¹⁷ The World Bank OP 4.01 - Environmental Assessment. URL: http://web.worldbank.org/archive/website01541/WEB/0_2097.HTM

¹⁸ ISO 14040:2006 Environmental Management – Life Cycle Impact Assessment. URL: <https://www.iso.org/standard/37456.html>

перспективе. Последовательные LCA стремятся определить экологические последствия решения или предлагаемого изменения в изучаемой системе и, таким образом, ориентированы на будущее и требуют учета рыночных и экономических последствий [29].

Т. Kurka в [30] использует метод анализа иерархий для оценки проектов в биоэнергетике и принятия решения о выборе того или иного проекта для реализации. К ключевым экологическим факторам, которые оказывают наибольшее влияние на результативность оценки, автор относит объем выбросов парниковых газов, общее влияние объекта биоэнергетики на качество атмосферного воздуха и объем образования отходов.

М. Aghbashlo et al. [31] предлагают использование эксэргоэкологического (англ. – *exergoenvironmental*) анализа для оценки эффективности объектов биоэнергетики. Подход, предложенный авторами, включает три стадии оценки: проведение эксэргетического анализа производства энергии, процедура которого описывается D. Maes и S. Van Passel в работе [32], проведение стандартного LCA и проведение эксэргоэкологического анализа [33].

Необходимо отметить, что большинство авторов вне зависимости от подхода к оценке используют стандартные экономические показатели для оценки экономической эффективности проекта (NPV, IRR, ROI, период окупаемости) [33, 34]. Некоторые авторы включают такой показатель, как затраты на снижение выбросов CO₂ (*CO₂ mitigation costs*) [35]. Перечень показателей экологической оценки носит в большей степени обобщенный характер. Так, например, большая часть авторов оценивает потенциал глобального потепления (*global warming potential – GWP*) с помощью расчета удельных

выбросов CO₂ на единицу произведенной энергии [36, 37]. Масштаб землепользования, влияние проекта биоэнергетики на биоразнообразии территорий также оцениваются многими учеными как важные показатели экологической оценки эффективности проектов биоэнергетики [38–40].

А. Maxim в [40] говорит о необходимости выявления и оценки косвенных последствий землепользования в биоэнергетике: с одной стороны, использование земли для проектов биоэнергетики благоприятно влияет на макроэкономические показатели региона, с другой – биоэнергетика может оказывать негативное влияние на состояние почв в регионе в долгосрочной перспективе. Расчет показателей водопользования достаточно часто используется для оценки эффективности проектов биоэнергетики, в которых в качестве сырья для производства топлива используют топливные культуры [41–43].

Степень переработки отходов производства на объектах энергетики и общий объем их образования включается многими учеными в систему эколого-экономической оценки [25, 39, 44]. Например, X. Wu et al. вводят показатель оценки полезного действия при переработке отходов производства (англ. – *recycle benefit ratio*) [45].

Многие ученые говорят о необходимости разработки системы показателей, которая позволила бы оценивать соответствие объектов биоэнергетики принципам устойчивого развития (англ. – *sustainability indicators*) [26, 46, 47]. Примеры использования интегральных показателей для оценки экологической эффективности представлены в работах [31, 46].

Исходя из обзора научной литературы, можно сделать вывод, что LCA является наиболее распространенным подходом к оценке эффективности проектов

биоэнергетики. При этом большинство подходов к оценке ограничиваются расчетом стандартных экономических показателей эффективности (NPV, IRR, ROI и др.), в которые включаются экологические затраты. Оценка экологической эффективности проектов производится на отдельном этапе и чаще всего включает такие показатели, как объем выбросов парниковых газов, площадь изъятия земель для производства биотоплива и для объектов биоэнергетики, степень вторичного использования ресурсов и объем использования водных ресурсов [48]. При этом, ввиду разнообразия способов получения биотоплива, подходы к экологической оценке и используемые показатели могут значительно различаться.

Многие авторы отмечают необходимость разработки стандартизованного комплексного подхода к эколого-экономической оценке проектов биоэнергетики [34, 49], где будет учитываться специфика производственного процесса, экономические, экологические, факторы, а также соответствие проекта требованиям циркулярной экономики и устойчивого развития.

Между тем при значительном объеме исследований, посвященных реализации принципов и стратегий циркулярной экономики, до настоящего времени не разработан соответствующий методический подход к эколого-экономической оценке биогазовых энергетических проектов с учетом специфики перехода к экономике замкнутого цикла.

3. Методология исследования

3.1. Материалы и методы исследования

Общенаучный, системный подход, структурно-логический анализ использовались для формирования концепции эколого-экономической оценки инвестиционных проектов в энергетике,

выделения значимых факторов, формирующих эколого-экономический эффект проектов внедрения биогазовых технологий.

В качестве объекта исследования рассматриваются стационарные энергогенерирующие объекты, потребляющие уголь, нефть, газ и объекты малой энергетики, использующие биогазовые технологии.

Теоретическая и методологическая основа исследования представлена трудами отечественных и зарубежных ученых в области оценки эффективности проектов в энергетике, реализации принципов циркулярной экономики, перспектив перехода на возобновляемые источники энергии, включая биогазовые технологии.

Информационную базу исследования составили данные Федеральной службы государственной статистики России, международных статистических агрегаторов, материалы периодической печати, интернет-ресурсы, официальные отчетные материалы энергетических компаний РФ и Системного оператора ЕЭС, материалы научных конференций, а также результаты исследований, проведенные авторами.

3.2. Процедура исследования

На рис. 5 приведена логическая схема исследования.

На первом этапе авторы, используя доступные информационные источники и научные материалы, исследовали возможности, особенности и мотивацию введения установок на биогазе и других ВИЭ в систему региональной электро- и теплоэнергетики России с оценкой их соответствия расширенным принципам циркулярной экономики (9R) [50, 51]:

1. Refuse: предотвращение потребления природных ресурсов.
2. Reduce: сокращение потребления природных ресурсов.

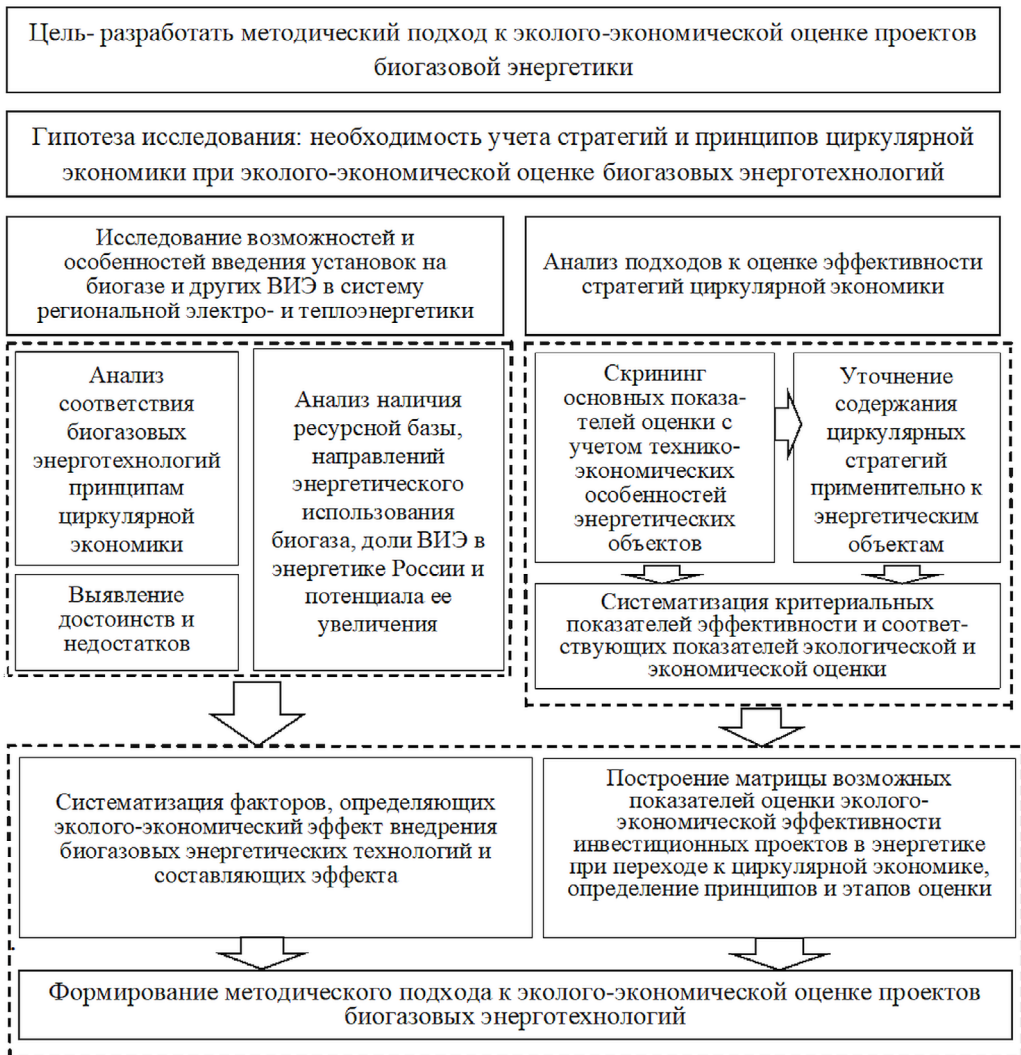


Рис. 5. Логическая схема исследования

Fig. 5. The logical scheme of the study

3. Reuse: повторное использование.
4. Repair: ремонт и техобслуживание.
5. Refurbish: восстановление и обновление.
6. Remanufacture: создание новых продуктов из старых (или из их частей).
7. Repurpose: перепрофилирование использования.
8. Recycle: переработка отходов в сырье.
9. Recover: рекуперация энергии из отходов.

Кроме того, изучали вопросы наличия ресурсной базы, направления

энергетического использования биогаза, достоинства и недостатки технологий, оценивали долю ВИЭ в энергетике России и потенциал ее увеличения.

Результаты, полученные на первом этапе исследования, явились базой для выделения факторов, формирующих эколого-экономический эффект внедрения биогазовых энергетических технологий и составляющих этого эффекта, что является основой для проведения эколого-экономической оценки.

На втором этапе осуществлен отбор и анализ источников в международных

и российской реферативных базах данных (с акцентом на обзорные статьи), посвященных оценке эффективности стратегий, соответствующих базовым принципам циркулярной экономики, выявили основной перечень показателей оценки, предлагаемый различными авторами, и провели их скрининг, с учетом технико-экономических особенностей энергетических объектов.

Это позволило уточнить содержание различных вариантов циркулярных стратегий применительно к энергетическим объектам, адаптировать и систематизировать критериальные показатели эффективности, релевантные каждой из циркулярных энергетических стратегий и сформировать перечень соответствующих показателей экологической и экономической оценки. Обобщение полученных «циркулярных» и используемых в технико-экономическом анализе традиционных показателей дало возможность выстроить матрицу возможных показателей для оценки эколого-экономической эффективности инвестиционных проектов в энергетике с учетом принципов циркулярной экономики.

На третьем этапе исследования авторы сформулировали принципы и этапы проведения оценки, а также предложили методический подход к эколого-экономической оценке проектов биогазовых энерготехнологий,

4. 4. Результаты исследования

4.1. Анализ специфики введения энергетических установок на биогазе и других ВИЭ в систему региональной энергетики

Приоритеты национальных решений с точки зрения обеспечения сокращения выбросов токсичных веществ стационарными и передвижными источниками различны для регионов,

дефицитных по углеводородному сырью, и для стран, обладающих значительными запасами традиционных ископаемых ресурсов. В первом случае необходимо активизировать технологические разработки, повышающие доступность альтернативных видов топлива и энергии. Страны, богатые традиционными энергоресурсами, такие как Россия, в первую очередь должны сосредоточиться на обеспечении энергоэффективности технологических процессов и экономики в целом, повышении качества традиционных топлив. Однако это не противоречит необходимости развития других отраслей промышленности, диверсификации производства и перспективе более широкого освоения альтернативных энергоресурсов.

В связи с изменением масштабов, качества и конфигурации энергетической инфраструктуры и в условиях перехода к циркулярной экономике на первый план выходит развитие региональной электро- и теплоэнергетики, что обусловлено всеобщей интеллектуализацией, децентрализацией и внедрением распределенной генерации и сопровождается повышением требований к надежности, безопасности и экологичности электроснабжения. Региональная энергетика включает энергоустановки малой (распределенной) генерации различных типов, максимально приближенные к потребителям, а также объекты электротранспортной структуры региона. К региональной энергетике относятся в основном когенерационные установки (ТЭЦ) малой и средней мощности – от единиц до десятков МВт, а также использующие нетрадиционные возобновляемые источники разных типов: малые ГЭС, установки, использующие энергию ветра, солнца, биомассы и др. [52].

Установки на биогазе, как и другие виды ВИЭ, являются объектами малой

энергетики, отличающимися высокой гибкостью и адаптивностью по отношению к меняющемуся спросу и пункту размещения. Эти установки максимально приближены к центру нагрузок, что обеспечивает высокую надежность и экономию затрат в электросетевом комплексе. Они требуют меньших удельных капитальных вложений, сроки их сооружения составляют не годы, а месяцы; период окупаемости не превышает трех лет. Полная автоматизация позволяет поддерживать оптимальные режимы работы и, как следствие, обеспечивать высокую энергоэкологическую эффективность. Развитие распределенной генерации в регионах ведет к сокращению потребностей в резервных мощностях в энергосистемах.

Важно подчеркнуть, что данные энергообъекты, включенные в контур региональной энергетики, не могут рассматриваться в качестве альтернативы системной энергетике, их недопустимо противопоставлять, у них разные взаимодополняющие функции [52].

При этом оптимальная доля мощности региональной энергетики в энергообеспечении будет различаться по территории страны в зависимости от режимных, ресурсных и природно-климатических факторов и ограничений (например, пиковые нагрузки; спрос на электроэнергию в отсутствии тепловой нагрузки ТЭЦ; возможности развития генерации на возобновляемых энергоресурсах).

Основная функция регионального контура в структуре энергетики – компенсация повышенной экономической инерционности системного контура, в котором сосредоточены крупные ТЭС, АЭС, ГЭС. В итоге суммарные вводы энерго мощностей в обоих контурах в максимальной степени приводятся в соответствие с темпами спроса на электроэнергию при улучшении стоимостных, надежностных и экологических характеристик в масштабе энергосистемы.

Доля ВИЭ в энергетике РФ пока незначительна и без учета крупных ГЭС составляет менее 1% (рис. 6). Поэтому

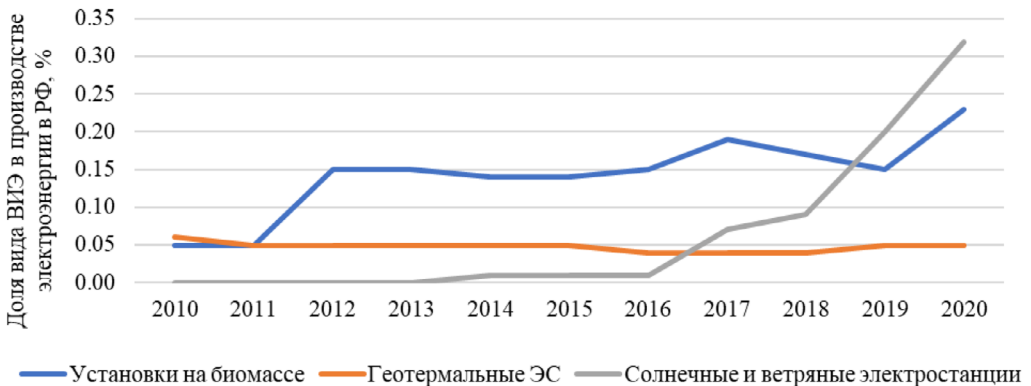


Рис. 6. Доля ВИЭ в общей выработке электроэнергии в РФ в 2010–2020 гг., %

Fig. 6. The share of RES in total electricity generation in the Russian Federation in 2010–2020, %

Источник: построено авторами с использованием данных статистического интернет-агрегатора EnerData, Федеральной службы государственной статистики, отчетов о функционировании Единой энергетической системы России Системного оператора за 2010–2020 гг., отчетности ПАО «Камчатскэнерго» и ПАО «ДЭК».

Примечание: в связи с отсутствием каких-либо достоверных статистических данных не представлена динамика изменения доли малых ГЭС в производстве электроэнергии; по оценкам, приведенным в [53], она варьируется в диапазоне 0,26–0,29%.

при оценке эффективности развития малой энергетики на основе ВИЭ следует иметь в виду, что в России избыток энерго мощностей составляет более 20 ГВт (примерно 8% всех мощностей) [52], в основном за счет малых ГЭС, а также когенерационных установок на биомассе, которые пока что в большей степени используются для производства тепла, нежели электроэнергии. Хотя в целом по стране потребность в новых электростанциях, как традиционных, так и на основе ВИЭ, отсутствует, это не означает, что в отдельных субъектах РФ не актуальна оптимизация структуры энерго мощностей, в частности для покрытия пиковых нагрузок или улучшения экологической обстановки.

Необходимость замены традиционных углеводородных видов топлива возобновляемыми источниками энергии на пути глобального энергоперехода и в связи с перспективами введения трансграничного углеродного налога и внутреннего углеродного налога будет неизбежно актуализировать адаптацию отраслей России к новым условиям. Как следствие, в России будет расширяться внедрение соответствующих углеродно-нейтральных технологий, включая биогазовые. При сжигании биогаза в атмосферу поступает в виде углекислого газа тот углерод, который был поглощен растением, и после прохождения всех звеньев пищевой цепи перешел в состав органических отходов, при этом одновременно экономится ископаемое топливо и предотвращается поступление углерода, полученного при его сжигании.

Новый подход к производству энергии будет интегрировать все большее количество малых и средних электростанций, работающих на возобновляемых источниках энергии, с национальной или региональной электросетью.

В этом случае типичные маломощные (от 0,1 до 1 МВт) установки, состоящие из двигателей внутреннего сгорания, соединенных с электрогенератором и работающих на биогазе, становятся одной из привлекательных альтернатив с учетом реалистичных затрат и высокого положительного влияния на окружающую среду.

Использование биогаза для производства электроэнергии ограничено высоким содержанием в нем H_2S (1800–5000 ppm), вызывающем коррозию металлоконструкций и CO_2 (~40%), снижающем выходную мощность системы. Для устранения этих негативных эффектов применяют различные системы для снижения содержания H_2S и CO_2 в биогазе¹⁹ [54].

Применение биогаза для производства тепловой и электрической энергии позволит превратить в ценный ресурс отходы аграрно-промышленного комплекса, пищевой промышленности, водоочистки, твердые коммунальные отходы, одновременно сберегая дефицитные ископаемые топлива, земельные, почвенные, водные ресурсы, что соответствует основополагающим принципам циркулярной экономики. Биогазовые технологии могут в перспективе позволить перейти на полностью автономное энергообеспечение агропромышленным предприятиям, станциям водоочистки, решая проблемы зависимости от тарифов и сбоев в поставках энергии, освобождая от необходимости вносить плату за хранение отходов, с одновременным получением бесплатных экологически чистых удобрений.

В табл. 3 приведена классификация видов биогаза по типу исходного сырья. Кроме того, в качестве источников получения биогаза можно рассматривать

¹⁹ Возобновляемая энергетика России. «За» и «против» развития. URL: http://www.imemo.ru/ru/conf/2012/22112012/BEZ_22112012.pdf

Таблица 3. Классификация видов биогаза

Table 3. Classification of biogas types

Компоненты биогаза	Содержание компонентов, % об.		
	Газ метантенков*	Газ отходов сельскохозяйственного производства**	Свалочный газ***
CH ₄	50–70	50–80	50–80
CO ₂	30–50	30–50	20–50
N ₂	0–3	0–3	0–3
O ₂	0–1	0–1	0–1
H ₂	0–2	0–2	0–5
CO	0–1	0–1	0–1
H ₂ S	0–0,8	<1,0	0–1
Силоксаны	Следы	Следы	Следы

Источник: составлено авторами с использованием данных [55, 56].

Примечания: *источник получения – обезвреживание стоков на очистных канализационных сооружениях; **образуется в биогазовых установках при сбраживании отходов сельскохозяйственных производства; ***получают на полигонах из отходов, содержащих органические компоненты (образуется с течением времени по мере биоразложения слоев отходов на полигонах и свалках).

различные органические потоки из муниципальных, жилых источников и предприятий. Следует отметить, что, поскольку использование биогаза снижает потребление ископаемого топлива, являясь «углеродно-нейтральным», это побуждает многие правительства субсидировать и тем самым продвигать его производство [55].

Основным компонентом биогаза является метан, который при поступлении в атмосферу вносит вклад в парниковый эффект в 28 раз больший вклада углекислого газа. Следовательно, энергетическое использование биогаза, предотвращающее выделение метана, имеет значительный положительный климатический эффект. При очистке биогаза от примесей и получении из него биометана, который по составу не отличается от природного газа, он может поступать в систему газоснабжения вместе с природным газом. Неочищенный биогаз

может использоваться для производства тепловой или электроэнергии при подаче в котлы или электрогенерирующие установки (при соответствующих теплофизических параметрах биогаза, позволяющих вырабатывать электроэнергию), отработавший в энергоагрегате биогаз целесообразно направить на отопление, горячее водоснабжение.

Следует отметить, что теплота сгорания биогаза из-за примесей меньше, чем теплота сгорания природного газа и угля (в диапазоне 18,0–27,5 МДж/м³ в зависимости от содержания метана), но при этом объемы его потенциального использования весьма значительны. Кроме того, угольные котельные, в отличие от биогаза, оказывают большое негативное экологическое воздействие [57].

Для энергетического использования биогаза в мировой практике используют следующие подходы:

– сжигание для производства тепловой энергии;

– очистка биогаза с его последующим использованием в устройствах генерации электрической и тепловой энергии;

– очистка биогаза для дальнейшего использования в качестве газомоторного топлива;

– получение биометана (содержание CH_4 94–95%) путем обогащения биогаза для использования в газовых сетях общего назначения;

– сжижение биогаза для получения жидкого топлива [58].

В табл. 4 представлены данные по возможной экономии традиционных углеводородных топлив при использовании годового энергетического потенциала свалочного газа полигона твердых коммунальных отходов. При этом выбросы диоксида серы и оксидов азота значительно ниже.

В РФ зоны децентрализованного энергоснабжения (15% общего производства электроэнергии) составляют более 2/3 территории страны (отдаленные районы Крайнего Севера, Сибири, Дальнего Востока). Развитие энергетики

в этих зонах, естественно, предполагает преимущественное использование местных энергоресурсов и возобновляемых источников, при этом потенциал производства биогаза в России и в других регионах является значительным ввиду существенного ежегодного объема отходов органического происхождения. В частности, годовой объем осадков сточных в России в пересчете на сухое вещество в 2018–2020 гг. составил 1,96–3 млн т [60, 61], отходов производства пищевых продуктов 168,7 млн т, отходов сельского, лесного хозяйства, охоты, рыболовства и рыбоводства 45,2 млн т [61], образование твердых коммунальных отходов, по данным Росприроднадзора²⁰, составило 48,5 млн т, причем основной объем (более 74%) направляется на захоронение.

Несмотря на децентрализованный характер данных энергосистем, именно в этих регионах в перспективе планируется активное развитие промышленности. Поэтому уже сегодня необходимо

²⁰ Основные показатели охраны окружающей среды. Статистический бюллетень. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oxr_bul_2021.pdf

Таблица 4. Сравнение годового потребления энергоресурсов при производстве энергии, эквивалентной годовому энергетическому потенциалу свалочного газа

Table 4. Comparison of annual energy consumption in the production of energy equivalent to the annual energy potential of landfill gas

Вид энергоресурса, ед. изм.	Годовое потребление ресурса, необходимое для производства энергии, получаемой за счет сжигания годового объема свалочного газа*
Свалочный газ, тыс.м ³ /год	7000,8
Уголь, тыс.т/год	7,52
Нефть, т/год	3,11
Природный газ, тыс.м ³ /год	3,98

Источник: составлено авторами с использованием данных [59].

Примечание: *расчетный энергетический потенциал рассматриваемого объема свалочного газа 161,2 ТДж/год.

разрабатывать конкретные проекты интеграции в энергосистемах крупных мощностей с установками на биогазе и использование других ВИЭ.

Таким образом, Россия имеет мотивацию и располагает возможностями для развития проектов биогазовой энергетики, особенно с учетом территориальных особенностей страны, а также имеет значительный потенциал наращивания доли биогазовой энергетики ввиду значительного располагаемого объема органических отходов. Проведенный авторами анализ показывает, что проекты биогазовой энергетики соответствуют принципам циркулярной экономики, прежде всего расширение их доли будет способствовать сокращению и предотвращению потребления природных ресурсов (refuse, reduce), переработке отходов в сырье (при получении биометана, recycle), рекуперации энергии из отходов (recover).

Очевидно, что решающим при принятии решений о целесообразности внедрения энергетических биогазовых технологий являются результаты эколого-экономической оценки, учитывающей стратегии циркулярной экономики и соответствующие показатели эффективности.

4.2. Методический подход к эколого-экономической оценке

Переход к циркулярной экономике означает изменение базовых принципов и стратегий деятельности, реализуемых на предприятиях различных отраслей с учетом специфики производства²¹. Это обуславливает методические особенности оценки эколого-экономической эффективности как предприятий «большой» энергетики, так и малой генерации, с учетом «циркулярных» критериев.

²¹ Справочная информация. Росприроднадзор. URL: <https://rpn.gov.ru/activity/regulation/help/>

Проведены аналитические исследования имеющихся определений эффективности реализации стратегий циркулярной экономики. В систематическом обзоре [62] были определены и выделены более 270 ведущих показателей эффективности, связанных с устойчивостью. Авторы исследований [63, 64] рассматривают бизнес-модели, которые позволяют извлечь выгоду из увеличения срока службы продуктов, и в перспективе сократить потребление материалов и энергии. Всесторонний обзор [65] охватывает исследования, рассматривающие аспекты нехватки ресурсов, образования отходов и экономических преимуществ, и рассматривает ландшафт циркулярной экономики в этих контекстах. В работе [66] рассмотрена бизнес-стратегия, направленная на расширение существующего цикла использования за счет добавления ценности или улучшения функций продукта по сравнению с предыдущими версиями. Авторы [67] рассматривают стратегию восстановления продукта. В работе [68] обсуждаются основные стратегии переработки материалов, поступающих из бывших в употреблении продуктов. Критический обзор [69] изучает противоречия в концептуализации экономики замкнутого цикла с акцентом на истории и вариантах сохранения стоимости ресурсов. Обобщение имеющихся подходов позволило авторам сформировать соответствующие показатели и адаптировать их для энергетики, учитывая технико-экономические особенности отрасли [70, 71] (табл. 5). В результате основными составляющими эколого-экономической оценки при реализации стратегий циркулярной экономики в энергетике должны являться:

- ресурсная эффективность;
- энергоэффективность;
- ущерб окружающей среде;

– объем образования твердых отходов;

– водопотребление.

Показатель безопасности отходов учитывается при оценке ущерба окружающей среде. Перечисленные характеристики предлагается объединить в две основные группы: 1) характеристики природоёмкости производства энергии; 2) характеристики экологичности производства энергии.

Основные составляющие экономической оценки:

– текущие затраты;

– капитальные затраты;

– плата за негативное воздействие на окружающую среду;

– прибыль.

Состав затрат будет различным в зависимости от конкретного проекта. Для определения составляющих

эколого-экономического эффекта целесообразно учитывать аспекты, значимые при оценке эффективности природоохранных мероприятий в энергетике: изменение технико-экономических показателей производства энергии; получение дополнительной товарной продукции; снижение ущерба от загрязнения²² [72], а также результаты анализа, проведенного авторами, представленные в табл. 5.

В табл. 6 показаны возможные показатели для оценки эколого-экономической эффективности инвестиционных проектов в энергетике с учетом принципов циркулярной экономики. Сравнение

²² Временные методические указания по расчету экономической эффективности мероприятий по защите воздушного бассейна от вредных выбросов с дымовыми газами от тепловых электростанций и котельных. М., 1982. 77 с.

Таблица 5. Показатели эффективности, учитывающие принципы циркулярной экономики, для энергетических объектов

Table 5. Performance indicators that capture the principles of circular economy for energy facilities

Стратегия	Критериальный показатель	Экологическая оценка	Экономическая оценка
<p>1. Переход к циркулярным бизнес-моделям Переосмысление способа предоставления или ценности энергетических услуг, без радикальных технологических изменений, путем организации замкнутых энергетических циклов, с высокой долей возобновляемых энергетических ресурсов; включения в единую технологическую систему региональной тепло-, электроэнергетики и коммунального хозяйства (водоснабжение, канализация, управление отходами); управления спросом</p>	<p>– доля возобновляемых ресурсов; – общие материальные затраты</p>	<p>– ресурсная эффективность; – ущерб окружающей среде</p>	<p>– текущие затраты; – прибыль предприятия</p>

Продолжение табл. 5
Continuation of table 5

Стратегия	Критериальный показатель	Экологическая оценка	Экономическая оценка
<p>2. Сокращение, компенсация и предупреждение негативных воздействий на уровне сырья Оптимальный выбор топлива для производства энергии, с учетом возможности использования вторичных энергетических ресурсов, в том числе минимально пригодных</p>	<ul style="list-style-type: none"> – доля возобновляемых ресурсов; – общие материальные затраты 	ресурсная эффективность	текущие затраты
<p>3. Сокращение, компенсация и предупреждение негативных воздействий на уровне производства энергии Повышение потенциала организации замкнутых циклов и эффективности процессов при производстве энергии за счет меньшего потребления природных ресурсов или энергии, надлежащей обработки выбросов и отходов, переработки и повторного использования отходов и лома на месте (предпотребительская или внутренняя переработка и повторное использование), восстановление энергии и полезных веществ из отходов</p>	<ul style="list-style-type: none"> – стоимость производства энергии; – стоимость распределения энергии; – общие материальные затраты 	<ul style="list-style-type: none"> – ресурсная эффективность; – ущерб окружающей среде 	<ul style="list-style-type: none"> – текущие затраты; – плата за негативное воздействие на окружающую среду

Продолжение табл. 5
Continuation of table 5

Стратегия	Критериальный показатель	Экологическая оценка	Экономическая оценка
<p>4. Сокращение, компенсация и предупреждение негативных воздействий на уровне потребления энергии Повышение потенциала циркулярности и эффективности использования энергии путем рационализации энергопотребления (за счет технологий обработки данных, цифровизации производства и распределения энергии, управления спросом)</p>	стоимость обучения потребителей	энергоэффективность	– капитальные затраты; – текущие затраты; – затраты потребителей*
<p>5. Модернизация технологической базы Расширение существующего цикла использования энергетических установок за счет улучшения их технологических параметров или функций</p>	себестоимость единицы энергетической или тепловой мощности	– ресурсная эффективность; – ущерб окружающей среде	– капитальные затраты; – текущие затраты
<p>6. Ремонт и сервисная поддержка эксплуатации оборудования Продление существующего цикла использования энергетических установок путем противодействия износу и замены неисправных деталей и узлов оборудования для поддержания функциональности</p>	удельное энергопотребление в отдельных технологических операциях	энергоэффективность	– текущие затраты; – прибыль

Продолжение табл. 5
Continuation of table 5

Стратегия	Критериальный показатель	Экологическая оценка	Экономическая оценка
<p>7. Переработка отходов в полезную продукцию Продление срока службы полезных материалов путем обработки отходов энергетического производства с целью получения материала такого качества, которое позволяет его использовать в промышленных процессах</p>	<ul style="list-style-type: none"> – получение опасных отходов; – доля повторно используемых не-энергетических компонентов отходов, передаваемых в качестве вторичного сырья для получения полезной продукции другим предприятиям (например, передача золошлаковых отходов для использования в строительстве); – доля остаточных отходов, которые не могут быть использованы, в т. ч. размещаемые на территории предприятия, вывозимые на полигоны, утилизируемые; – стоимость переработки; – транспортные расходы до места утилизации или размещения; – удельное потребление воды 	<ul style="list-style-type: none"> – ресурсная эффективность; – ущерб окружающей среде; – безопасность отходов; – объем образования твердых отходов (отходоёмкость производства); – водопотребление (водоёмкость производства) 	<ul style="list-style-type: none"> – текущие затраты; – плата за негативное воздействие на окружающую среду

Окончание табл. 5

End of table 5

Стратегия	Критериальный показатель	Экологическая оценка	Экономическая оценка
8. Переработка отходов для выработки энергии или получения полезных веществ Получение энергии или удобрений путем компостирования органических отходов или их переработки (сжигание горючих отходов, пиролиз, анаэробное сбраживание)	доля повторно-го использования компонентов отходов на предприятии: энергетическое использование (сжигание биогаза); неэнергетическое использование (удобрения)	– ресурсная эффективность; – энергоэффективность; – ущерб окружающей среде	– текущие затраты; – капитальные затраты; – плата за негативное воздействие на окружающую среду; – прибыль

Примечание: *В четвертой стратегии циркулярной экономики, приведенной в таблице (сокращение потребления и предупреждение негативных воздействий на уровне потребления энергии) затраты потребителей не учитываются при оценке эффективности деятельности предприятия-поставщика энергии.

альтернативных проектов должно проводиться в расчете на равный годовой объем производства энергии.

В сопоставлении альтернативных проектов при прочих равных условиях предпочтение должно отдаваться проектам, стратегия которых обеспечит более высокую ресурс-, энергоэффективность и экологичность, а соответственно, и большее соответствие принципам циркулярной экономики.

Любые проекты, предусматривающие качественные и количественные структурные сдвиги в региональном энергоснабжении, требуют интегрированного подхода к оценке с учетом всех значимых как экологических, так и экономических факторов, что позволит учитывать всю совокупность затрат и выгод при принятии управленческих решений. Для этого должна быть предусмотрена процедура объединения экономического и экологического результатов, а также экономических затрат

и экологических последствий (экстерналий) производства энергии.

Кроме того, эффект от реализации инвестиционных проектов реформирования и модернизации объектов региональной энергетики должен учитывать как положительные результаты, так и отрицательные последствия. В условиях перехода к циркулярной экономике, как показано выше, высока значимость учета ресурсной эффективности производства энергии и отходоёмкости производства.

Необходимо отметить, что при учете фактора времени для экономической и экологической составляющих следует применять дифференцированные коэффициенты дисконтирования (r_{en} , и r_{el} , соответственно, причем $r_{el} \ll r_{en}$), это позволит повысить значимость экологического фактора при расчете интегральной эколого-экономической эффективности.

Таким образом, базовыми принципами оценки инвестиционных проектов

Таблица 6. Матрица показателей эколого-экономической оценки альтернативных инвестиционных проектов в энергетике

Table 6. Matrix of indicators of ecological and economic assessment of alternative investment projects in the energy sector

№	Показатель	Альтернативные проекты			
		1	2	...	N
1	<i>Производительность труда:</i> – удельная численность работников, чел./МВт; – фонд заработной платы, руб./МВт				
2	<i>Эффективность производства:</i> – чистая товарная продукция, руб./МВт; – чистая прибыль, руб./МВт; – номенклатура продукции; – рентабельность производства, руб./руб.; – чистый дисконтированный доход, руб.				
3	<i>Эффективность работы основных фондов</i> затраты на амортизацию, руб.				
4	<i>Эффективность использования материальных ресурсов:</i> – материальные затраты, руб./МВт; – потребление первичных ресурсов, т (м ³); – потребление вторичных ресурсов, т (м ³)				
5	<i>Ущерб от загрязнения:</i> – ущерб от выбросов в атмосферный воздух, в т. ч.: • загрязняющих токсичных веществ, руб./МВт; • парниковых газов, руб./МВт; – ущерб от сброса загрязняющих веществ в водные объекты, руб./МВт; – ущерб от образования и накопления отходов, в т. ч. за счет изменения: • объемов образования отходов, руб./МВт; • объемов складирования отходов, руб./МВт; • объемов использования отходов для получения полезной продукции, руб./МВт; • объемов реализации отходов на сторону, руб./МВт				
6	<i>Экологические платежи:</i> – плата за выбросы в атмосферу, руб./МВт; – плата за сбросы в водные объекты, руб./МВт; – плата за размещение отходов, руб./МВт				

в энергетике при переходе к циркулярной экономике являются:

1. Учет соответствия стратегии проекта принципам циркулярной экономики.

2. Интегральный учет положительных результатов и отрицательных

последствий реализации инвестиционных проектов.

3. Паритетный учет экономической и экологической составляющих выгод и затрат, позволяющий перевести экологическую составляющую в экономическую категорию.

4. Дифференцированный подход к учету фактора времени для экономической и экологической составляющих выгод и затрат.

На рис. 7 представлена схема эколого-экономической оценки инвестиционного проекта модернизации объекта региональной энергетики в условиях перехода к циркулярной экономике.

Проекты внедрения биогазовых технологий на предприятиях, располагающих собственными органическими отходами, являются примером реализации 8 стратегии циркулярной экономики, приведенной в табл. 5 (переработка отходов для выработки энергии или получения полезных веществ). С учетом соответствия принципам циркулярной экономики, показанного в п. 4.1, при их эколого-экономической оценке должны учитываться факторы, представленные на рис. 8.

Следует отметить, что экономическая составляющая эффективности внедрения биогазовых установок будет выше при использовании отходов собственного производства, а также при оказании поддержки со стороны

государства. В качестве основы оценки может быть принята методология, предложенная в [73].

Экономическую составляющую эффективности проекта внедрения биогазовых технологий можно оценивать также по совокупности текущих производственных затрат с учетом затрат на централизованное энергоснабжение (при его установленной доле), или (в идеальном варианте) без этой составляющей. Эти показатели нужно рассчитывать на единицу номинальной производительности технологической установки и сопоставлять с «нулевым» вариантом внешнего энергоснабжения.

Для эколого-экономической оценки могут быть использованы различные методические подходы или их комбинация, при этом в ряде случаев для оперативного принятия управленческого решения детализированный учет всех показателей может быть заменен приближенными оценками.

Рассмотрим возможные подходы, которые могут быть использованы при эколого-экономической оценке проектов внедрения биогазовых технологий.

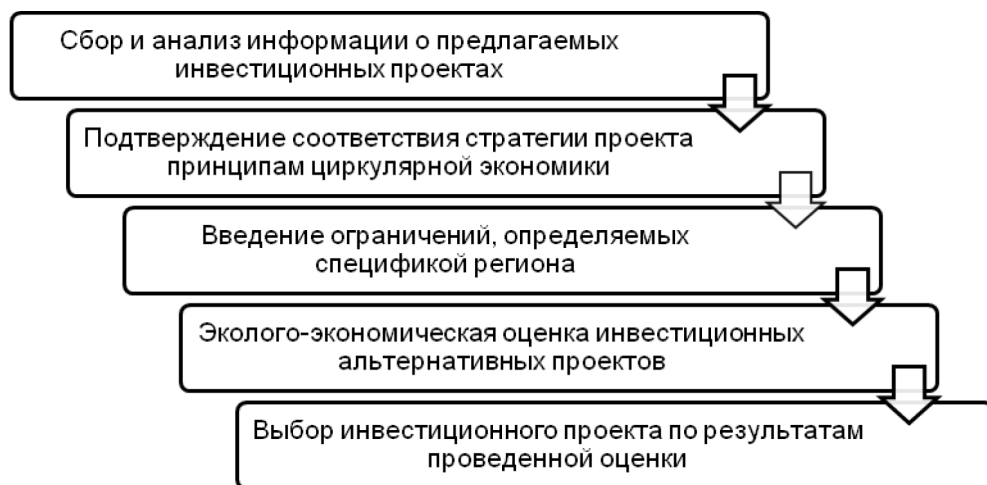


Рис. 7. Этапы эколого-экономической оценки реализации инвестиционного проекта модернизации объекта региональной энергетики

Fig. 7. Stages of environmental and economic assessment of the modernization investment project implementation on the regional energy facility



Рис. 8. Схема формирования эколого-экономического эффекта внедрения биогазовых технологий в энергетике

Fig. 8. The scheme of formation of the ecological and economic effect of the introduction of biogas technologies in the energy sector

Интегральная эколого-экономическая эффективность реализации инвестиционного проекта реформирования или модернизации объекта региональной энергетики при использовании дифференцированных ставок дисконтирования может быть рассчитана по уравнению (1):

$$\begin{aligned}
 \text{ЭЭЭ} = & \frac{\sum_{t_1}^{t_k} \frac{1}{(1+r_{\text{ЭН}})^t} \sum_{i=1}^n (B_i^{\text{ЭН}} - I_i^{\text{ЭН}}) +}{\sum_{t_1}^{t_k} \frac{1}{(1+r_{\text{ЭН}})^t} \sum_{i=1}^n I_i^{\text{ЭН}} +} \\
 & + \frac{\sum_{t_1}^{t_k} \frac{1}{(1+r_{\text{ЭЛ}})^t} \sum_{i=1}^n (B_i^{\text{ЭЛ}} - I_i^{\text{ЭЛ}})}{\sum_{t_1}^{t_k} \frac{1}{(1+r_{\text{ЭЛ}})^t} \sum_{i=1}^n I_i^{\text{ЭЛ}}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

где $B_i^{\text{ЭН}}$ – положительные результаты экономического характера, денежные единицы; $B_i^{\text{ЭЛ}}$ – положительные

результаты экологического характера, денежные единицы; $I_i^{\text{ЭН}}$ – дополнительные затраты, которые представляют собой совокупность расхода материально-финансовых ресурсов (экономических издержек), денежные единицы; $I_i^{\text{ЭЛ}}$ – стоимостная оценка всего комплекса наступающих в случае реализации проекта негативных последствий экологического характера, денежные единицы; n – общее число последствий; t – порядковый номер года, затраты и результаты которого приводятся к начальному году реализации проекта ($1 \leq t \leq k$).

При оценке негативных последствий экологического характера отдельного объекта обычно учитывается ущерб, наносимый атмосферному воздуху, водным ресурсам, земельным ресурсам и недрам.

Ввиду сложности задачи полного учета экстерналий, для оценки альтернативных инвестиционных проектов

необходимо разрабатывать и применять соответствующие упрощенные подходы к оценке эффективности их реализации. Возможным вариантом является учет только наиболее значимых для рассматриваемого региона положительных результатов и отрицательных последствий в составе уравнения 1, определяемых экспертно.

Одним из подходов к эколого-экономической оценке целесообразности проекта может быть *использование частных показателей* и принятие решения на основе анализа совокупности таких показателей. Значимые показатели обосновываются относительно факторов, формирующих эколого-экономический эффект, с учетом принципов циркулярной экономики.

В качестве частных показателей при эколого-экономической оценке могут использоваться ранее предложенные показатели изменения отходоёмкости, землеёмкости, ресурсоёмкости производства энергии [74]. Целесообразно также использовать частные показатели экологической эффективности производства энергии. После формирования набора частных показателей они могут быть агрегированы в интегральный показатель, позволяющий проводить эколого-экономическую оценку проекта.

При проведении *комплексной эколого-экономической балльной оценки* определяется набор оценочных показателей, которые могут быть как прямыми, так и косвенными (табл. 6). При сравнении альтернативных проектов целесообразно выбрать эталон, относительно которого проводят анализ эффективности. В качестве эталонных показателей могут быть приняты нормативы, показатели, задаваемые наилучшими доступными технологиями, теоретические пределы. В случае реформирования или модернизации действующего объекта энергетики эталоном может быть «нулевой»

вариант (отказ от реализации проекта). Далее фактические (прогнозные) показатели сравниваются с эталонными и определяется степень их отклонения. Для отклонений разной величины, с учетом знака влияния на показатель (положительное или отрицательное отклонение) присваиваются балльные оценки (по 5-, 10-балльной или иной шкале). Для выбора базы сравнения и проведения балльной оценки может быть использован экспертный подход.

После получения баллов по всем показателям выводятся оценки по каждому из предлагаемых проектов и даются рекомендации по выбору оптимального из предлагаемых альтернативных вариантов на уровне управления, от которого зависит принятие решения.

5. Обсуждение

Предложенные авторами принципы и подход к эколого-экономической оценке инвестиционных проектов в энергетике, в частности биогазовых установок, в значительной степени дополняют существующие рекомендации. Например, ранее авторы работ [26, 47, 50] отмечали необходимость включения оценки соответствия проектов принципам циркулярной экономики и устойчивого развития в систему эколого-экономической оценки эффективности проектов биоэнергетики, однако сами подходы не были проработаны. Процедура эколого-экономической оценки, разработанная авторами (рис. 7), впервые включает этап анализа соответствия стратегии проекта принципам циркулярной экономики.

Авторы представленной статьи также отмечают необходимость применения комплексного подхода к оценке эколого-экономической эффективности. В работах [29, 46] рассматривается возможность разработки интегральных показателей, но предлагаемые авторами

подходы либо не адаптивны под специфику различных объектов энергетики, либо в значительной степени усложняют процедуру оценки.

Использование различных частных показателей для оценки эффективности использования земельных ресурсов и объема образования отходов производства рассматривается в работах Reinhard Madlener et al. [25, 40], А. Maxim [61] и других.

Многие авторы отмечают использование частных показателей в качестве дополнительного инструмента эколого-экономической оценки. Как показывает наше исследование, адаптированная система частных показателей природоёмкости и экологичности может стать методической основой процедуры эколого-экономической оценки проектов.

6. Выводы

Выстраивать стратегию развития малой энергетики на основе возобновляемых источников энергии в России необходимо с учетом специфических национальных приоритетов, определяемых характеристиками климатических особенностей, территориальной протяженности, индустриальной архитектуры. В каждом регионе России существует свой оптимум доли возобновляемых источников определенных типов. В то же время в крупных городах, особенно с амбициями внедрения умных технологий, использование возобновляемых источников энергии как элемента зеленой экономики и среды обитания чрезвычайно актуально.

Перспективным направлением развития региональной энергетики является внедрение биогазовых технологий, соответствующих глобальному энергопереходу и принципам циркулярной экономики. Эти технологии позволяют предприятиям, располагающим собственными органическими отходами,

использовать их в качестве ценного энергетического сырья, одновременно предотвращая негативные экологические последствия накопления отходов. Также возможен вариант создания региональных (муниципальных) операторов по приему органических отходов с целью анаэробного сбраживания для последующей выработки электрической и тепловой энергии с производством нового товарного продукта (например, удобрений или промышленного CO₂).

В исследовании подтверждена гипотеза о необходимости учета стратегий и принципов циркулярной экономики при эколого-экономической оценке биогазовых энерготехнологий.

Сформированы базовые принципы и этапы эколого-экономической оценки инвестиционных проектов в энергетике в условиях перехода к циркулярной экономике. При этом показано, что в процедуре оценки, ввиду потенциальной сложности выявления всех возникающих экстерналий целесообразно использовать упрощенный подход, при котором в составе положительных и отрицательных результатов учитываются только наиболее значимые для конкретного региона, в котором реализуется проект.

Решена актуальная задача формирования методического аппарата эколого-экономической оценки эффективности внедрения биогазовых технологий в условиях перехода к циркулярной экономике. В частности, сформирован перечень соответствующих показателей эффективности инвестиционных проектов, предложен матричный инструмент их сопоставления для выбора наилучших проектных альтернатив, выделены факторы, формирующие эколого-экономический эффект внедрения биогазовых технологий.

Предложено проводить эколого-экономическую оценку инвестиционных проектов в энергетике на основе

расчета интегрального показателя эколого-экономической эффективности, частных показателей природоёмкости и экологичности проекта, а также проведения комплексной балльной эколого-экономической оценки.

Сформированный методический подход может быть использован при

эколого-экономической оценке внедрения биогазовых энерготехнологий, а также при сравнении альтернативных вариантов проектов модернизации в энергетике, повышает объективность и рационализирует процедуру принятия управленческих решений в условиях перехода к циркулярной экономике.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Benton D., Hazel J.* The Circular Economy in Japan. March 2015. The Institution of environment sciences, 2015. URL: <https://www.the-ies.org/analysis/circular-economy-japan>.
2. *Pomponi F., Moncaster A.* A Theoretical Framework for Circular Economy Research in the Built Environment // In: Building Information Modelling, Building Performance, Design and Smart Construction. Edited by M. Dastbaz, C. Gorse, A. Moncaster. Springer, 2017. Pp. 31–44. DOI: 10.1007/978-3-319-50346-2_3.
3. *Герасименко Д., Николаева И.* Циркулярная экономика в России в контексте Целей устойчивого развития ООН и Года экологии // Мосты. 2017. Т. 10, № 3.
4. *Fagarassy C.* The Theoretical Background of Circular Economy and the Importance of its Application at Renewable Energy Systems. 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/319403544>.
5. *Lahti T., Wincent J., Parida V.* A Definition and Theoretical Review of the Circular Economy, Value Creation, and Sustainable Business Models: Where Are We Now and Where Should Research Move in the Future? // Sustainability. 2018. Vol. 10, Issue 8. P. 2799. DOI: 10.3390/su10082799.
6. *Lacy P., Rutqvist J.* Waste to Wealth. The Circular Economy Advantage. UK: Palgrave Macmillan, 2015. 264 p. DOI: 10.1057/9781137530707.
7. *Gabriel C. A., Kirkwood J.* Business models for model businesses: Lessons from renewable energy entrepreneurs in developing countries // Energy Policy. 2016. Vol. 95, Issue C. Pp. 336–349. DOI: 10.1016/j.enpol.2016.05.006.
8. *Albores P., Petridis K., Dey P. K.* Analysing efficiency of Waste to Energy Systems: Using Data Envelopment Analysis in Municipal Solid Waste Management // Procedia Environmental Sciences. 2016. Vol. 35. Pp. 265–278. DOI: 10.1016/j.proenv.2016.07.007.
9. *Cioca L. I., Ferronato N., Viotti P., Magaril E., Ragazzi M., Torretta V., Rada E. C.* Risk Assessment in a Materials Recycling Facility: Perspectives for Reducing Operational Issues // Resources. 2018. Vol. 7, Issue 4. P. 85. DOI: 10.3390/resources7040085.
10. *Iveroth S. P., Vernay A., Mulder K., Brandt N.* Implications of systems integration at the urban level: the case of Hammarby Sjöstad, Stockholm // Journal of Cleaner Production. 2013. Vol. 48. Pp. 220–231. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.09.012.
11. *Iveroth S. P.* The Potential of the Infrastructural System of Hammarby Sjöstad in Stockholm, Sweden // Energy Policy. 2013. Vol. 59. Pp. 716–726. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.04.027.
12. *Батова Н., Сачек П., Тоцицкая И.* Циркулярная экономика в действии: формы организации и лучшие практики // BEROC Green Economy Policy Paper Series. 2018. No. 5. URL: <https://beroc.org/upload/medialibrary/321/32121ce6e23d0900df821bdcb5923fdc.pdf>.
13. *Марченко О. В., Соломин С. В.* Комплексное использование возобновляемых источников энергии разных типов для совместного производства электричества и тепла // Промышленная Энергетика. 2018. № 5. С. 52–57.
14. *Panepinto D., Zanetti M. C., Gitelman L., Kozhevnikov M., Magaril E., Magaril R.* Energy from Biomass for Sustainable Cities // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 72, Issue 1. P. 012021. DOI: 10.1088/1755-1315/72/1/012021.

15. Rada E. C., Costa L., Pradella C., Adami L., Schiavon M., Magaril E., Torretta V. Unconventional small-scale biogas production with reduced local impact // *International Journal of Energy Production and Management*. 2019. Vol. 4, Issue 3. Pp. 198–208. DOI: 10.2495/EQ-V4-N3-198-208.
16. Аргунова М. В. Модель «Умного» города как проявление нового технологического уклада // *Наука и школа*. 2016. № 3. С. 14–23.
17. Karaeva A., Magaril E., Al-Kayiem H., Torretta V., Rada E. C. Approaches to the assessment of ecological and economic efficiency of investment projects: Brief review and recommendations for improvements // *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2021. Vol. 253. Pp. 515–525. DOI: 10.2495/SC210421.
18. Lijó L., Lorenzo-Toja Y., González-García S., Bacenetti J., Negri M., Moreira M. T. Eco-efficiency assessment of farm-scaled biogas plants // *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 237. Pp. 146–155. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.01.055.
19. Lansche J., Muller J. Life cycle assessment of energy generation of biogas fed combined heat and power plants: Environmental impact of different agricultural substrates // *Engineering in Life Sciences*. 2012. Vol. 12, Issue 3. Pp. 313–320 DOI: 10.1002/elsc.201100061.
20. Sun C., Fu Q., Liao Q., Xia A., Huang Y., Zhu X., Reungsang A., Chang H.-X. Life-cycle assessment of biofuel production from microalgae via various bioenergy conversion systems // *Energy*. 2019. Vol. 171. Pp. 1033–1045. DOI: 10.1016/j.energy.2019.01.074.
21. Morosuk T., Tsatsaronis G., Koroneos C. Environmental impact reduction using exergy-based methods // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 118. Pp. 118–123. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.01.064.
22. Joshi S. Product environmental life cycle assessment using input output techniques // *Journal of Industrial Ecology*. 1999. Vol. 3, Issue 2–3. Pp. 95–120. DOI: 10.1162/108819899569449.
23. Martín-Gamboa M., Iribarren D., García-Gusano D., Dufour J. A review of life-cycle approaches coupled with data envelopment analysis within multi-criteria decision analysis for sustainability assessment of energy systems // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 150. Pp. 164–174. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.017.
24. Iribarren D., Vázquez-Rowe I., Moreira M. T., Feijoo G. Further potentials in the joint implementation of life cycle assessment and data envelopment analysis // *Science of The Total Environment*. 2010. Vol. 408. Pp. 5265–5272. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.07.078.
25. Madlener R., Antunes C. H., Dias L. C. Assessing the performance of biogas plants with multi-criteria and data envelopment analysis // *European Journal of Operational Research*. 2009. Vol. 197, Issue 3. Pp. 1084–1094. DOI: 10.1016/j.ejor.2007.12.051.
26. Roos A., Ahlgren S. Consequential life cycle assessment of bioenergy systems – A literature review // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 189. Pp. 358–373. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.233.
27. Escobar N., Ribal J., Clemente G., Sanjuán N. Consequential LCA of two alternative systems for biodiesel consumption in Spain, considering uncertainty // *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 79. Pp. 61–73. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.05.065.
28. Pehme S., Veromann E. Environmental consequences of anaerobic digestion of manure with different co-substrates to produce bioenergy: A review of life cycle assessments // *Agronomy Research*. 2015. Vol. 13, Issue 2. Pp. 372–381.
29. Cherubini F., Strømman A. H. Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges // *Bioresource Technology*. 2011. Vol. 102. Pp. 437–451. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.08.010.
30. Kurka T. Application of the analytic hierarchy process to evaluate the regional sustainability of bioenergy developments // *Energy*. 2013. Vol. 62. Pp. 393–402. DOI: 10.1016/j.energy.2013.09.053.
31. Aghbashlo M., Khounani Z., Hosseinzadeh-Bandbafha H., Gupta V. K., Amiri H., Lam S. S., Morosuk T., Tabatabaei M. Exergoenvironmental analysis of bioenergy systems: A comprehensive

review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 149. P. 111399. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111399.

32. *Maes D., Passel S.* Advantages and limitations of exergy indicators to assess sustainability of bioenergy and biobased materials // *Environmental Impact Assessment Review*. 2014. Vol. 45. Pp. 19–29. DOI: 10.1016/j.eiar.2013.11.002.

33. *Soltanian S., Aghbashlo M., Almasi F., Hosseinzadeh-Bandbafha H., Nizami A.-Z., Ok Y. S., Lam S. S., Tabatabaei M.* A critical review of the effects of pretreatment methods on the exergetic aspects of lignocellulosic biofuels // *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 212. P. 112792. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112792.

34. *Muench S., Guenther E.* A systematic review of bioenergy life cycle assessments // *Applied Energy*. 2013. Vol. 112. Pp. 257–273. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.06.001

35. *Hennig C., Gawor M.* Bioenergy production and use: comparative analysis of the economic and environmental effects // *Energy Conversion and Management*. 2012. Vol. 63. Pp. 130–137. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.03.031.

36. *Whiting A., Azapagic A.* Life cycle environmental impacts of generating electricity and heat from biogas produced by anaerobic digestion // *Energy*. 2014. Vol. 70. Pp. 181–193. DOI: 10.1016/j.energy.2014.03.103.

37. *Padilla-Rivera A., Paredes G. M., Güereca L. P.* A systematic review of the sustainability assessment of bioenergy: The case of gaseous biofuels // *Biomass and Bioenergy*. 2019. Vol. 125. Pp. 79–94. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.03.014.

38. *Лобовиков А. О., Аббазова Ж. Т., Соловьева Е. В.* Эколого-экономическая оценка эффективности проекта применения биогазовых установок // *Актуальные проблемы экономики и управления на предприятиях машиностроения, нефтяной и газовой промышленности в условиях инновационно-ориентированной экономики*. 2015. Т. 1. С. 404–411.

39. *Fthenakis V., Kim H. C.* Land use and electricity generation: A life-cycle analysis // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. Vol. 13. Pp. 1465–1474. DOI: 10.1016/j.rser.2008.09.017.

40. *Maxim A.* Sustainability assessment of electricity generation technologies using weighted multi-criteria decision analysis // *Energy Policy*. 2013. Vol. 65. Pp. 284–297. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.09.059.

41. *Mekonnen M. M., Hoekstra A. Y.* The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2011. Vol. 15, Issue 5. Pp. 1577–1600. DOI: 10.5194/hess-15-1577-2011.

42. *Родькин О. И.* Экологическая оценка и потенциал использования соломы зерновых культур в качестве биотоплива // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент*. 2013. № 3. С. 15.

43. *Hijazi O., Munro S., Zerhusen B., Effenberger M.* Review of life cycle assessment for biogas production in Europe // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 54. Pp. 1291–1300. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.013.

44. *Buchholz T., Luzadis V. A., Volk T. A.* Sustainability criteria for bioenergy systems: results from an expert survey // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 17. Pp. S86–S98. DOI: 10.1016/j.jclepro.2009.04.015.

45. *Wu X., Wu F., Tong X., Wu J., Sun L., Peng X.* Exergy and greenhouse gas assessment of a sustainable, integrated agricultural model (SIAM) for plant, animal and biogas production: Analysis of the ecological recycle of wastes, Resources // *Conservation and Recycling*. 2015. Vol. 96. Pp. 40–50. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.01.010.

46. *Khishtandar S., Zandieh M., Dorri B.* A multi criteria decision making framework for sustainability assessment of bioenergy production technologies with hesitant fuzzy linguistic term sets: The case of Iran // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 77. Pp. 1130–1145. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.212.

47. Afgan N. H., Carvalho M. G., Hovanov N. V. Energy system assessment with sustainability indicators // *Energy Policy*. 2000. Vol. 28. Pp. 603–612 DOI: 10.1016/S0301–4215 (00) 00045-8.
48. Chong Y. T., Teo K. M., Tang L. C. A lifecycle-based sustainability indicator framework for waste-to-energy systems and a proposed metric of sustainability // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 56. Pp. 797–809. DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.036.
49. Rovere E. L., Soares J. B., Oliveira L. B., Lauria T. Sustainable expansion of electricity sector: sustainability indicators as an instrument to support decision making // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14, Issue 1. Pp. 422–429. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.033.
50. Potting J., Hekkert M., Worrell E., Hanemaaijeret A. Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain. Netherlands Environmental Assessment Agency, 2017. 46 p.
51. Валько Д. В. Циркулярная экономика: понятийный аппарат и диффузия концепции в отечественных исследованиях // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Экономика и экологический менеджмент*. 2019. № 2. С. 42–49.
52. Гительман Л. Д., Ратников Б. Е., Семерилов А. С., Семерилов М. А. Региональная электроэнергетика. Противокризисная концепция. М.: Дело, 2006. 52 с.
53. Соломин В. А. Переход на возобновляемые источники энергии как политическая задача // *Независимая газета*. 01.10.2017. URL: http://www.ng.ru/ng_energiya/2017-01-10/11_6897_sources.html.
54. Huertas J. I., Giraldo N., Izquierdo S. Removal of H₂S and CO₂ from Biogas by Amine Absorption // In: *Mass Transfer in Chemical Engineering Processes*. Edited by J. Markoš. IntechOpen, 2011. Pp. 133–150. DOI: 10.5772/20039.
55. *Mass Transfer in Chemical Engineering Processes*. Edited by J. Markoš. IntechOpen, 2011. 320 p. DOI: 10.5772/659.
56. Chen X. Y., Vinh-Thang H., Ramirez A. A., Rodrigue D., Kaliaguine S. Membrane gas separation technologies for biogas upgrading // *RSC Advances*. 2015. Vol. 5. Pp. 24399–24448. DOI: 10.1039/C5RA00666J.
57. Комина Г. П., Сауц А. В. Получение и использование биогаза в решении задач энергосбережения и экологической безопасности. СПбГАСУ, 2017. 95 с.
58. Cuellar A. D., Webber M. E. Cow power: the energy and emissions benefits of converting manure to biogas // *Environmental Research Letters*. 2008. Vol. 3, Issue 3. P. 034002. DOI: 10.1088/1748–9326/3/3/034002.
59. Колганов Д. Является ли утилизация свалочного газа рентабельным проектом CO₂? // *Русдем-Энергоэффект*. 2007–2010. URL: <http://www.methanetomarkets.ru/goods/mater13/>.
60. Антушевич А. А., Минакова П. С., Зязя А. В., Поддубный А. М. Оценка энергетического потенциала полигона твердых коммунальных отходов // *Вопросы безопасности*. 2020. № 5. DOI: 10.25136/2409–7543.2020.5.34738.
61. 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. P. 91. DOI: 10.3390/resources8020091.
62. Kravchenko M., Pigosso D., McAloone T. Towards the ex-ante sustainability screening of circular economy initiatives in manufacturing companies: Consolidation of leading sustainability-related performance indicators // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 241. P. 118318. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118318.
63. Bakker C., den Hollander M., van Hinte E., Zijlstra Y. Products that Last: Product Design for Circular Business Models. TU Delft Library, 2014. 112 p.
64. Bocken N. M. P., de Pauw I., Bakker C., van der Grinten B. Product design and business model strategies for a circular economy // *Journal of Industrial and Production Engineering*. 2016. Vol. 33. Pp. 308–320. DOI: 10.1080/21681015.2016.1172124.
65. Lieder M., Rashid A. Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 115. Pp. 36–51. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.042.

66. *Parkinson H. J., Thompson G.* Analysis and taxonomy of remanufacturing industry practice // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2003. Vol. 217. Pp. 243–256. DOI: 10.1243/095440803322328890.

67. *Thierry M., Salomon M., Van Nunen J.* Strategic issues in product recovery management // California Management Review. 1995. Vol. 37. DOI: 10.1016/0024–6301 (95) 91628–8.

68. *Allwood J. M., Ashby M. F., Gutowski T. G., Worrell E.* Material efficiency: A white paper // Resources, Conservation and Recycling. 2011. Vol. 55. Pp. 362–381. DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.11.002.

69. *Reike D., Vermeulen W. J. V., Witjes S.* The circular economy: new or refurbished as CE3.0? – exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options // Resources, Conservation and Recycling. 2018. Vol. 135. Pp. 246–264. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.08.027.

70. *Гительман Л. Д., Ратников Б. Е.* Энергетический бизнес. 2-е изд., испр. М.: Дело, 2006. 600 с.

71. *Гительман Л. Д., Ратников Б. Е.* Экономика и бизнес в электроэнергетике. М.: Экономика, 2013. 432 с.

72. *Майсюк Е. П.* Принципы и методы оценки эффективности природоохранных мероприятий в энергетике // Энергетика и климат. 2017. № 4. С. 92–98.

73. *Чеботарева Г. С., Двинанинов А. А.* Экономическая альтернатива замены централизованного газоснабжения автономными биогазовыми установками в городах России // Journal of Applied Economic Research. 2021. Т. 20, № 3. С. 582–612. DOI: 10.15826/vestnik.2021.20.3.023.

74. *Караева А. П., Магарил Е. Р.* Показатели природоемкости производства энергии как инструмент оценки эффективности проектов в энергетике // Journal of Applied Economic Research. 2020. Т. 19, № 2. С. 166–179. DOI: 10.15826/vestnik.2020.19.2.009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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.

Гительман Леонид Давыдович

Доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой систем управления энергетикой и промышленными предприятиями Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19); ORCID 0000-0002-5943-7659; e-mail: ldgitelman@gmail.com.

Караева Анжелика Пирмамедовна

Аспирант кафедры экономики природопользования Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19); ORCID 0000-0003-3367-7678; e-mail: anzhelika.karaeva@gmail.com.

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.

Кожевников Михаил Викторович

Кандидат экономических наук, доцент кафедры систем управления энергетикой и промышленными предприятиями Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19); ORCID 0000-0003-4463-5625; e-mail: m. v.kozhevnikov@urfu.ru.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Магарил Е. Р., Гительман Л. Д., Караева А. П., Киселев А. В., Кожевников М. В. Методический подход к эколого-экономической оценке проектов биогазовой энергетики // *Journal of Applied Economic Research*. 2022. Т. 21, № 2. С. 217–256. DOI: 10.15826/vestnik.2022.21.2.009.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

Дата поступления 26 февраля 2022 г.; дата поступления после рецензирования 8 апреля 2022 г.; дата принятия к печати 5 мая 2022 г.

Methodological Approach to the Environmental and Economic Assessment of Biogas Energy Projects

E. R. Magaril , L. D. Gitelman , A. P. Karaeva ,
A. V. Kiselev , M. V. Kozhevnikov 

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

Abstract. Efficient energy supply of industrial enterprises, especially energy-intensive ones, together with a negative environmental impact decrease, is considered to be an important issue throughout the fourth energy transition and the implementation of circular economy principles that are aimed at resource optimization, energy saving, carbon-free technologies and zero waste production. In this context, quite a significant amount of accumulated and annually increasing organic waste could become a valuable resource for Russia. Thereby, biogas technologies development and implementation is one of the potential directions that determine the efficiency of its energy use. The purpose of the study is to develop a methodological approach for the environmental and economic assessment of biogas energy projects. The possibility of introducing biogas and other renewable energy installations into the Russian regional energy system is considered in this manuscript. The methodological features of the environmental and economic assessment of energy facilities are substantiated, taking into account the key performance indicators corresponding to the implementation of circular economy strategies. Alternative approaches to the environmental and economic assessment of investment projects are proposed using an integral indicator of environmental and economic efficiency, which is calculated both with: (a) positive and negative consequences of an environmental and economic entities that are significant for the region; (b) aggregated private indicators, which take into account the intensity of nature use and environmental friendliness of projects; (c) complex score. The proposed approach can be used for the environmental and economic assessment of the introduction of biogas technologies efficiency, as well as through the comparison of alternatives for modernization projects in the energy sector.

Key words: circular economy; energy transition; regional energy policies; biogas techniques; environmental and economic assessment; carbon-free energy; zero waste production.

JEL Q01, Q42, Q51

References

1. Benton, D., Hazel, J. (2015). *The Circular Economy in Japan. March 2015*. The Institution of environment sciences. Available at: <https://www.the-ies.org/analysis/circular-economy-japan>.
2. Pomponi, F., Moncaster, A. (2017). A Theoretical Framework for Circular Economy Research in the Built Environment. In: *Building Information Modelling, Building Performance, Design and Smart Construction*. Edited by M. Dastbaz, C. Gorse, A. Moncaster. Springer, 31–44. DOI: 10.1007/978-3-319-50346-2_3.
3. Gerasimenko, D., Nikolaeva, I. (2017). Tsirkuliarnaia ekonomika v Rossii v kontekste Tselei ustoichivogo razvitiia OON i Goda ekologii (Circular economy in the context of implementing the concept of sustainable development). *Mosty [Bridges]*, Vol. 10, No 3. (In Russ.).
4. Fagarassy, C. (2017). The Theoretical Background of Circular Economy and the Importance of it's Application at Renewable Energy Systems. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/319403544>.

5. Lahti, T., Wincent, J., Parida, V. (2018). A Definition and Theoretical Review of the Circular Economy, Value Creation, and Sustainable Business Models: Where Are We Now and Where Should Research Move in the Future? *Sustainability*, Vol. 10, Issue 8, 2799. DOI: 10.3390/su10082799.
6. Lacy, P. Rutqvist, J. (2015). *Waste to Wealth. The Circular Economy Advantage*. UK, Palgrave Macmillan, 264 p. DOI: 10.1057/9781137530707.
7. Gabriel, C. A., Kirkwood, J. (2016). Business models for model businesses: Lessons from renewable energy entrepreneurs in developing countries. *Energy Policy*, Vol. 95, Issue C, 336–349. DOI: 10.1016/j.enpol.2016.05.006.
8. Albores, P., Petridis, K., Dey, P.K. (2016). Analysing efficiency of Waste to Energy Systems: Using Data Envelopment Analysis in Municipal Solid Waste Management. *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 35, 265–278. DOI: 10.1016/j.proenv.2016.07.007.
9. Cioca, L. I., Ferronato, N., Viotti, P., Magaril, E., Ragazzi, M., Torretta, V., Rada, E. C. (2018). Risk Assessment in a Materials Recycling Facility: Perspectives for Reducing Operational Issues. *Resources*, Vol. 7, Issue 4, 85. DOI: 10.3390/resources7040085.
10. Iveroth, S. P., Vernay, A., Mulder, K., Brandt, N. (2013). Implications of systems integration at the urban level: the case of Hammarby Sjöstad, Stockholm. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 48, 220–231. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.09.012.
11. Iveroth, S.P. (2013). The Potential of the Infrastructural System of Hammarby Sjöstad in Stockholm, Sweden. *Energy Policy*, Vol. 59, 716–726. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.04.027.
12. Batova, N., Sachek, P., Tochitskaia, I. (2018). Tsirkuliarnaia ekonomika v deistvii: formy organizatsii i luchshie praktiki [Circular economy in action: organization forms and best practices]. *BEROC Green Economy Policy Paper Series*, No. 5. Available at: <https://beroc.org/upload/medialibrary/321/32121ce6e23d0900df821bdcb5923fdc.pdf>. (In Russ.).
13. Marchenko, O. V., Solomin, S. V. (2018). Kompleksnoe ispolzovanie vozobnovliaemykh istochnikov energii raznykh tipov dlia sovместnogo proizvodstva elektrichestva i tepla (Integrated use of renewable energy sources of different types for combined heat and electricity production). *Promyshlennaia Energetika (Industrial Power Engineering)*, No. 5, 52–57. (In Russ.).
14. Panepinto, D., Zanetti, M.C., Gitelman, L., Kozhevnikov, M., Magaril, E., Magaril, R. (2017). Energy from Biomass for Sustainable Cities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 72, Issue 1, 012021. DOI: 10.1088/1755–1315/72/1/012021.
15. Rada, E.C., Costa, L., Pradella, C., Adami, L., Schiavon, M., Magaril, E., Torretta, V. (2019). Unconventional small-scale biogas production with reduced local impact. *International Journal of Energy Production and Management*, Vol. 4, Issue 3, 198–208. DOI: 10.2495/EQ-V4-N3-198-208.
16. Argunova, M. V. (2016). Model «Umnogo» goroda kak proiavlenie novogo tekhnologicheskogo uklada (The «Smart City» model as a manifestation of the new technological mode). *Nauka i shkola (Science and School)*, No. 3, 14–23. (In Russ.).
17. Karaeva, A., Magaril, E., Al-Kayiem, H., Torretta, V., Rada, E.C. (2021). Approaches to the assessment of ecological and economic efficiency of investment projects: Brief review and recommendations for improvements. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Vol. 253, 515–525. DOI: 10.2495/SC210421.
18. Lijó, L., Lorenzo-Toja, Y., González-García, S., Bacenetti, J., Negri, M., Moreira, M. T. (2017). Eco-efficiency assessment of farm-scaled biogas plants. *Bioresource Technology*, Vol. 237, 146–155. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.01.055.
19. Lansche, J., Muller, J. (2012). Life cycle assessment of energy generation of biogas fed combined heat and power plants: Environmental impact of different agricultural substrates. *Engineering in Life Sciences*, Vol. 12, Issue 3, 313–320 DOI: 10.1002/elsc.201100061.
20. Sun, C., Fu, Q., Liao, Q., Xia, A., Huang, Y., Zhu, X., Reungsang, A., Chang, H.-X. (2019). Life-cycle assessment of biofuel production from microalgae via various bioenergy conversion systems. *Energy*, Vol. 171, 1033–1045. DOI: 10.1016/j.energy.2019.01.074.

21. Morosuk, T., Tsatsaronis, G., Koroneos, C. (2016). Environmental impact reduction using exergy-based methods. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 118, 118–123. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.01.064.
22. Joshi, S. (1999). Product environmental life cycle assessment using input output techniques. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 3, Issue 2–3, 95–120. DOI: 10.1162/108819899569449.
23. Martín-Gamboa, M., Iribarren, D., García-Gusano, D., Dufour, J. (2017). A review of life-cycle approaches coupled with data envelopment analysis within multi-criteria decision analysis for sustainability assessment of energy systems. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 150, 164–174. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.017.
24. Iribarren, D., Vázquez-Rowe, I., Moreira, M. T., Feijoo, G. (2010). Further potentials in the joint implementation of life cycle assessment and data envelopment analysis. *Science of The Total Environment*, Vol. 408, 5265–5272. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.07.078.
25. Madlener, R., Antunes, C.H., Dias, L.C. (2009). Assessing the performance of biogas plants with multi-criteria and data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, Vol. 197, Issue 3, 1084–1094. DOI: 10.1016/j.ejor.2007.12.051.
26. Roos, A., Ahlgren, S. (2018). Consequential life cycle assessment of bioenergy systems – A literature review. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 189, 358–373. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.233.
27. Escobar, N., Ribal, J., Clemente, G., Sanjuán, N. (2014). Consequential LCA of two alternative systems for biodiesel consumption in Spain, considering uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 79, 61–73. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.05.065.
28. Pehme, S., Veromann, E. (2015). Environmental consequences of anaerobic digestion of manure with different co-substrates to produce bioenergy: A review of life cycle assessments. *Agronomy Research*, Vol. 13, Issue 2, 372–381.
29. Cherubini, F., Strømman, A.H. (2011). Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. *Bioresource Technology*, Vol. 102, 437–451. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.08.010.
30. Kurka, T. (2013). Application of the analytic hierarchy process to evaluate the regional sustainability of bioenergy developments. *Energy*, Vol. 62, 393–402. DOI: 10.1016/j.energy.2013.09.053.
31. Aghbashlo, M., Khounani, Z., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Gupta, V.K., Amiri, H., Lam, S.S., Morosuk, T., Tabatabaei, M. (2021). Exergoenvironmental analysis of bioenergy systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 149, 111399. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111399.
32. Maes, D., Passel, S. (2014). Advantages and limitations of exergy indicators to assess sustainability of bioenergy and biobased materials. *Environmental Impact Assessment Review*, Vol. 45, 19–29. DOI: 10.1016/j.eiar.2013.11.002.
33. Soltanian, S., Aghbashlo, M., Almasi, F., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Nizami, A.-Z., Ok, Y.S., Lam, S.S., Tabatabaei, M. (2020). A critical review of the effects of pretreatment methods on the exergetic aspects of lignocellulosic biofuels. *Energy Conversion and Management*, Vol. 212, 112792. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112792.
34. Muench, S., Guenther, E. (2013). A systematic review of bioenergy life cycle assessments. *Applied Energy*, Vol. 112, 257–273. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.06.001
35. Hennig, C., Gawor, M. (2012). Bioenergy production and use: comparative analysis of the economic and environmental effects. *Energy Conversion and Management*, Vol. 63, 130–137. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.03.031.
36. Whiting, A., Azapagic, A. (2014). Life cycle environmental impacts of generating electricity and heat from biogas produced by anaerobic digestion. *Energy*, Vol. 70, 181–193. DOI: 10.1016/j.energy.2014.03.103.

37. Padilla-Rivera, A., Paredes, G. M., Güereca, L. P. (2019). A systematic review of the sustainability assessment of bioenergy: The case of gaseous biofuels. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 125, 79–94. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.03.014.
38. Lobovikov, A. O., Abbazova, Zh. T., Solovyeva, E. V. (2015). Ekologo-ekonomicheskaya otsenka effektivnosti proekta primeneniia biogazovykh ustanovok [Ecological and economic assessment of a biogas plant project]. *Aktualnye problemy ekonomiki i upravleniia na predpriiatiiakh mashinostroeniia, neftiano i gazovoi promyshlennosti v usloviakh innovatsionno-orientirovannoi ekonomiki* [Current issues of economics and management at machine building and oil and gas companies in an innovation-driven economy], Vol. 1, 404–411. (In Russ.).
39. Fthenakis, V., Kim, H. C. (2009). Land use and electricity generation: A life-cycle analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, 1465–1474. DOI: 10.1016/j.rser.2008.09.017.
40. Maxim, A. (2013). Sustainability assessment of electricity generation technologies using weighted multi-criteria decision analysis. *Energy Policy*, Vol. 65, 284–297. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.09.059.
41. Mekonnen, M. M., Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15, Issue 5, 1577–1600. DOI: 10.5194/hess-15-1577-2011.
42. Rodkin, O. I. (2013). Ekologicheskaya otsenka i potentsial ispolzovaniia solomy zernovykh kultur v kachestve biotopliva (Environmental and potential assessment of straw of cereal crops using as a biofuel). *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: Ekonomika i ekologicheskii menedzhment (Scientific journal NRU ITMO Series “Economics and Environmental Management)*, No. 3, 15. (In Russ.).
43. Hijazi, O., Munro, S., Zerhusen, B., Effenberger, M. (2016). Review of life cycle assessment for biogas production in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 54, 1291–1300. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.013.
44. Buchholz, T., Luzadis, V. A., Volk, T. A. (2019). Sustainability criteria for bioenergy systems: results from an expert survey. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 17, S86–S98. DOI: 10.1016/j.jclepro.2009.04.015.
45. Wu, X., Wu, F., Tong, X., Wu, J., Sun, L., Peng, X. (2015). Energy and greenhouse gas assessment of a sustainable, integrated agricultural model (SIAM) for plant, animal and biogas production: Analysis of the ecological recycle of wastes, Resources. *Conservation and Recycling*, Vol. 96, 40–50. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.01.010.
46. Khishtandar, S., Zandieh, M., Dorri, B. (2017). A multi criteria decision making framework for sustainability assessment of bioenergy production technologies with hesitant fuzzy linguistic term sets: The case of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 77, 1130–1145. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.212.
47. Afgan, N. H., Carvalho, M. G., Hovanov, N. V. (2000). Energy system assessment with sustainability indicators. *Energy Policy*, Vol. 28, 603–612 DOI: 10.1016/S0301–4215 (00) 00045-8.
48. Chong, Y. T., Teo, K. M., Tang, L. C. (2016). A lifecycle-based sustainability indicator framework for waste-to-energy systems and a proposed metric of sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 56, 797–809. DOI: 10.1016/j.rser.2015.11.036.
49. Rovere, E. L., Soares, J. B., Oliveira, L. B., Lauria, T. (2010). Sustainable expansion of electricity sector: sustainability indicators as an instrument to support decision making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, Issue 1, 422–429. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.033.
50. Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., Hanemaaijeret, A. (2017). *Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain*. Netherlands Environmental Assessment Agency, 46 p.
51. Valko, D. V. (2019). Tsirkuliarnaya ekonomika: poniatiinyi apparat i diffuziia kontseptsii v otechestvennykh issledovaniyakh (Circular economy: definitions and diffusion of the

concept in Russian research). *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya Ekonomika i ekologicheskii menedzhment (Scientific journal NRU ITMO Series "Economics and Environmental Management")*, No. 2, 42–49. (In Russ.).

52. Gitelman, L. D., Ratnikov, B. E., Semerikov, A. S., Semerikov, M. A. (2006). *Regionalnaia elektroenergetika. Protivokrizisnaia kontseptsiiia [Region power engineering. An anti-crisis concept]*. Moscow, Delo. (In Russ.).

53. Solomin, V. A. (2017). Perekhod na vozobnovliaemye istochniki energii kak politicheskaya zadacha [A transition to renewable energy sources as a political task]. *Nezavisimaya gazeta*. 01.10.2017. Available at: http://www.ng.ru/ng_energiya/2017-01-10/11_6897_sources.html. (In Russ.).

54. Huertas, J. I., Giraldo, N., Izquierdo, S. (2011). Removal of H₂S and CO₂ from Biogas by Amine Absorption. In: *Mass Transfer in Chemical Engineering Processes*. Edited by J. Markoš. IntechOpen, 133–150. DOI: 10.5772/20039.

55. J. Markoš (eds) (2011). *Mass Transfer in Chemical Engineering Processes*. IntechOpen, 320 p. DOI: 10.5772/659.

56. Chen, X. Y., Vinh-Thang, H., Ramirez, A. A., Rodrigue, D., Kaliaguine, S. (2015). Membrane gas separation technologies for biogas upgrading. *RSC Advances*, Vol. 5, 24399–24448. DOI: 10.1039/C5RA00666J.

57. Komina, G. P., Sauts, A. V. (2017). Poluchenie i ispolzovanie biogaza v reshenii zadach energosberezheniia i ekologicheskoi bezopasnosti [Production and use of biogas for energy conservation and environmental safety]. *St Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering*. (In Russ.).

58. Cuellar, A. D., Webber, M. E. (2008). Cow power: the energy and emissions benefits of converting manure to biogas. *Environmental Research Letters*, Vol. 3, Issue 3, 034002. DOI: 10.1088/1748-9326/3/3/034002.

59. Kolganov, D. Iavliaetsia li utilizatsiia svalochnogo gaza rentabelnym proektom SO? [Is landfill gas utilization a profitable CO project?]. *Rusdem-Energoeffekt. 2007–2010*. Available at: <http://www.methanetomarkets.ru/goods/mater13>. (In Russ.).

60. Antushevich, A. A., Minakova, P. S., Ziazia, A. V., Poddubnyi, A. M. (2020). Otsenka energeticheskogo potentsiala poligona tverdykh kommunalnykh otkhodov (The assessment of energy capacity of the municipal solid waste landfill). *Voprosy bezopasnosti (Security Issues)*, No. 5. DOI: 10.25136/2409-7543.2020.5.34738. (In Russ.).

61. 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.

62. Kravchenko, M., Pigosso, D., McAloone, T. (2019). Towards the ex-ante sustainability screening of circular economy initiatives in manufacturing companies: Consolidation of leading sustainability-related performance indicators. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 241, 118318. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118318.

63. Bakker, C., den Hollander, M., van Hinte, E., Zijlstra, Y. (2014). *Products that Last: Product Design for Circular Business Models*. TU Delft Library, 112 p.

64. Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, Vol. 33, 308–320. DOI: 10.1080/21681015.2016.1172124.

65. Lieder, M., Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 115, 36–51. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.042.

66. Parkinson, H. J., Thompson, G. (2003). Analysis and taxonomy of remanufacturing industry practice. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 217, 243–256. DOI: 10.1243/09544080322328890.

67. Thierry, M., Salomon, M., Van Nunen, J. (1995). Strategic issues in product recovery management. *California Management Review*, Vol. 37. DOI: 10.1016/0024-6301(95)91628-8.
68. Allwood, J. M., Ashby, M. F., Gutowski, T. G., Worrell, E. (2011). Material efficiency: A white paper. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 55, 362–381. DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.11.002.
69. Reike, D., Vermeulen, W. J. V., Witjes, S. (2018). The circular economy: new or refurbished as CE3.0? – exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 135, 246–264. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.08.027.
70. Gitelman, L. D., Ratnikov, B. E. (2006). *Energeticheskii biznes [Energy Business]*. Moscow, Delo. (In Russ.).
71. Gitelman, L. D., Ratnikov, B. E. (2013). *Ekonomika i biznes v elektroenergetike [The economics and business of power engineering]*. Moscow, Ekonomika. (In Russ.).
72. Maisiuk, E. P. (2017). Printsipy i metody otsenki effektivnosti prirodookhrannykh meropriyatii v energetike (Principles and methods used for performance evaluation of environmental measures in power industry). *Energetika i klimat (Energy and Climate)*, No. 4, 92–98. (In Russ.).
73. Chebotareva, G. S., Dvinianinov, A. A. (2021). Ekonomicheskaya alternativa zameny tsentralizovannogo gazosnabzheniya avtonomnymi biogazovymi ustanovkami v gorodakh Rossii (An Economic Alternative to Replacing Centralized Gas Supply with Autonomous Biogas Facilities in Russian Cities). *Journal of Applied Economic Research*. Vol. 20, No. 3, 582–612. DOI: 10.15826/vestnik.2021.20.3.023. (In Russ.).
74. Karaeva, A. P., Magaril, E. R. (2020). Pokazateli prirodnoemkosti proizvodstva energii kak instrument otsenki effektivnosti proektov v energetike (Environmental Capacity Indicators as a Tool for Evaluation of Energy Projects Efficiency). *Journal of Applied Economic Research*, Vol. 19, No. 2, 166–179. DOI: 10.15826/vestnik.2020.19.2.009. (In Russ.).

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Magaril Elena Romanovna

Doctor in Engineering, 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.

Gitelman Leonid Davidovich

Doctor in Economics, Professor, Head of Department of Energy Industry and Enterprise Management Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia (620002, Ekaterinburg, Mira street, 19); ORCID 0000-0002-5943-7659; e-mail: ldgitelman@gmail.com.

Karaeva Anzhelika Pirmamedovna

Post-Graduate Student, 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 0000-0003-3367-7678; e-mail: anzhelika.karaeva@gmail.com.

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: ipkiselyov@mail.ru.

Kozhevnikov Mikhail Viktorovich

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Department of Energy Industry and Enterprise Management Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia (620002, Ekaterinburg, Mira street, 19); ORCID 0000-0003-4463-5625; e-mail: m. v.kozhevnikov@urfu.ru.

ACKNOWLEDGMENTS

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

FOR CITATION

Magaril E. R., Gitelman L. D., Karaeva A. P., Kiselev A. V., Kozhevnikov M. V. Methodological Approach to the Environmental and Economic Assessment of Biogas Energy Projects. *Journal of Applied Economic Research*, 2022, Vol. 21, No. 2, 217–256. DOI: 10.15826/vestnik.2022.21.2.009.

ARTICLE INFO

Received February 26, 2022; Revised April 8, 2022; Accepted May 5, 2022.

