

УДК 697.34:577.4

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.007

Разработка методического подхода к оценке комплексного воздействия энерготехнологий на окружающую среду

Еделева Ольга Алексеевна, Стенников Валерий Алексеевич,

Зароднюк Максим Сергеевич

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Россия, Иркутск, edel@isem.irk.ru

Аннотация. Цель исследования заключается в разработке и апробировании методического подхода к комплексному экологическому анализу энерготехнологий, поскольку любая реализованная энерготехнология сопровождается нарушением экологического равновесия в природе. Задача разработки нового методического подхода состоит в более полном представлении возможного влияния на это нарушение, чтобы определить наиболее экологически чистую альтернативу для дальнейшей ее реализации. В статье обобщается отечественный и зарубежный опыт по созданию аналогичных методических подходов и предлагается разработка нового метода комплексного сравнения энерготехнологий, включающего формирование и расчет экологических критериев, характеризующих воздействие энерготехнологий на окружающую среду. Разрабатываемый методический подход представляется в виде схемы и состоит из трех этапов: информационного обеспечения, критериальной оценки энерготехнологий и сравнительного их анализа и ранжирования с помощью методов многокритериального анализа. С этой целью выполняются структуризация задач, формирование энерго-экологических критериев и их функциональный анализ. Основной особенностью методического подхода является системное сопоставление энерготехнологий на всем жизненном цикле их существования. В статье рассматриваются две энерготехнологии: традиционная паротурбинная теплоэлектроцентраль на угле и ветроэлектрическая станция с электродкотлами на уровне производства, эксплуатации и утилизации их основного оборудования. Сравнение энерготехнологий выполнено с использованием метода линейной свертки, преимущество которого заключается в том, что он требует минимального количества входных данных от пользователя, а выходные данные легко интерпретируются в виде наглядных иллюстраций. Исследования носят укрупненный характер и выполнены с целью демонстрации работоспособности методики, вместе с тем развитие предлагаемого методического подхода предполагает усложнение расчетных примеров, более приближенным к характеристикам реальных объектов.

Ключевые слова: энерготехнология, окружающая среда, жизненный цикл оборудования, потребление энергоресурсов, многокритериальный анализ, метод свертки

Цитирование: Еделева О.А. Разработка методического подхода к оценке комплексного воздействия энерготехнологий на окружающую среду / О.А. Еделева, В.А. Стенников, М.С. Зароднюк // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 3(27). – С. 68-83. – DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.007.

Введение. Традиционное производство тепловой и электрической энергии неразрывно связано с негативным воздействием на окружающую среду, включая загрязнение водоемов, атмосферного воздуха и почвы, отчуждение земель, нарушение природных экосистем, отрицательное влияние на пути миграции и территории обитания животных и т.д. Мировое сообщество видит решение этой проблемы в интенсивном развитии возобновляемой энергетики, отмечая ее основное преимущество – минимальное воздействие на окружающую среду. Действительно, в данном случае производство тепловой и электрической энергии идет без сжигания органического топлива и, как следствие, без выделения загрязнителей окружающей среды на стадии эксплуатации энергетического оборудования. Однако, все не так однозначно, если рассматривать весь жизненный цикл существования возобновляемых технологий, начиная от получения материала для изготовления оборудования до его утилизации по истечении срока службы.

Многими авторами [1-6] в настоящее время отмечается необходимость применения новых методических подходов для более полного оценивания энергетических технологий по степени их комплексного воздействия на окружающую среду. В качестве аргументов нередко приводятся такие факторы, как то, что развитие энергетики на возобновляемых источни-

как энергии (ВИЭ) требует дополнительного использования невозобновляемых ресурсов, в частности, сырья для удобрений в случае с биоэнергетикой, металла для оборудования и строительных конструкций, нефти для изготовления лопастей ветроустановок и т.д. Соответственно, наращивание производства энергии за счёт ВИЭ будет требовать и роста потребления возобновляемых и невозобновляемых ресурсов. Кроме того, сам процесс производства оборудования для ВИЭ связан с химическими процессами по получению материалов для производства оборудования, что влечет за собой образование множества побочных продуктов химических реакций и негативно сказывается на окружающей среде, т.к. многие из этих продуктов не используются повторно. Отдельный вопрос возникает с утилизацией оборудования, вторичная переработка которого представляется сложной из-за многокомпонентных по своему составу композитных материалов, требует отдельного изучения и научных исследований, поскольку захоронение отходов не решает проблему загрязнения планеты.

Производство энергии неизбежно будет требовать извлечения ресурсов из наших недр и их переработки, что в конечном итоге всегда будет отрицательно воздействовать на окружающую среду. В связи с этим необходимы взвешенные комплексные решения, определяющие политику в энергетике. Они должны определять основополагающие принципы, обеспечивающие энергетическую безопасность, доступность энергии и защиту окружающей среды. С этой точки зрения интересным может быть подход [7], где авторы предлагают методику определения полной стоимости получения электроэнергии FCOE (the Full Cost Of Electricity), включающей расчет энергозатрат на производство оборудования, эксплуатацию, оплату выбросов, утилизацию и вторичное использование материалов. В своей работе авторы [7] исходят из того, что при расчете полной стоимости электроэнергии ветровая и солнечная энергия не дешевле, чем при использовании органического топлива.

В данной статье обобщается отечественный и зарубежный опыт разработки и применения методических подходов комплексного экологического сравнения энерготехнологий с одновременным производством электроэнергии и тепла. Отмечается, что имеющиеся работы в основном направлены на сравнение жизненных циклов оборудования только по одному виду получаемой энергии. Оригинальность предлагаемого в настоящей статье подхода состоит в формировании и расчете критериев, характеризующих энерготехнологии с экологических позиций с учетом системных факторов.

Сложность формирования и расчета таких критериев заключается в том, что многие показатели, такие, например, как шумовое воздействие, или сокращение популяции птиц требуют специальных исследований, основанных на статистических данных природных наблюдений, полученных на базе опыта эксплуатации энергоустановок [8]. В настоящее время существуют методические подходы, позволяющие приближенно приводить оценку таких воздействий к эквиваленту, то есть оценивать наносимый ущерб в относительных единицах приведения к какому-либо показателю, например, приведение к выбросам CO_2 [1-3], или затратам [9], согласно которым производится оценка в денежной форме возможных отрицательных последствий от выбросов загрязняющих веществ (в рассматриваемый период времени их удалось избежать в результате природоохранной деятельности). Другая трудность связана с тем, что следует сопоставлять эффективность энерготехнологий с позиции приведения к одному уровню энергозатрат на производство, эксплуатацию и утилизацию оборудования (собственные нужды) с получением полезного количества энергии в процессе эксплуатации. Кроме того, при сопоставлении энерготехнологий следует принимать во внимание оценку времени, как ресурса, определяющего степень цикличности воспроизводства оборудования самих энергетических установок.

Следующей проблемой является выбор методического инструментария для комплексной системной оценки технологий, который смог бы интегрировать в себе весь комплекс

неравнозначных и несопоставимых друг с другом критериев оценки негативного воздействия на окружающую среду и провести сопоставление этих технологий для выбора наиболее эффективной из них. Относительно предпочтительными здесь могут быть разнообразные методы многокритериального анализа (МКА) [10].

1. Методический подход к комплексному сопоставлению энерготехнологий. Общую схему методического подхода к комплексному сопоставлению энерготехнологий можно представить в виде трех этапов (рис. 1).

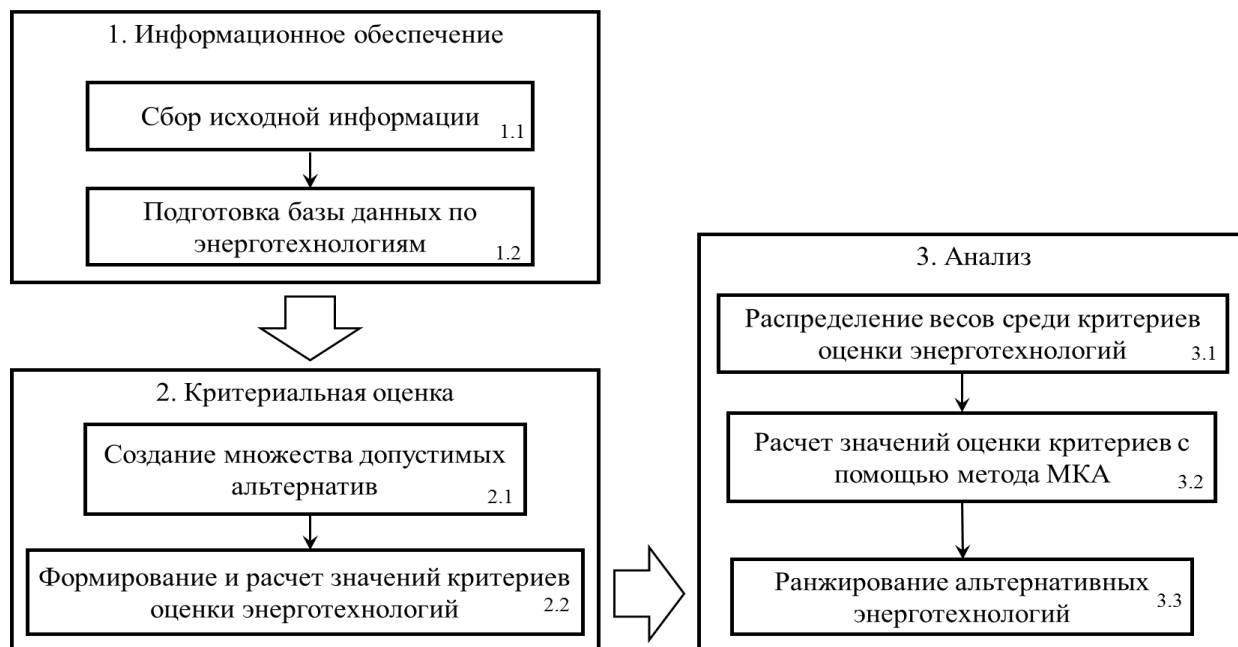


Рис. 1. Концептуальная схема методического подхода к сопоставлению энерготехнологий с помощью методов МКА

Представленная на рис. 1 концептуальная схема комплексной оценки и анализа энерготехнологий отражает методический подход, имеющий более широкое использование, чем только экологическое их сопоставление. Она может найти применение и для технико-экономических, эколого-экономических и других исследований, что во многом будет определяться поставленными целями и задачами. Это обеспечивается возможностью формирования множества критериев сопоставления энерготехнологий, из которого в зависимости от целеполагания и направленности исследований выделяется необходимый их состав и определяется расчетная модель. На первом этапе формируется информационная база по энерготехнологиям (рис. 1, п. 1.1, 1.2), которая требуется для их системного сопоставления. На втором этапе осуществляется генерация альтернативных энерготехнологий (рис. 1, п. 2.1), их приведение к равному энергетическому эффекту, уточнение расчетных критериев и комплексная оценка альтернатив (рис. 1, п. 2.2).

На третьем этапе определяются весовые приоритеты критериев (рис. 1, п. 3.1), с помощью одного из методов МКА находится интегральная оценка критерия (рис. 1, п. 3.2), на основе которой выполняется ранжирование энерготехнологий по их максимальной эффективности (рис. 1, п. 3.3).

2. Формирование и расчет экологических критериев оценки энерготехнологий. Полный цикл жизни энергоустановок схематично можно представить цепочкой (рис. 2). На каждом этапе, начиная от добычи сырья и заканчивая утилизацией оборудования происходит его взаимодействие с окружающей средой.



Рис. 2. Полный жизненный цикл энерготехнологий

Комплексная оценка воздействия объектов энергетики на окружающую среду, как отмечалось выше, осуществляется с помощью экологических критериев полного жизненного цикла, при этом численные значения не для всех из них могут быть определены расчетным путем. Это обуславливает необходимость деления их на критерии прямого действия (определяемые расчетным путем) и косвенного действия (оценка экспертов) (табл. 1).

Таблица 1. Разделение критериев экологической эффективности технологий

Критерии прямого действия	Критерии косвенного действия	
	Качественная характеристика негативного воздействия на экосистему	Критерии косвенного действия
Валовые выбросы вредных веществ в атмосферу	Изменение перемещения воздушных масс Изменение температуры окружающего воздуха Шумовое воздействие Изменение территории обитания животных	Оценка нарушения состояния атмосферы
Сбросы в гидросферу	Изменение перемещения водных масс Изменение температуры воды Изменение территории обитания животных	Оценка нарушения состояния гидросферы
Отходы в литосферу	Величина отчуждения земель Изменение территории обитания животных	Оценка нарушения состояния литосферы
Потребление возобновляемых/невозобновляемых ресурсов	Шумовое воздействие Изменение территории обитания животных	Оценка нарушения состояния атмосферы
	Величина отчуждения земель Изменение территории обитания животных	Оценка нарушения состояния литосферы
Энергозатраты жизненного цикла	–	–
Переработка использованных материалов, отходов производства	–	–

2.1. Расчет критериев прямого действия.

1. Критерий оценки выброса (сброса, отходов) j вредного вещества (k_j):

$$k_j = M_j \cdot t \cdot \frac{1}{D_j^n}, \tag{1}$$

где M_j – количество вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу, сбрасываемого в гидросферу, литосферу в год [11-16], тыс. т/год; t – временной период, г.; D_j^n – нормализо-

ванная величина опасности j вредного вещества, которая рассчитывается согласно принятым нормам максимально-разовых предельно-допустимых концентраций (ПДК) [17] как:

$$D_j^n = \frac{S_j}{S_{et}}, \quad (2)$$

где S_j – ПДК j вредного вещества, мг/м³ (мг/л, мг/кг); S_{et} – ПДК эталонного вредного вещества, мг/м³ (мг/л, мг/кг).

2. Критерий оценки выброса парниковых газов (k_{CO_2}):

$$k_{CO_2} = M_{CO_2} \cdot t, \quad (3)$$

где M_{CO_2} – количество парниковых газов, выбрасываемых в атмосферу [18], т/год.

3. Критерий оценки энергозатрат.

– Критерий потребления электроэнергии (k_w):

$$k_w = W \cdot t, \quad (4)$$

где W – годовой объем потребляемой электроэнергии, МВт·ч.

– Критерий потребления тепловой энергии (k_Q):

$$k_Q = Q \cdot t, \quad (5)$$

где Q – годовой объем потребляемой тепловой энергии, Гкал.

4. Критерий расхода возобновляемых/невозобновляемых ресурсов (k_r):

$$k_r = R \cdot t, \quad (6)$$

где R – годовой расход возобновляемого/невозобновляемого ресурса, т.

5. Критерий оценки степени переработки использованного материала/отходов производства (k_p):

$$k_{rc} = c \cdot P \cdot t, \quad (7)$$

где c – степень переработки использованного материала/отходов производства, %;

P – годовой объем использованного материала/отходов производства, т [19].

2.2. Расчет критериев косвенного действия.

1. Критерий оценки нарушения состояния атмосферы (k_{air}):

$$k_{air} = a_{tr} \cdot a_{tem} \cdot a_{no} \cdot a_{ha} \cdot t, \quad (8)$$

где a_{tr} – относительное изменение перемещения воздушных масс, %; a_{tem} – относительное изменение температуры окружающего воздуха, %; a_{no} – относительная величина шумового воздействия [20], %; a_{ha} – относительное изменение территории обитания животных, %.

2. Критерий оценки нарушения состояния гидросферы (k_{wat}):

$$k_{wat} = w_{tr} \cdot w_{tem} \cdot w_{ha} \cdot t, \quad (9)$$

где w_{tr} – относительное изменение перемещения водных масс, %; w_{tem} – относительное изменение температуры воды [16], %; w_{ha} – относительное изменение территории обитания животных, %.

3. Критерий оценки нарушения состояния литосферы (k_{ea}):

$$k_{ea} = e_{at} \cdot e_{ha} \cdot t, \quad (10)$$

где e_{al} – относительная величина отчуждения земель [19], %; e_{ha} – относительное изменение территории обитания животных, %.

Для определения показателей, характеризующих степень изменения перемещения водных и воздушных масс, а также ареала обитания животных предполагается использование экспертных оценок.

3. Практическое применение методического подхода. Основные положения предлагаемого методического подхода рассматриваются применительно к системному сопоставлению двух энерготехнологий, традиционной паротурбинной теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) на угле и ветроэлектрической станции с электродкотлами (ВЭС+ЭК). Сравнение производится только по основному оборудованию (табл. 2). Расходные материалы на вспомогательное оборудование, автоматику, диспетчерское управление на данном этапе исследований не учитываются.

Таблица 2. Технические показатели и характеристика основного оборудования

Наименование показателей	ТЭЦ	ВЭС+ЭК
Удельный расход тепла на одного жителя для отопления, вентиляции и ГВС, Гкал/год·чел.	21,2	
КПД тепловых сетей, доли	0,9	
Число часов использования максимума тепловой нагрузки, ч	6781	
Количество жителей, чел.	532565	
Установленная тепловая мощность, Гкал/ч	1850	1858 (2160 МВт)
Установленная электрическая мощность, МВт	708	1551 МВт
Состав основного оборудования	Котлы: 4хБКЗ-420-140-6 3хБКЗ-500-140-1С 1хБКЗ-820-140-1С Турбины: 2хПТ-60-130/13 (ЛМЗ) 2хТ-175/210-130 (ТМЗ) 1хТ-185/220-130 (ТМЗ) 1хР-50-130/13 (ЛМЗ)	ВЭУ: 977хV-126-3,8MW-H87 (VESTAS) (в составе ВЭУ 2931 лопасть, по 977 гондол, главных рам, башен) Электродкотлы: 108хКЭВ 20000/10

Предполагается, что на ВЭС не устанавливают аккумуляторные батареи из-за высокой стоимости, так как ВЭС такой большой мощности, работают совместно с традиционными источниками на ископаемом топливе, либо по связи с внешней энергосистемой для сглаживания неравномерности выработки электрической энергии. Для уравнивания энергетического эффекта рассматриваемых энерготехнологий с учетом стохастического характера работы ВЭС был использован коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), который для ВЭС на территории РФ в среднем за 2021 г. составляет 28,8% [21], исходя из этого значения установленная мощность ВЭС должна составлять 3711 МВт (см. табл. 2).

Рассмотрим более подробно влияние энерготехнологий на окружающую среду последовательно по всем стадиям жизненного цикла (рис. 2).

3.1. Добыча сырья, производство материалов и оборудования. Основное оборудование ветроустановки (ВЭУ) имеет в своем составе лопасти ветроколеса, гондолу, башню и главную раму. Гондола, башня и главная рама изготавливаются из конструкционной низколегированной стали, на 977 ВЭУ мощностью по 3,8 МВт требуется порядка 623326 т, на

производство 108 электрокотлов мощностью по 20 МВт требуется 1648 т легированной стали. Полный цикл производства лопастей ветроустановок можно представить в виде схемы, приведенной на рис. 3 [22-27]. На схеме слева направо показаны процессы добычи исходного природного сырья и производства необходимых материалов для изготовления лопастей, образования побочных продуктов химических реакций (голубым цветом), некоторые из которых представляют производство полезных продуктов для дальнейшего использования в различных отраслях промышленности (при расчете экологических критериев авторами они не учитываются), другие подлежат утилизации и могут представлять опасность для окружающей среды.

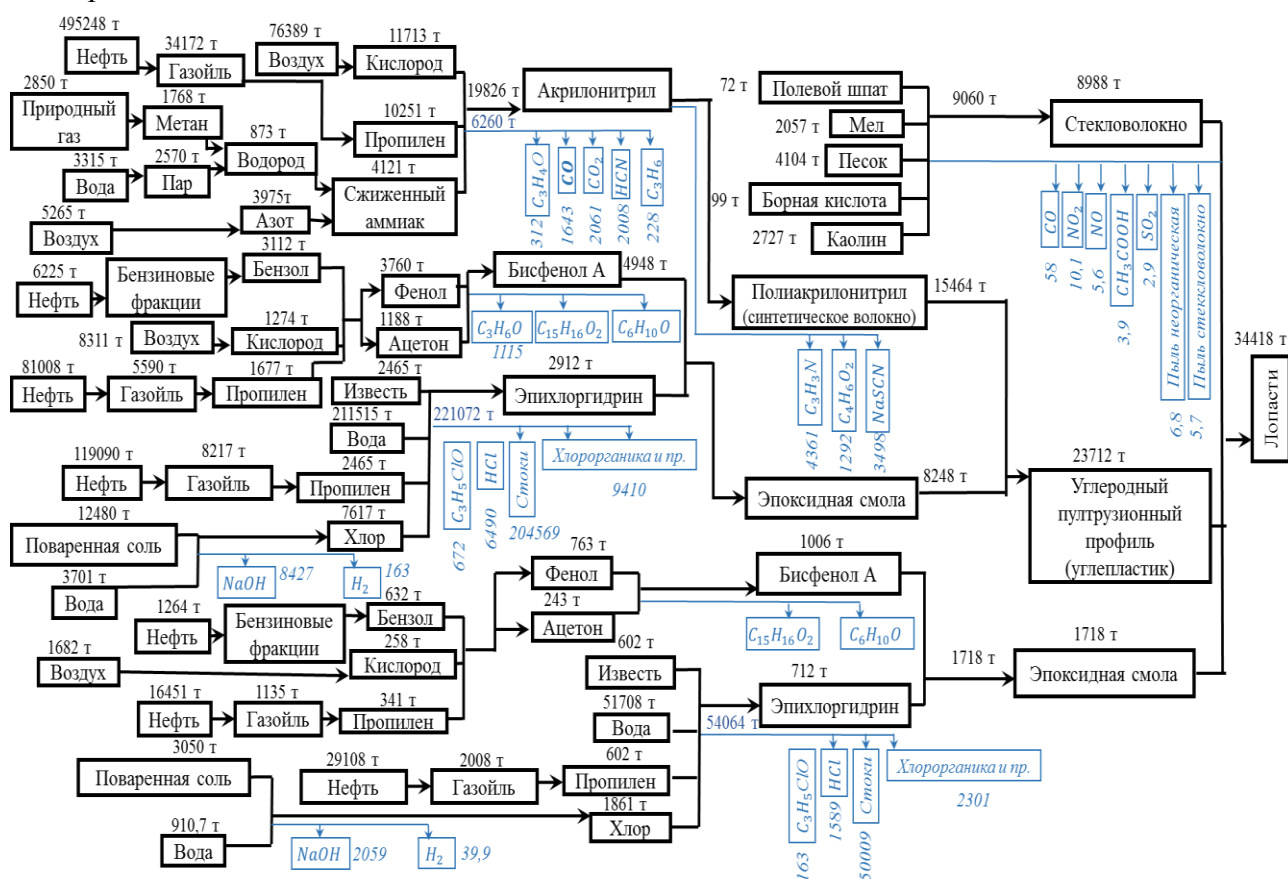


Рис. 3. Полный цикл производства лопастей ветроустановок

Основной технологией, используемой при производстве лопастей, является технология вакуумной инфузии. Вакуумная инфузия представляет собой процесс изготовления композитного материала, при котором пропитка выложенной заготовки смолой происходит за счет вакуума, создаваемого в герметичной рабочей полости. Основными материалами, применяемыми при производстве лопастей, являются ткани из стекловолокна, углеродные пултрузионные профили и полимерное связующее (эпоксидная смола). Основные технологии производства материалов промежуточных стадий включают: производство эпоксидной смолы из эпихлоргидрина и бисфенола в процессе конденсации в щелочной среде, производство эпихлоргидрина на основе хлоргидринных технологий, производство пропилена из нефти методом каталитического крекинга, производство хлора методом электролиза поваренной соли по мембранной технологии, производство бисфенола реакцией конденсации фенола и ацетона, производство фенола и ацетона кумольным способом из бензола с пропеном (пропиленом), производство бензола из бензиновых фракций нефти в процессе каталитического рифоминга, производство кислорода и азота из воздуха криогенным методом ректификации, производство акрилонитрила окислительным аммонолизом пропилена и пр.

Возможны другие технологии производства материалов промежуточных стадий, кроме указанных на схеме (рис. 3), поэтому полный цикл производства лопастей может быть различным, здесь авторами разработан лишь один из вариантов.

Основное оборудование ТЭЦ, котлы и турбины изготавливаются из легированной и аустенитной стали, а также титановых сплавов и чугуна. Общий объем расхода материалов на эти цели составляет 24398 т.

3.2. Эксплуатация основного оборудования. Предполагается, что ТЭЦ и ВЭС+ЭК работают в электроэнергетической системе. На стадии эксплуатации оборудования ТЭЦ и ВЭС+ЭК принимаем временной период равным 25 лет по среднему сроку эксплуатации лопастей ВЭУ. Срок службы конструктивных элементов ВЭУ: гондолы, башни и главной рамы составляет 25 лет, срок службы электрочувствительных элементов 30 лет. Парковый ресурс оборудования котлов и турбин ТЭЦ составляет от 17 до 30 лет. Эти данные необходимы для расчета циклов эксплуатации основного оборудования в формулах критериев оценки (1)-(10). На рис. 4 приведены годовые объемы выбросов вредных веществ, золы и шлака, производства электроэнергии и тепла, а также рассчитанные годовые значения косвенных критериев действия энергоустановок на окружающую среду при их эксплуатации.

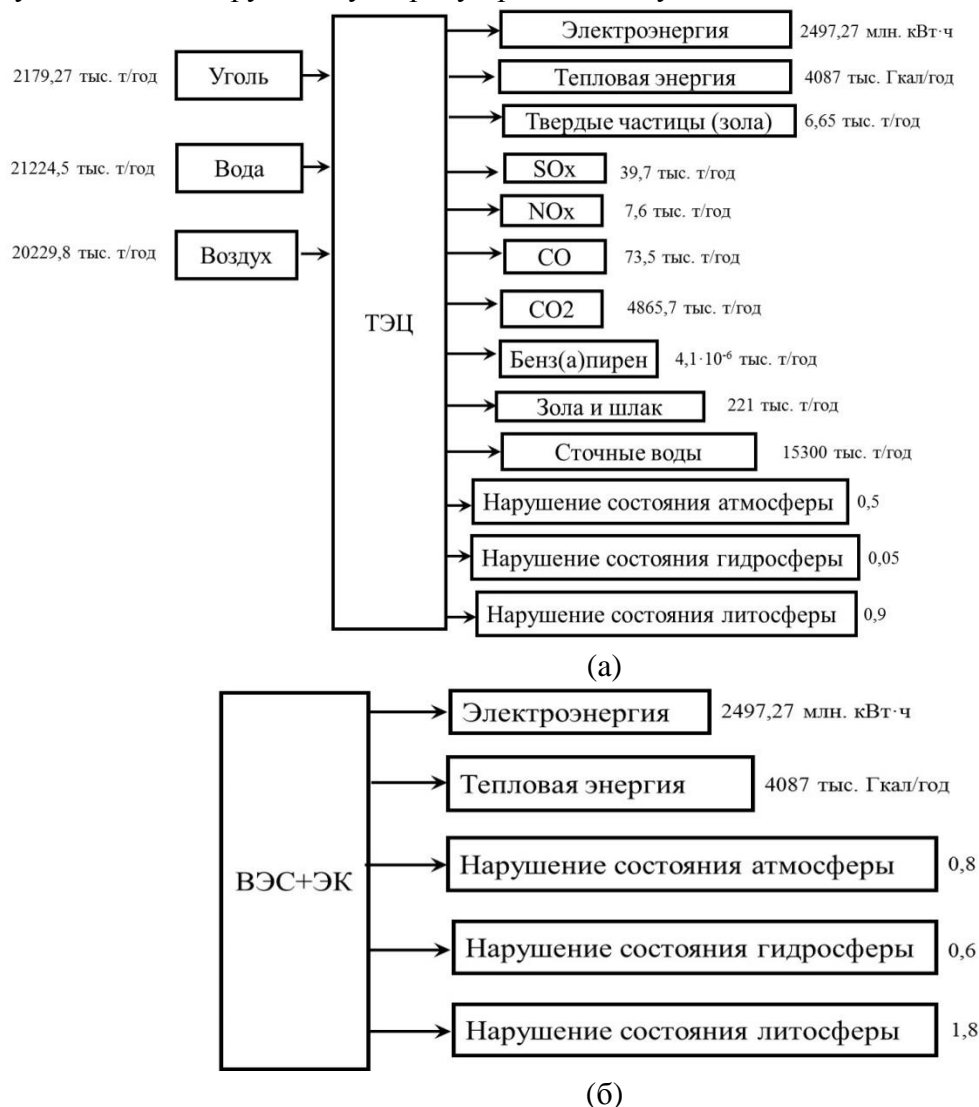


Рис. 4. Годовое производство электро-, теплоэнергии и поступление загрязняющих веществ в экосистему от (а) ТЭЦ, (б) ВЭС+ЭК

3.3. Утилизация основного оборудования, вторичная переработка отходов. Замена основного оборудования по истечении срока эксплуатации на ВЭС+ЭК (лопасти ветроколе-

са), производится после 25 лет эксплуатации. На ТЭЦ это соответствует, как правило, парковому ресурсу крупных энергоблоков, трубопроводов высокого давления и др. Этот период и принят за основу в дальнейших расчетах, хотя он может различаться для разного типа оборудования и при необходимости может конкретизироваться. Элементы оборудования из стали отправляются на вторичную переработку (переплав). Наиболее сложными для утилизации являются лопасти ветроколеса, которые изготавливаются из композитных материалов. Массовыми отходами ТЭЦ являются зола и шлак, которые в стране ежегодно в больших масштабах захораниваются на золошлакоотвалах.

В настоящее время разработаны или находятся в стадии освоения технологии утилизации, для отходов как ВЭС, так и ТЭЦ. В табл. 3 перечисляются возможные способы их утилизации.

Таблица 3. Технологии вторичной переработки отходов [28, 29]

Направления использования отходов энергоисточников	
ТЭЦ (зола и шлак)	ВЭС (композитные материалы)
<ul style="list-style-type: none"> • Дорожное строительство (гранулированные шлаки) • Строительные материалы (кирпич, цемент) • Инертные заполнители (аглопорит) • Извлечение полезных металлов • Извлечение урана 	<ul style="list-style-type: none"> • Шумоподавляющие барьеры на автомагистралях • Строительные материалы (производство бетона, досок, плит из композита) • Безотходные ВЭС (создание из измельченного композита новых лопастей)

Причем, можно смело говорить о практически 85-90% переработке этих отходов для обеих энерготехнологий. Проблема заключается не в технологиях переработки, а в отсутствии необходимых экономических условий для их использования в нашей стране [28-31].

В рассматриваемом примере за 25 лет эксплуатации на ТЭЦ образуется 5525 тыс. т. золы и шлака, на ВЭС 53,3 тыс. т отработанных композитных материалов.

3.4. Проведение многокритериального анализа. В настоящее время существует большое количество методов МКА, каждый из которых обладает определенным набором свойств и особенностей их применения. Метод линейной свертки входит в группу методов МКА, он широко используется в виду его простоты и достаточной наглядности получаемых результатов [10]. Метод свертки базируется на вычислении результирующего критерия, который представляет собой линейную комбинацию единичных показателей в виде суммы критериев, умноженных на числовые коэффициенты. Числовые коэффициенты отражают вес (значимость) каждого критерия и называются весовыми коэффициентами. Результирующие критерии сравниваются между собой и по наименьшему значению выбирается предпочтительный из альтернативных вариантов.

Для сравниваемых энерготехнологий по формулам (1)-(2), (4)-(10) был сформирован список критериев оценки и проведен их расчет (табл. 4) (расчет критерия оценки энергозатрат (4) не включен в пример, так как его описание и расчет достаточно трудоемки и являются предметом отдельного научного исследования).

Таблица 4. Формирование критериев оценки энерготехнологий

№	Наименование критерия/ Временной период/ Наименование технологии	25 лет	
		1 (ВЭС+ЭК)	2 (ТЭЦ)
1	Выбросы вредных веществ	8226	31601
2	Стоки	509156	19125
3	Потребление невозобновляемых ресурсов. Полевой шпат	144	0
4	Потребление невозобновляемых ресурсов. Мел	4114	0

5	Потребление невозобновляемых ресурсов. Песок	8208	0
6	Потребление невозобновляемых ресурсов. Каолин	5454	0
7	Потребление невозобновляемых ресурсов. Нефть	1496788	0
8	Потребление невозобновляемых ресурсов. Известь	6134	0
9	Потребление невозобновляемых ресурсов. Природный газ	5700	0
10	Потребление невозобновляемых ресурсов. Поваренная соль	31060	0
11	Потребление невозобновляемых ресурсов. Уголь	0	54481650
12	Потребление невозобновляемых ресурсов. Железная руда (Сталь)	624974	24398
13	Потребление возобновляемых ресурсов. Воздух	183294	505745950,1
14	Потребление возобновляемых ресурсов. Вода	542299	530612500
15	Выбросы парниковых газов (CO ₂)	4122	121642600
16	Литосфера. Композит	68836	0
17	Литосфера. Зола и шлак	0	5525000
18	Нарушение состояния атмосферы	12,6	12,5
19	Нарушение состояния гидросферы	0,15	1,25
20	Нарушение состояния литосферы	27,7	22,5

Метод линейной свертки в проводимых исследованиях применялся для определения степени влияния на загрязнение окружающей среды сравниваемых энерготехнологий по интегральному критерию и отдельным оценкам по критериальным группам (табл. 5) при сроке их эксплуатации 25 лет. Весовые коэффициенты внутри каждой группы критериев принимались одинаковыми, составляющими в сумме 1.

Результаты комплексного сопоставления энерготехнологий приведены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты расчетов с помощью метода линейной свертки

Номер и наименование группы расчета	Ранг	Название энерготехнологии	Значение результирующего критерия
			25 лет
I. Полный набор критериев	1	ВЭС+ЭК	174927
	2	ТЭЦ	60904143
II. Выбросы вредных веществ	1	ВЭС+ЭК	8226
	2	ТЭЦ	31601
III. Стоки	2	ВЭС+ЭК	25457
	1	ТЭЦ	956
IV. Потребление ресурсов	1	ВЭС+ЭК	242345
	2	ТЭЦ	90907341
V. Парниковые газы (CO ₂)	1	ВЭС+ЭК	4122
	2	ТЭЦ	121642600
VI Твердые отходы	1	ВЭС+ЭК	34418
	2	ТЭЦ	2762500
VII. Нарушение состояния окружающей среды	2	ВЭС+ЭК	13
	1	ТЭЦ	12

В рамках I группы расчетов (табл. 5) рассматривался интегральный экологический критерий, здесь лучшей оказалась технология ВЭС+ЭК. Это хорошо подтверждается дальнейшими расчетами по критериальным группам, представленными ниже.

II группа расчетов, выполненных по критерию вредных выбросов, также ставит в число приоритетных технологию ВЭС+ЭК. Это в целом совпадает с оценками мирового сообщества, согласно которому выбросы вредных веществ действительно меньше в случае использования ветровой энергетики, причем не только на стадии эксплуатации, но и на стадии производства материалов для изготовления оборудования для энергоисточников. Наиболее весомым по количеству загрязнителей является изготовление лопастей ВЭС, в тоже время объемы этих веществ не велики в сравнении с выбросами от сжигания угля на ТЭЦ.

В III группе расчетов по критерию объемов сточных вод более предпочтительной является ТЭЦ. При оборотном водоснабжении ежегодные стоки от ТЭЦ составляют небольшую величину и, в основном, они представлены концентрированными моющими растворами и отмывочными водами после химических промывок и консервации паровых котлов, шламовыми, замасленными и замазученными водами и т.д. В жизненном цикле ВЭС+ЭК сточные воды образуются в большом количестве из-за специфики химических процессов (например, при производстве эпихлогидрина).

По объемам потребления возобновляемых и невозобновляемых ресурсов (IV группа расчетов) лучшие показатели имеет электростанция ВЭС+ЭК. Ее потребление ресурсов связано только с материалами на ее изготовление, а на ТЭЦ воздух, вода и уголь используются в течение всего периода ее эксплуатации.

Выбросы парниковых газов (V группа расчетов) и твердых отходов (VI группа расчетов) в меньшем количестве образуются на ВЭС+ЭК, при этом первые возникают на стадии производства оборудования ВЭС+ЭК, а вторые по истечении срока эксплуатации ветроустановок в виде отработанных композитных материалов лопастей. На ТЭЦ ежегодно выбрасывается в атмосферу на несколько порядков больше CO_2 и вывозится в отвалы золошлаковых отходов.

Технология ТЭЦ (VII группа расчетов) представляется лучшей с небольшим разрывом результирующего критерия. Это объясняется тем, что ветрогенерация имеет значительное косвенное воздействие на атмосферу, гидросферу и литосферу (перемещение воздушных масс, шумовое, вибрационное воздействие, отчуждение большой территории и др.), а для ТЭЦ отягощающими факторами воздействия на экосистему являются загрязнения (дымовые газы, зола, шлак), связанные с длительным периодом ее эксплуатации.

Проведенные расчеты показывают, что многокритериальный анализ позволяет осуществить более полное сопоставление энерготехнологий и определить наиболее предпочтительную из них для реализации. Результат сравнения альтернатив во многом зависит от выбора критериальных групп, которые, в свою очередь, назначаются в зависимости от особенностей рассматриваемой территории и специфики поставленных исследователем целей. Очень чувствительным аспектом в сопоставительном анализе является назначение весовых коэффициентов в критериальной оценке. В наибольшей мере это относится к расчету критериев косвенного воздействия на экосистему. Здесь определяющим может быть эмпирический опыт экспертов.

Анализ результатов расчетов экологического сопоставления технологий ВЭУ+ЭК и ТЭЦ позволяет сделать следующие выводы:

1. По прямому минимальному воздействию на окружающую среду предпочтительной является электростанция на базе ВЭУ+ЭК. Это подтверждается большинством критериев при принятых исходных условиях.

2. Минимальную разницу в оценке энерготехнологий имеет комплексный критерий нарушения состояния окружающей среды. Он интегрально включает и прямое, и косвенное их воздействие на окружающую среду. Это приводит к тому, что косвенное влияние на эко-

систему ВЭУ+ЭК представляется достаточно значимым и в отдельных случаях может оказать решающее значение.

Заключение. Вопрос об экологически чистом энергоснабжении с традиционными и возобновляемыми источниками энергии в настоящее время носит дискуссионный характер. При этом высказываются различные точки зрения как по отношению к традиционным энергоисточникам (прежде всего на угле), так и к ВИЭ. Это объясняется, как правило, условиями сопоставления технологий. Объективная оценка может быть получена, только когда рассматривается весь жизненный цикл технологий от производства оборудования до его утилизации. Это представляется сложной задачей, которая до настоящего времени в полном объеме не решена.

В настоящем исследовании предлагается один из возможных подходов к анализу экологического воздействия энерготехнологий на экосистему на протяжении всего их жизненного цикла. Он позволит наиболее полно осуществить комплексную оценку негативного влияния энергетики на окружающую среду, выявить наиболее уязвимые места в технологиях, проработать возможные направления их устранения и в целом определить наиболее эффективные решения.

В рамках методического подхода предлагаются методы формирования и расчета критериев оценки, основанные на МКА, которые позволяют привести рассматриваемые технологии к сопоставимому виду и осуществить их системный анализ.

Апробация предложенного методического подхода проводится на примере сравнения ВЭС с электростанциями и ТЭЦ на угле. Для этого используется метод линейной свертки, являющийся представителем МКА. Результаты сравнения показывают, что ВЭС с электростанциями является более предпочтительной энерготехнологией при рассмотрении всего цикла жизни оборудования, так как потребляет меньше ресурсов и выбрасывает меньше загрязнителей в окружающую среду. Хотя, например, по стокам лучшей является ТЭЦ.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№FWEU-2021-0002) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. (проект №АААА-А21-121012090012-1) с использованием ресурсов ЦКП "Высокотемпературный контур" (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038).

Список источников

1. Дегтярев К.С. ВИЭ и побочные экологические эффекты / К.С. Дегтярев // Сантехника. Отопление. Кондиционирование, 2015. – №5. – С. 90–94.
2. Дегтярев К.С. Энергетика на возобновляемых источниках – от энтузиазма к прагматизму / К.С. Дегтярев // Сантехника. Отопление. Кондиционирование, 2015. – №4. – С. 74–81.
3. Andersen O. Unintended Consequences of Renewable Energy Problems to be Solved. – London: Springer-Verlag, 2013, 94 p.
4. Tsoutsos Th., Frantzeskaki N., Gekas V. Environmental impacts from the solar energy technologies. Energy Policy, 2005, no. 33, pp. 289–296.
5. Птускин А.С. Многокритериальная модель определения наилучшей доступной технологии при нечетких исходных данных / А.С. Птускин, Е. Левнер, Ю.М. Жукова // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2016. – № 6. – С. 105–127.
6. Панова С.А., Тишаева И.Р. Системная модель наилучшей доступной технологии / С.А. Панова, И.Р. Тишаева // Вестник МИТХТ, 2014. – т. 9. – № 5. – С. 83-85.
7. Schernikau L., Smith W. H., Falcon R. Full cost of electricity 'FCOE' and energy returns 'eROI'. Journal of Sustainable Development, 2022, no. 5, 13 p.
8. Кудрявцева О.В. Методика и практика оценки воздействия на окружающую среду. Проектная документация. Учебное пособие / О.В. Кудрявцева, Т.Н. Ледашева, В.Е. Пинаев, 2016. – М.: Экономический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова. – 170 с.
9. Методика определения предотвращенного экологического ущерба. Утв. ГК РФ по охране окружающей среды 30 ноября 1999 г., 1999. – М.: ГК РФ по охране окружающей среды. – 72 с.

10. Теория принятия решений в 2 т. Т.2: учебник и практикум бакалавриата и магистратуры / под ред. В.Г. Халина, 2016. – М.: Издательство Юрайт. – 431 с.
11. Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами, 1986. – Л.: Гидрометеиздат. – 183 с.
12. Методика определения валовых выбросов вредных веществ в атмосферу от котлов тепловых электростанций, 1984. – М.: СПО «Союзтехэнерго». – 19 с.
13. Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ в атмосферу с дымовыми газами отопительных и отопительно-производственных котельных МЖКХ РСФСР, 1991. – М.: ОНТИ АКХ им. К.Д. Памфилова. – 67 с.
14. Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ при сжигании топлива в котлах производительностью до 30 т/ч, 1985. – М.: Гидрометеиздат. – 24 с.
15. Защита атмосферы от промышленных загрязнений. В 2 ч., 1988. – М.: Metallurgia. – 1472 с.
16. Методика расчета предельно допустимых сбросов (ПДС) веществ в водные объекты со сточными водами. ВНИИ по охране вод бывший ГК СССР по охране природы, 1990. – М.: Фирма Интеграл. – 142 с.
17. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» Утв. от 28 января 2021 года №2, 2021.– М.: АО «Кодекс». – 987 с.
18. Методические указания по расчету валового выброса двуокси углерода в атмосферу из котлов тепловых электростанций и котельных. РД 153-34.0-02.318-2001, 2001.– М.: СПО ОРГРЭС. – 6 с.
19. Рекомендации по проектированию золошлакоотвалов тепловых электрических станций. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1986. – СПб: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – 129 с.
20. Тепловые электрические станции. Экологическая безопасность. Акустическое воздействие (шум) нормы и требования. СТО 70238424.13.140.001-2008, Приказ НП «ИНВЭЛ» от 15.12.2008 г. № 42, 2008. – М.: НП «ИНВЭЛ». – 25 с.
21. Системный оператор единой энергетической системы. Информация о фактическом режиме работы объектов ДПМ ВИЭ на территории РФ за 2021 г. – URL: <https://www.souups.ru/functioning/markets/surveys/renewable/2021/> (дата обращения 05.07.2022).
22. Разработка и производство лопастей ветроагрегатов. ООО «Политермо». – URL: http://www.politermo.ru/stati/Lopasti_vetroagregat.pdf (дата обращения 05.07.2022).
23. Лавренов А.В. Технологии получения пропилена: сегодня и завтра / А.В. Лавренов, Л.Ф. Сайфулина, Е.А. Булчевский, Е.Н. Богданец // Катализ в химической и нефтехимической промышленности, 2015. – т. 15. – № 3. – С. 6-19.
24. Гадецкий А.Ю. Эпихлоргидринные эпоксидные смолы – URL: <https://makston-engineering.ru/blog-zametki/post/epihlorgidrinnye-epoksidnye-smoly> (дата обращения 05.07.2022).
25. Справочник нефтехимика. В 2 т. / Под ред. С.К. Огородникова, 1978. – Л.: Химия. – 592 с.
26. Технология пластических масс / Под ред. В.В. Коршака. Изд. 3-е, перераб. и доп., 1985. – М.: Химия. – 560 с.
27. Башкатов Т.В., Жигалин Я.Л. Технология синтетических каучуков: Учебник для техникумов / Т.В. Башкатов, Я.Л. Жигалин. 2-е изд, перераб., 1987. – Л.: Химия. – 360 с.
28. Золошлаковые отходы. Часть 2: Экономическая выгода переработки. Как заработать на золе? – URL: https://ect-center.com/blog/zoloshlakovie-othody-2_(дата обращения 12.07.2022).
29. Переработка лопастей ветрогенераторов: от цемента до новых лопастей. – URL: <https://rawi.ru/2021/08/pererabotka-lopastej-vetrogeneratorov-ot-cementa-do-novyih-lopastej/> (дата обращения 12.07.2022).
30. Vestas представил технологию полной переработки лопастей ветряных турбин. – URL: <https://renen.ru/vestas-predstavil-tehnologiyu-polnoj-pererabotki-lopastej-vetryanyh-turbin/> (дата обращения 12.07.2022).
31. Лопастей много, а места мало, или как утилизировать ветрогенераторы – URL: <https://www.elec.ru/articles/naverteli-na-milliony-evro-tonn/> (дата обращения 12.07.2022).

Еделева Ольга Алексеевна. К.т.н., старший научный сотрудник лаборатории систем теплоснабжения Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН). Основным направлением исследований является формирование методологических подходов, разработка моделей и методов комплексного анализа области развития теплоснабжающих систем с учетом технико-экономических и экологических факторов. AuthorID: 268868, SPIN-код: 4487-3032, ORCID: 0000-0002-0388-6164, edel@isem.irk.ru, 664033, Иркутск, Лермонтова, 130.

Стенников Валерий Алексеевич. Академик РАН, профессор, заслуженный деятель науки РФ, директор Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН). Научные интересы: систем-

ные исследования в энергетике, теория гидравлических цепей, математическое моделирование, методы оптимизации, системы теплоснабжения, системы централизованного теплоснабжения, когенерация, надежность, энергоэффективность, энергосбережение, методы и алгоритмы расчета тарифов на тепловую энергию; интеллектуальные интегрированные энергетические системы. AuthorID: 442880, SPIN-код: 7059-4182, ORCID: 0000-0001-6219-0354, sva@isem.irk.ru, 664033, Иркутск, Лермонтова, 130.

Зароднюк Максим Сергеевич. К.т.н., научный сотрудник лаборатории термодинамики Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН). Основным направлением исследований является термодинамико-цепное моделирование энергетических систем и установок, инженерная экология, математическая физика, математическое моделирование. AuthorID: 112374, SPIN-код: 3176-8619, ORCID: 0000-0001-7920-5583, max@isem.irk.ru, 664033, Иркутск, Лермонтова, 130.

UDC 697.34:577.4

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.007

Development of a methodological approach to assessing the complex impact of energy technologies on the environment

Olga A. Edeleva, Valerij A. Stennikov, Maksim S. Zarodnjuk

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
Russia, Irkutsk, edel@isem.irk.ru

Abstract. The purpose of this scientific research is to develop and test a methodological approach to a comprehensive environmental analysis of energy technologies, since any implemented energy technology is accompanied by a violation of the ecological balance in nature. The problem of developing a new methodological approach is to more fully represent the possible impact on this violation in order to determine the most environmentally friendly alternative for its further implementation. The article summarizes domestic and foreign experience in creating similar methodological approaches and proposes the development of a new method for a comprehensive comparison of energy technologies, including the formation and calculation of environmental criteria that characterize the impact of energy technologies on the environment. The developed methodological approach is presented in the form of a diagram and consists of three stages: information support, criteria-based assessment of energy technologies and their comparative analysis and ranking using multi-criteria analysis methods. For this purpose, tasks are structured, energy-environmental criteria are formed and their functional analysis is carried out. The main feature of the methodological approach is a systematic comparison of energy technologies throughout the life cycle of their existence. The article discusses two energy technologies, a traditional CHP burning coal and a wind power plant with electric boilers at the level of production, operation and disposal of their main equipment. Energy technologies are compared using the linear convolution method, which has the advantage that it requires a minimum amount of input from the user, and the output is easily visualized. The studies are of an enlarged nature and were carried out in order to demonstrate the efficiency of the technique.

Keywords: Energy technology, environment, equipment life cycle, energy consumption, multicriteria analysis, linear convolution method

Acknowledgements: The research was carried out under State Assignment Project (no. FWEU-2021-0002) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030 (project no. AAAA-A21-121012090012-1) using the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no 13.СКР.21.0038).

References

1. Degtjarev K.S. VIJe i pobochnye jekologicheskie jeffekty [RES and environmental side effects]. Santekhnika. Otopleniye. Konditsionirovaniye [Plumbing, Heating and Air Conditioning], 2015, no. 5, pp. 90–94.
2. Degtjarev K.S. Jenergetika na vozobnovljaemyh istochnikah – ot jentuziazma k pragmatizmu [Renewable energy - from enthusiasm to pragmatism]. Santekhnika. Otopleniye. Konditsionirovaniye [Plumbing, Heating and Air Conditioning], 2015, no. 4, pp. 74–81.
3. Andersen O. Unintended Consequences of Renewable Energy Problems to be Solved. London, Springer-Verlag, 2013, 94 p.
4. Tsoutsos Th., Frantzeskaki N., Gekas V. Environmental impacts from the solar energy technologies. Energy Policy, 2005, no. 33, pp. 289–296.

5. Ptuskin A.S., Levner E., Zhukova Ju.M. Mnogokriterial'naja model' opredelenija nailuchshej dostupnoj tehnologii pri nechetkih ishodnyh dannyh [Multi-criteria model for determining the best available technology with fuzzy input data]. Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering], 2016, no. 6, pp. 105–127.
6. Panova S.A., Tishaeva I.R. Sistemnaja model' nailuchshej dostupnoj tehnologii [System model of the best available technology]. Vestnik MITHT [Vestnik MITHT], 2014, vol. 9, no. 5, pp. 83-85.
7. Schernikau L., Smith W. H., Falcon R. Full cost of electricity 'FCOE' and energy returns 'eROI'. Journal of Sustainable Development, 2022, no. 5, 13 p.
8. Kudrjavceva O.V., Ledashheva T.N., Pinaev V.E., Metodika i praktika ocenki vozdeystviya na okruzhajushhuju sredu. Proektnaja dokumentacija. Uchebnoe posobie [Methodology and practice of environmental impact assessment. Project documentation. Textbook]. Jekonomicheskij fakul'tet MGU imeni M. V. Lomonosova [Faculty of Economics at Lomonosov Moscow State University (MSU)], 2016, 170 p.
9. Metodika opredelenija predotvrashhennogo jekologicheskogo ushherba. Utv. GK RF po ohrane okruzhajushhej sredy 30 nojabrja 1999 g. [Methodology for determining the prevented environmental damage. Approved Civil Code of the Russian Federation for Environmental Protection November 30, 1999]. Moscow, GK RF po ohrane okruzhajushhej sredy, 1999, 72 p.
10. Teorija prinjatija reshenij vol. 2: uchebnik i praktikum bakalavriata i magistratury [Decision Theory vol. 2: textbook and workshop for undergraduate and graduate students]. Ed. Halin V.G. Moscow, Jurajt Publ., 2016, 431 p.
11. Sbornik metodik po raschetu vybrosov v atmosferu zagrjaznjajushhijh veshhestv razlichnymi proizvodstvami [Collection of methods for calculating emissions of pollutants into the atmosphere by various industries]. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat, 1986, 183 p.
12. Metodika opredelenija valovyh vybrosov vrednyh veshhestv v atmosferu ot kotlov teplovyh jelektrostantsij [Methodology for determining gross emissions of harmful substances into the atmosphere from CHP boilers]. Moscow, SPO «Sojuztehenergo», 1984, 19 p.
13. Metodicheskie ukazaniya po raschetu vybrosov zagrjaznjajushhijh veshhestv v atmosferu s dymovymi gazami otopitel'nyh i otopitel'no-proizvodstvennyh kotel'nyh MZhKH RSFSR [Guidelines for the calculation of emissions of pollutants into the atmosphere with flue gases from heating and heating-industrial boiler houses]. Moscow, ONTI AKH im. K.D. Pamfilova, 1991, 67 p.
14. Metodicheskie ukazaniya po raschetu vybrosov zagrjaznjajushhijh veshhestv pri szhiganii topli-va v kotlah proizvoditel'nost'ju do 30 t/ch [Guidelines for the calculation of pollutant emissions from fuel combustion in boilers with a capacity of up to 30 t/h.]. Moscow, Gidrometeoizdat, 1985, 24 p.
15. Zashhita atmosfery ot promyshlennyh zagrjaznenij [Protection of the atmosphere from industrial pollution]. Moscow, Metallurgija [Metallurgiya], 1988, 1472 p.
16. Metodika rascheta predel'no dopustimyh sbrosov (PDS) veshhestv v vodnye ob'ekty so stochnymi vodami. VNII po ohrane vod byvshij GK SSSR po ohrane prirody [Methodology for calculating the maximum allowable discharges of substances into water bodies with wastewater. All-Russian Research Institute for Water Protection, former State Committee for Nature Protection of the USSR], Moscow, Integral firm [Integral company], 1990, 142 p.
17. SanPiN 1.2.3685-21 «Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniju bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlja cheloveka faktorov sredy obitanija» Utv. ot 28 janvarja 2021 goda no. 2 [SanPiN 1.2.3685-21 «Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans» Approved. dated January 28, 2021 No. 2]. Moscow, AO «Kodeks», 2021, 987 p.
18. Metodicheskie ukazaniya po raschetu valovogo vybrosa dvoukisi ugleroda v atmosferu iz kotlov teplovyh jelektrostantsij i kotel'nyh. RD 153-34.0-02.318-2001 [Guidelines for calculating gross emissions of carbon dioxide into the atmosphere from boilers of CHP and boiler houses. RD 153-34.0-02.318-2001]. Moscow, SPO ORGR-JeS, 2001, 6 p.
19. Rekomendacii po proektirovaniju zoloshlakootvalov teplovyh jelektricheskijh stancij. VNIIG im. B.E. Vedeneeva [Recommendations for the design of ash and slag dumps of CHP. VNIIG them. B.E. Vedeneeva.]. Saint Petersburg, VNIIG im. B.E. Vedeneeva, 1986, 129 p.
20. Teplovyje jelektricheskie stancii. Jekologicheskaja bezopasnost'. Akusticheskoe vozdeystvie (shum) normy i trebovaniya. STO 70238424.13.140.001-2008, Prikaz NP «INVJeL» ot 15.12.2008 g. no. 42 [Thermal power stations. Environmental Safety. Acoustic impact (noise) norms and requirements. STO 70238424.13.140.001-2008, Order of NP "INVEL" dated December 15, 2008 no. 42]. Moscow, NP «INVJeL», 2008, 25 p.
21. Sistemnyj operator edinoj jenergeticheskoy sistemy. Informacija o fakticheskom rezhime raboty obektov DPM VIJe na territorii RF za 2021g. [System operator of the unified energy system. Information on the actual operating mode of CSA RES facilities in the Russian Federation for 2021], available at: URL: <https://www.sops.ru/functioning/markets/surveys/renewable/2021/> (accessed 5 July 2022).

22. Razrabotka i proizvodstvo lopastej vetroagregatov. OOO «Politermo» [Development and production of wind turbine blades. LLC "Polytermo"], available at: (accessed 5 July 2022).
23. Lavrenov A.V., Sajfulina L.F., Buluchevskij E.A. et al. Tehnologii poluchenija propilena: segodnja i zavtra [Propylene production technologies: today and tomorrow]. Kataliz v himicheskoj i neftehimicheskoj promyshlennosti [Catalysis in the chemical and petrochemical industry], 2015, vol. 15, no. 3, pp. 6-19.
24. Gadeckij A.Ju. Jephilorgidrinnye jepoksidnye smoly [Gadetsky A.Yu. Epichlorohydrin epoxy resins] [<https://makston-engineering.ru/blog-zametki/post/epihlorgidrinnye-epoksidnye-smoly>], available at: (accessed 5 July 2022).
25. Spravochnik neftehimika [Handbook of the petrochemist]. Ed. Ogorodnikov S.K. Leningrad, Himija, 1978, 592 p.
26. Tehnologija plasticheskikh mass [Technology of plastics] Ed. Korshak V.V. 2nd ed., Moscow, Himija [Chemistry], 1985, 560 p.
27. Bashkatov T.V., Zhigalin Ja.L. Tehnologija sinteticheskikh kauchukov: Uchebnik dlja tehni-kumov [Synthetic rubber technology: A textbook for technologists]. 2nd ed., Leningrad, Himija [Chemistry], 1987, 360 p.
28. Zoloshlakovye othody. Chast' 2: Jekonomicheskaja vygoda pererabotki. Kak zarabotat' na zole? [Ash and slag waste. Part 2: The economic benefits of recycling. How to make money on ashes?]. Available at: https://ect-center.com/blog/zoloshlakovie-othody-2_ (accessed 12 July 2022).
29. Pererabotka lopastej vetrogeneratorov: ot cementa do novyh lopastej [Recycling wind turbine blades: from cement to new blades]. Available at: <https://rawi.ru/2021/08/pererabotka-lopastej-vetrogeneratorov-ot-cementa-do-novyih-lopastej/> (accessed 12 July 2022).
30. Vestas predstavil tehnologiju polnoj pererabotki lopastej vetrjanyh turbin [Vestas introduces technology for complete recycling of wind turbine blades]. Available at: <https://renen.ru/vestas-predstavil-tehnologiyu-polnoj-pererabotki-lopastej-vetryanyh-turbin/> (accessed 12 July 2022).
31. Lopastej mnogo, a mesta malo, ili kak utilizirovat' vetrogeneratory [There are a lot of blades, but there is little space, or how to dispose of wind turbines]. Available at: <https://www.elec.ru/articles/naverteli-na-milliony-evro-tonn/> (accessed 12 July 2022).

Edeleva Olga Alekseevna. PhD, Senior Researcher in the Laboratory of Heat Supply Systems of Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Science (ESI SB RAS). The main research topics are formation of methodological approaches, models and methods of complex analysis and selection of areas for the development of heating systems, considering environmental and economic factors. AuthorID: 268868, SPIN: 4487-3032, ORCID: 0000-0002-0388-6164, edel@isem.irk.ru, 664033, Irkutsk, Lermontov st., 130.

Stennikov Valerij Alekseevich. Academician of RAS, Professor, honored Scientist of the Russian Federation, Director of Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Science (ESI SB RAS). Valery Stennikov is author and co-author of more than 400 scientific publications. The main research topics are system research in the energy, theory of hydraulic circuits, mathematical modeling, optimization methods, heat supply systems, district heating systems, cogeneration, reliability, energy efficiency, energy saving, , methods and algorithms for calculating heat tariffs; intelligent energy systems. AuthorID: 442880, SPIN: 7059-4182, ORCID: 0000-0001-6219-0354, sva@isem.irk.ru, 664033, Irkutsk, Lermontov st., 130.

Zarodnjuk Maksim Sergeevich. PhD, Researcher in the Laboratory of Thermodynamics of Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Science (ESI SB RAS). The main research topics are thermodynamic-circuit modeling of energy systems and plants, engineering ecology, mathematical physics, mathematical modeling. AuthorID: 112374, SPIN: 3176-8619, ORCID: 0000-0001-7920-5583 max@isem.irk.ru, 664033, Irkutsk, Lermontov st., 130.

Статья поступила в редакцию 26.08.2022; одобрена после рецензирования 23.09.2022; принята к публикации 23.09.2022.

The article was submitted 08/26/2022; approved after reviewing 09/23/2022; accepted for publication 09/23/2022.