

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОЦЕНКЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА УГОЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

© 2024 г. U. Das^a, *, C. Nandi^a, D. De^a, S. Das^a, S. S. Nandi^a

^aThe Department of Electrical Engineering, Tripura University, Agartala, Tripura, 799022 India

*e-mail: uttarad1995@gmail.com

Поступила в редакцию 30.03.2022 г.

После доработки 06.09.2022 г.

Принята к публикации 28.09.2022 г.

Уголь как ископаемое топливо — один из самых известных источников энергии во всем мире. Наряду с многочисленными преимуществами перед другими видами топлива он имеет и некоторые недостатки, прежде всего он оказывает неблагоприятное воздействие на окружающую среду — способствует глобальному потеплению, загрязнению воздуха, воды. Уголь образовался при разложении древних растений без доступа кислорода и как богатый углеродом ресурс является своего рода историческим наследием. В настоящей публикации рассматриваются экологические воздействия этого вида топлива в процессе его сжигания на ТЭС для выработки электроэнергии. Был изучен метод оценки жизненного цикла (life cycle assessment — LCA) “от колыбели до ворот” для угольной электростанции (ТЭС на угле). На всех трех этапах (добыча топлива, его транспортировка и применение на электростанции) выявлены основные очаги загрязнения и их негативное влияние на природу и человека. Проанализирована работа ТЭС мощностью 530 МВт в Китае. Проведено сравнение двух методов: CML 2001 (Baseline — базовый уровень) и средней точки ReCiPe (H) [ReCiPe Midpoint (H) method] — при оценке экологических последствий эксплуатации электростанции. Изменение климата, загрязнение пресных и морских вод, потенциал закисления — вот лишь некоторые из опасностей, возникающих при использовании угля и выявленных в ходе исследования. Более совершенный научный подход, основанный на следовании стандартным рекомендациям и эффективном управлении процессами, может помочь снизить загрязнение земель, атмосферного воздуха и воды. В статье представлены результаты исследований многообразного воздействия угольной генерации на окружающую среду и рассмотрены наиболее экологичные методы использования этого вида топлива для получения электроэнергии.

Ключевые слова: оценка жизненного цикла, транспортировка топлива, угольная электростанция, метод расчета воздействия на жизненный цикл, парниковые газы, метод средней точки ReCiPe (H), метод CML 2001 (базовый уровень)

DOI: 10.56304/S0040363624700024

Спрос на электроэнергию растет в мире с каждым днем. Чтобы его удовлетворить, нужно использовать различные возобновляемые и невозобновляемые источники энергии. На долю последних приходится более 60% общего объема потребления энергии. Уголь — самый востребованный невозобновляемый источник энергии (40% спроса) [1–3] и основной энергетический ресурс в некоторых странах. Несмотря на очевидные плюсы использования угля, прежде всего надежность, при его сжигании образуются вредные вещества, которые оказывают негативное воздействие на окружающую среду и живые организмы. Этому вопросу посвящены многие исследования.

Метод LCA довольно широко применяется для изучения и оценки воздействия вещества или продукта на окружающую среду [4, 5]. Срок служ-

бы угля (в настоящей статье именно он является исследуемым продуктом) может быть разделен на несколько этапов: извлечение из недр земли (сырье — исходный материал), транспортировка с места добычи на заводы по его переработке, использование (сжигание для выработки энергии), окончательная утилизация. Во всем мире возможность утилизации выделена в качестве критерия для определения самых чистых источников вырабатываемой электроэнергии. Поскольку при работе ветрогенерирующего оборудования в окружающую среду выделяются различные вещества, для сравнения рассматривались ветроустановки двух типов со спаренными турбогенераторами, размещенные на фермах в штате Карнатака (Индия). Согласно анализу результатов исследований, основанному на методе LCA, при асинхронной генерации выделяется меньшее количе-

ство вредных веществ (по сравнению с другими видами ветрогенерации), тогда как при повышении скорости ветра выбросы активных элементов в окружающую среду увеличиваются [6, 7].

В настоящем исследовании первостепенное внимание уделяется этапу генерации, т.е. этапу “от ворот до колыбели”. Метод LCA может быть полезен в изучении и разработке новых ультрасовременных технологий, которые помогают смягчать воздействие вредных веществ на окружающую среду. Этапы работы угольных электростанций взаимозависимы, поскольку составляют единый цикл: одна операция является следствием другой. Таким образом, анализ воздействия проводится для цикла в целом с объединением всех его этапов, а метод LCA выступает в качестве инструмента для выполнения более детальной оценки, которая может привести к более точным результатам.

За последние годы многими учеными были опубликованы статьи, посвященные проведению анализа по методу LCA таких объектов, как угольные электростанции. Далее представлены некоторые из этих работ, они помогли более тщательно изучить данную тему. Цель исследований [8, 9] — установить связь между выбросами CO_2 , потреблением энергии и экономическим ростом, а также предложить новые гибридные энергетические технологии, которые будут востребованы в будущем.

Анализ жизненного цикла системы производства электроэнергии при совместном сжигании угля и биомассы в Китае показал, что объемы выбросов CO_2 сокращаются [10]. Это дало возможность получить дополнительные данные о жизненном цикле угольных электростанций, применяющих технологии улавливания и хранения углерода (carbon capture and storage — CCS). В исследованиях [11–15] CCS рассматривается как перспективная технология, при применении которой выбросы CO_2 могут быть существенно снижены. Проводились и другие аналогичные исследования, в частности посвященные тому, какое влияние технология CCS оказывает на экономику и сохранение окружающей среды на различных этапах процесса улавливания и хранения углерода до его конечной утилизации.

Кроме того, предполагается, что применение технологий, способствующих снижению выбросов CO_2 , SO_2 и NO_x , таких как CCS, позволит достичь более высоких результатов. Для этого предлагается использовать коэффициенты нормализации. Выбросы CO_2 , SO_2 , TSP (total suspended particles — общее количество взвешенных частиц) и золы вносят значительный вклад в загрязнение окружающей среды [11–15].

Рисовая солома — ключевой аспект исследования. Она выступает в качестве потенциального

источника биомассы для совместного сжигания с углем на электростанциях. Настоящее исследование направлено на изучение возможности применения рисовой соломы как одного из видов топлива на угольных ТЭС и анализ последствий такого использования. Также была произведена оценка снижения негативного воздействия такого сжигания на окружающую среду и его финансовой составляющей. Было рассмотрено применение метода LCA и проанализировано влияние CCS в более широком смысле, т.е. изучено экономическое воздействие и спрогнозированы любые другие дополнительные выбросы [1, 16]. Исследование показало, что на разных этапах добычи, транспортировки и потребления угля его влияние на окружающую среду было различным. Наибольшее воздействие было отмечено на этапах добычи твердого топлива и генерации электроэнергии. Также была использована теория затрат для определения использованных ресурсов и внешних издержек.

Многие исследования были направлены на то, чтобы сделать электростанции, работающие на угле, более надежными и экологичными, а также задействовать различные современные технологии, которые помогают ограничить выбросы вредных веществ в атмосферу. В связи с растущим беспокойством мирового сообщества, связанным с загрязнением окружающей среды, для решения данного вопроса необходимо проделать дополнительную работу. Развивающиеся страны слишком сильно зависят от использования угля как сырья для производства электроэнергии, тогда как многие развитые страны все чаще переходят на возобновляемые источники энергии. В этом исследовании рассматриваются результаты применения метода LCA на угольных электростанциях в плане их воздействия на окружающую среду на протяжении всего процесса “от колыбели до ворот” [17].

ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА УГОЛЬНОЙ ТЭС В КИТАЕ: ОЦЕНКА ЕЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА И УЧЕТ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАТРАТ

Авторами [18, 19] была проведена оценка стоимости ресурсов, издержек на реализацию экологических программ, а также воздействия угольных электростанций на природу и человека. Кроме того, на примере некоторых провинций (на местном уровне) проводилась оценка результатов анализа (с высокой разрешающей способностью) выбросов углекислого газа в течение жизненного цикла предприятий угольной промышленности. Эти оценки базировались на подходе “снизу вверх” (bottom-up), при котором учитывался потенциал отрасли по сокращению выбросов углекислого газа по показателям дея-

тельности предприятий в отдельных (конкретных) провинциях [20]. Цель исследования [21] сводилась к тому, чтобы изучить, как материалы (сырье, ресурсы и т.п.), транспортировка угля и жизненный цикл установки влияют на “чистоту” угольной электростанции на сверхкритические параметры пара. Китайско-пакистанский экономический коридор — флагманский проект инициативы “Один пояс — один путь” — является основным источником финансирования проекта [21]. В результате разработанная при его поддержке электростанция обладает наибольшим потенциалом для снижения негативного воздействия на климат на протяжении всего своего жизненного цикла [21]. Преимущества исследований с использованием комбинированной геоинформационной системы (GIS) и оценкой жизненного цикла угольных электростанций, переоборудованных для совместного сжигания угля и биомассы, проведенных на примере Китая, были связаны с рассмотрением элементов “снизу вверх”, а также с предоставлением информации о затратах и полученной выгоде (сокращении выбросов углерода) при переходе с угля на биомассу. Итоги исследований [22, 23] могут быть полезны при оказании помощи другим странам в реализации успешных планов по применению биомассы как топливного ресурса.

В настоящей работе рассматривалась электростанция мощностью 530 МВт, расположенная в городе Дацин провинции Хэйлунцзян в северной части Китая. В этой провинции находятся крупнейшие запасы угля, миллионы тонн которого вывозятся в другие регионы страны. Продолжительность работы такой электростанции составляет 6000 ч/год, КПД производства электроэнергии при совместном сжигании угля и биомассы (а также таких ее разновидностей, как древесные гранулы и сельскохозяйственные отходы) — 32%. На электростанции была установлена паровая турбина высокого давления (производства Harbine Turbine Company); использован котел, работающий при сверхкритических параметрах пара; топливом служили угольные отходы.

В базах данных LCA основное внимание уделяется электростанции [10]. В документе представлено обширное сравнительное исследование двух методов: средней точки ReCiPe (H) и базового варианта CML 2001. При рассмотрении данных LCA фиксировались выбросы в атмосферу различных вредных веществ.

Основными целями настоящего исследования являлись:

- поиск опасных очагов загрязнения;
- изучение различных негативных воздействий, оказываемых угольной электростанцией;
- использование двух методов — средней точки рецепта (H) и базовой линии CML 2001 — в каче-

стве базового метода с целью расширить возможности сравнительного анализа LCA;

сопоставление технологий “от колыбели до ворот” при применении этих двух методов, а также при производстве электроэнергии без их использования.

Результаты исследования помогут в разработке новой, более чистой угольной ТЭС.

МЕТОДОЛОГИЯ

Метод LCA начинается с весьма важного шага — формулирования цели и определения объема исследования. На этом шаге закладывается основа для реализации последующих этапов, очерчиваются границы и создаются функциональные единицы, необходимые для всестороннего анализа, который включается в последующую инвентаризацию жизненного цикла, этапы оценки воздействия и интерпретации. Преимущество метода LCA заключается в способности к систематическому анализу и количественной оценке воздействия продукта, процесса или чьей-либо деятельности на окружающую среду на протяжении всего жизненного цикла. Этот метод помогает определить области, в которых можно улучшить состояние окружающей среды, и указывает, как при проектировании и эксплуатации систем возможно снизить их общее негативное экологическое воздействие.

Оценка жизненного цикла

Методом LCA можно рассчитать количество выбросов, использованных ресурсов и объем энергопотребления, которые связаны с переработкой сырья и производством готовой продукции [22]. С помощью этого метода можно определить воздействие коммерческого продукта, процесса или услуги на окружающую среду в течение всего его жизненного цикла [11], а также оценить затраты энергии и вещества на всех этапах цикла (от добычи до сжигания) и последствия выбросов загрязняющих веществ для окружающей среды. Таким образом, LCA может помочь в установлении экологических показателей продукта или производственного процесса. Общество экологической токсикологии и химии приложило немало усилий к тому, чтобы повысить информированность о результатах оценки жизненного цикла [10].

Life cycle assessment использовался в настоящем исследовании в качестве метода “от колыбели до ворот” для оценки экологических последствий на всех этапах жизненного цикла продукта: от добычи сырья, его обработки, транспортировки до конечного применения. Метод может использоваться также для оценки неблагоприятного воздействия некоего производственного предприятия на эко-



Рис. 1. Этапы, входящие в оценку жизненного цикла

логию, улучшения результатов системного анализа и процесса проектирования (планирование выбора материалов и источников энергии) с целью минимизировать общее воздействие систем на окружающую среду. Метод оценки жизненного цикла электростанции, работающей на угле, как правило, включает в себя четыре этапа: определение цели и масштаба (объединяются в один этап), анализ запасов, оценка воздействия на окружающую среду, интерпретация (обобщаются результаты, оцениваются неопределенности и даются рекомендации для более эффективного принятия решений в области устойчивого развития). Система LCA показана на рис. 1.

Цель и масштаб

Наиболее важные компоненты LCA — цель и масштаб [24], которые дают направление для бесперебойной реализации проекта. В LCA на этом этапе закладываются определенные критерии, цели или руководящие принципы. Основная цель использования метода LCA — рассчитать, насколько сильно окружающая среда загрязнена вредными веществами, выделяющимися в процессе эксплуатации угольной электростанции [13]. И цель, и масштаб проекта были связаны с воздействием выбросов на экологию. Настоящее исследование помогает властям принять данный факт к сведению и усовершенствовать процесс очистки выбросов, который в рамках этой работы осуществляется в три этапа. Сначала нужно уделить внимание процессу добычи топлива (угля) и последующей его промывке.

Известно, что уголь является популярным и надежным энергетическим ресурсом и, по данным Международного энергетического агентства, остается самым важным источником энер-

гии в мире. Объемы использованного угля растут день ото дня в связи с увеличением спроса на энергию по всему миру. К тому же уголь имеет довольно низкую стоимость. В статье рассматриваются добыча и промывка угля при эксплуатации электростанции. Подача сырья в систему — часть материального и энергетического “поток”. Во всех основных процессах получения и обогащения угля используется сырье для выработки электроэнергии. Изучаются три основные подсистемы LCA: добыча и промывка угля (эти этапы тесно взаимосвязаны, поэтому они воспринимаются как единый этап), его транспортировка, а также эксплуатация установки при сжигании данного вида топлива. На каждом этапе были определены материальные и энергетические потоки, а также обнаружены и измерены выбросы CO_2 , SO_2 , CO . На рис. 2 показан полный жизненный цикл угольных электростанций (от добычи угля до его сжигания на ТЭС).

Анализ запасов и расходов (инвентарный анализ)

Использованная энергия и выбросы веществ, образующихся при добыче, транспортировке угля и производстве электроэнергии, включены в исследование процессов жизненного цикла. Инвентарный анализ — это расчет, основанный на информации, полученной от угольных электростанций в ходе оценки жизненного цикла; это количественный анализ данных о ресурсах, потреблении энергии и выбросах вредных веществ в окружающую среду на различных этапах жизненного цикла продукта производства. Этап анализа запасов в LCA включает в себя все входные и выходные данные.

Чтобы рассчитать все затраты и выход конечного продукта, заложенный в проект, был прове-

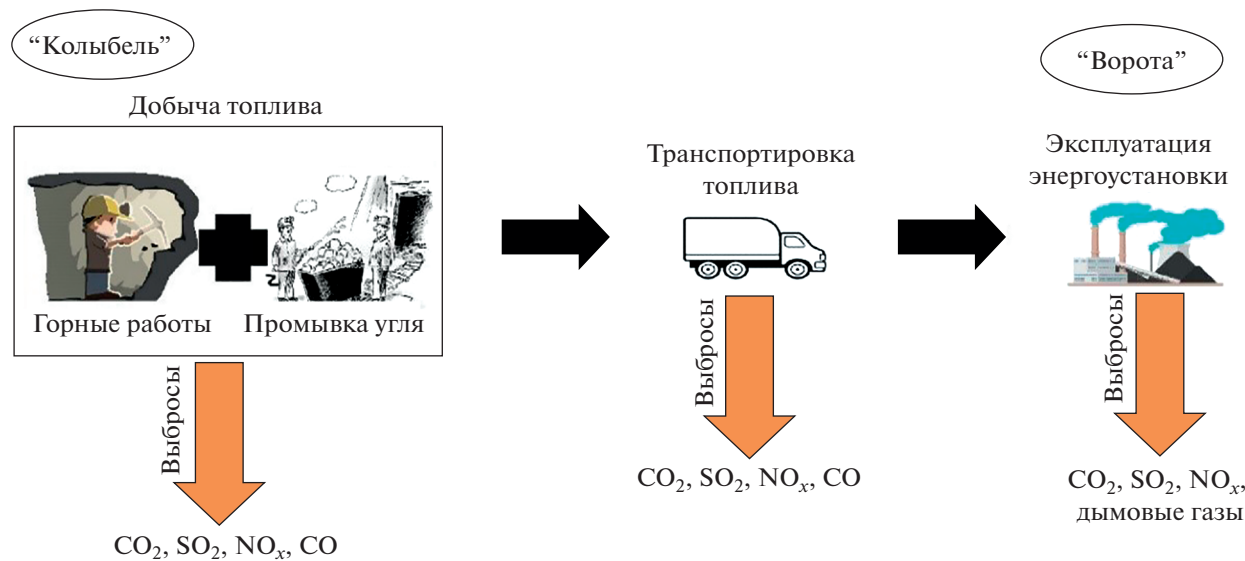


Рис. 2. Базовая структура процесса жизненного цикла топлива, используемого для производства электроэнергии на угольной электростанции

ден тщательный анализ. В табл. 1, 2 входные и выходные данные специально разделены для каждого этапа, а общая сумма указана для лучшего представления результатов анализа [10]. В качестве функциональной единицы сбора данных принят килограмм. Электроэнергия непрерывно вырабатывается благодаря использованию запасов угля. Функциональный блок применяется для стандартизации всех полученных данных.

В табл. 1 приведена исходная информация о том, сколько расходуется материалов на функциональную единицу: угля (угольные отходы), стали (железо Fe и углерод C), древесины, известняка [карбонат кальция – кальцит (CaCO_3) и магния – доломит ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$)], бензина (парафины – $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$), дизельного топлива [парафины ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$)], ароматические соединения ($\text{C}_n\text{H}_{2n-6}$) и нефтены (C_nH_{2n})], воды и электрической энергии.

В табл. 2 указаны:

массы загрязняющих веществ, образующихся при добыче, транспортировке угля и производстве электроэнергии, не содержащих метан углеводородов [этан (C_2H_6), этилен (C_2H_4), пропан (C_3H_8), пропилен (C_3H_6) и изопрен (C_5H_8)];

общее количество взвешенных частиц, которое является приведенным нормативным показателем количества твердых частиц в окружающем воздухе;

угольная порода (примерно от 10 до 15% общего объема добываемого угля), состоящая из твердых отходов, образующихся при добыче и промывке угля;

материал, оставшийся после разделения руды на ценные и экономически нерентабельные компоненты (в горнодобывающей промышленности называются хвостами);

Таблица 1. Исходные данные о расходе материальных ресурсов в процессе жизненного цикла топлива [10]

Ресурс	Добыча топлива	Транспортировка топлива	Производство электроэнергии	Общие затраты
Уголь, кг	44.78	48.83	4834.16	4927.77
Сталь, кг	12.53	0.00	0.00	12.53
Древесина, кг	13.43	0.00	0.00	13.43
Известняк, кг	0.00	0.00	56.17	56.17
Бензин, кг	1.76	0.00	0.00	1.76
Дизельное топливо, кг	1.27	25.31	0.00	26.58
Вода, кг	8087.27	0.00	38984.20	47071.47
Электрическая энергия, кВт · ч	122.30	0.00	633.48	755.78

Таблица 2. Выходные данные по эмиссии загрязняющих веществ при производстве электроэнергии на угольной электростанции [10], кг

Выбросы	Добыча топлива	Транспортировка топлива	Производство электроэнергии	Всего
CO ₂	59.23	80.65	8960.4	9100.28
CO	0.01	2.27	1.02	3.29
SO ₂	0.54	1.32	29.07	30.93
NO _x	0.14	2.27	25.31	27.72
N ₂ O	0.00	0.01	0.02	0.04
CH ₄	30.77	0.02	0.06	30.85
Неметановый углеводород	0.00	0.53	0.12	0.65
Общее количество взвешенных частиц	0.17	24.17	684.00	708.34
Угольная порода	1007.90	0.00	0.00	1007.90
Угольные хвосты	29.97	0.00	0.00	29.97
Твердые отходы	0.00	0.00	1840.70	1840.70
Угольная зола	0.00	0.00	0.97	0.97
Шлак	0.00	0.00	0.23	0.23
Сточные воды	0.00	0.00	19470	19470
Свинец	0.00	0.104	0.0006	0.1046

крупные гранулированные негорючие отходы, которые собираются на дне печей, в которых сжигается уголь для производства пара, электроэнергии или и того и другого вместе;

угольная зола и котельный шлак, сточные воды, диоксид углерода CO₂, монооксид углерода CO, диоксид серы SO₂, метан, оксид азота, закись азота N₂O и свинец Pb.

Данные, подготовленные для этого исследования, в основном относятся к угольной электростанции.

Оценка воздействия на окружающую среду

Метод LCA позволяет определить воздействие продукта на окружающую среду на протяжении всего его жизненного цикла — от добычи сырья, его транспортировки до сжигания для производства электроэнергии. Данные инвентарного анализа преобразуются в набор потенциальных последствий для окружающей среды при оценке жизненного цикла. Такая оценка проводится с целью определить экологические последствия на основе полученных результатов. Методы LCA базовой линии CML 2001 и средней точки ReCiPe (H) были использованы для оценки от “колыбели до ворот”. Эти два метода представляют собой метод оценки воздействия, который ограничивает количественное моделирование ранними этапами причинно-следственной цепочки (детальное моделирование и анализ начальных этапов, где взаимосвязь между входными данными и воз-

действием на окружающую среду становится более понятной и надежной, что помогает повысить точность и однозначность общей оценки), чтобы уменьшить неопределенность. После тщательного исследования было установлено, что воздействие выбросов вредных веществ на окружающую среду варьировалось в зависимости от стадии: добычи сырья, его транспортировки и использования на электростанции. Для инвентарного анализа применялся метод ecoinvent 3.2 LCIA (life cycle impact assessment) от openLCA. Данные классифицировались по промежуточным группам на основе общепризнанных механизмов (к примеру, изменение климата) или реже применяемых способов объединения.

Интерпретация

Заключительный этап исследования LCA — интерпретация. Это процесс категоризации (классификации), количественной оценки, проверки и методической оценки результатов LCA. Результаты анализируются, выявляются важные проблемы и делаются выводы на этапе интерпретации LCA. Результаты инвентаризации и оценки воздействия на окружающую среду анализируются с учетом исходных данных исследования о сырье, материалах и выбросах вредных веществ. При проведении оценки рассматриваются продукт, технологический процесс (жизненный цикл от добычи сырья до его использования) и утилизация отходов.

По результатам исследования анализ воздействия выполняется с помощью программного инструмента openLCA. Этот инструмент на базе ecoinvent 3.2 задействован для определения воздействия LCIA на окружающую среду с помощью одного из двух методов: ReCiPe Midpoint (H) или CML 2001 (базовый вариант).

Характеристика

После выбора и определения категорий (типов) воздействия на окружающую среду (например, изменение климата, закисление почв и т.д.) им присваивается относительный вклад каждого входного и выходного сигнала в рамках продуктовой системы в нагрузку на окружающую среду. Эти категории воздействия затем преобразуются в показатели воздействия на окружающую среду. Для этого можно использовать уравнение, представляющее собой умножение результатов инвентаризации, собранных на этапе классификации, на коэффициенты характеристики каждого химического вещества в рамках каждой категории воздействия:

$$\text{Показатель категории} = \sum_R [\text{характеристический коэффициент (R)} \times \text{инвентаризация выбросов (R)}], \quad (1)$$

где R обозначает категорию химического воздействия; первый множитель представляет собой потенциальное воздействие на окружающую среду вещества, относящегося к определенной категории воздействия R ; второй множитель — количество выбросов этого вещества.

Вклад единицы массы выбросов (1 кг) в окружающую среду линейно выражается коэффициентами, характеризующими уравнение (1). Так, например, потенциалы глобального потепления часто используются для агрегирования и анализа относительного вклада различных газов в изменение климата в пересчете на эквиваленты диоксида углерода (global warming potential — GWP). Значение GWP500, равное 100, означает, что через 500 лет 1 кг материала окажет влияние на изменение климата, соответствующее воздействию 100 кг углекислого газа.

Сравнение двух методов: CML 2001 Baseline и ReCiPe Midpoint (H)

В настоящей работе были использованы два метода: CML 2001 Baseline и ReCiPe Midpoint (H) и проведено сравнение их эффективности при оценке одного и того же перечня процессов жизненного цикла, полученного в результате исследования угольной электростанции, а также рас-

смотрено общее воздействие этих процессов на окружающую среду только при производстве электроэнергии. Итоги сравнения представлены в табл. 3.

Метод CML 2001 Baseline был разработан в 2001 г. и является одним из самых надежных из числа рассмотренных авторами настоящей статьи. Он обеспечивает нормализацию и использует несколько показателей на уровне средней точки. Категории воздействия CML 2001 — показатели, применяемые на среднем уровне. ReCiPe Midpoint (H) является одним из самых современных инструментов оценки воздействия, с его помощью можно получить результаты как для среднего, так и для конечного уровня, что делает его более подходящим для проведения исследований.

Таким образом, цель метода состоит в определении основного энергопотребления на протяжении жизненного цикла продукта или услуги. Он учитывает и прямое, и косвенное потребление энергии, но не оценивает отходы, образующиеся при потреблении энергии.

Методы расчета средней точки воздействия: ReCiPe Midpoint (H) и CML 2001 (базовый уровень)

Данный метод применим и для CML 2001, и для ReCiPe Midpoint (H). При оценке воздействия конкретного продукта оценка каждой категории воздействия MPK_i и расчет итоговых баллов воздействия осуществляются по формуле

$$MPK_i = \sum_k D_{n,k} n_k, \quad (2)$$

где n_k — запись инвентарного списка жизненного цикла; $D_{n,k}$ — коэффициент ущерба, связанный с компонентом n и воздействием k , который был взят из соответствующей базы данных методологии LCIA.

Средняя точка → конечная точка

При фиксированном коэффициенте средней и конечной точки жизненного цикла для каждой категории воздействия значения характеристик конечной точки ABx рассчитываются с помощью коэффициентов характеристики средней точки ABn :

$$ABx_{y,c} = ABn_y B_{N \rightarrow X,c}, \quad (3)$$

где c — область, нуждающаяся в защите [например, здоровье человека, экосистема (наземная, пресноводная и морская) или нехватка ресурсов]; y — стрессор, на который необходимо обратить внимание; $B_{N \rightarrow X,c}$ — коэффициент преобразования средней точки в конечную для зоны защиты c ; B — коэффициент пересчета.

Поскольку считается, что для каждого стрессора после пути эффекта средней точки экологи-

Таблица 3. Список воздействий на окружающую среду для методов средней точки ReCiPe (H) и базовой линии CML 2001

ReCiPe Midpoint (H)	CML 2001 Baseline Method
1. Истощение природных ресурсов. 2. Загрязнение морской воды. 3. Изменение климата. 4. Токсичность почвы. 5. Токсичность для человека. 6. Загрязнение пресной воды. 7. Закисление почвы. 8. Образование твердых частиц. 9. Фотохимическое образование оксидантов	Потенциал подкисления: 1) среднеевропейский; 2) общий. Изменение климата: 3) GWP 100a; 4) GWP 20a; 5) GWP 500a; 6) нижний предел GWP; 7) верхний предел GWP. 8. Истощение абиотических ресурсов. 9. Процесс эвтрофикации. Вещества, представляющие угрозу для организмов, обитающих в водной среде: 10) FAETP 100a; 11) FAETP 20a; 12) FAETP 500a; 13) FAETP бесконечно. Токсичность донных отложений в пресных водоемах: 14) FSETP 100a; 15) FSETP 20a; 16) FSETP 500a; 17) FSETP бесконечно. Токсичность для человека: 18) НТП 100a; 19) НТП 20a; 20) НТП 500a; 21) НТП бесконечно. 22. Фотохимическое образование оксидантов (летний смог) – воздействие на морские организмы (MOIR). Токсичность почвы: 23) TAETP 100a; 24) TAETP 20a; 25) TAETP 500a; 26) TAETP бесконечно. Загрязнение морской воды: 27) MAETP 100a; 28) MAETP 20a; 29) MAETP 500a; 30) MAETP бесконечно. Токсичность морских отложений: 31) MSETP 100a; 32) MSETP 20a; 33) MSETP 500a; 34) MSETP бесконечно. Фотохимическое образование оксидантов (летний смог): 35) EBIR; 36) РОСР с высоким содержанием NO_x; 37) РОСР с низким содержанием NO_x; 38) MIR

Примечание. FAETP – freshwater aquatic ecotoxicity potential (ETP); FSETP – freshwater sediment ETP; НТП – human toxicity potential; MOIR – marine organisms impacts; TAETP – terrestrial ETP; MAETP – marine aquatic ETP; MSETP – marine sediment ETP; EBIR – ecosystem biodiversity impacts; РОСР – photochemical ozone creation potential; MIR – marine aquatic ecotoxicity.

Таблица 4. Результат (1), описывающий общее воздействие на окружающую среду (“от колыбели до ворот”), и результат (2), отражающий общее воздействие на окружающую среду только при производстве электроэнергии (на электростанции) с использованием метода ReCiPe Midpoint (H) для угольных ТЭС

Категория воздействия	Результат, %		Отношение результата (2) к результату (1), %
	(1)	(2)	
Изменение климата (CC), кг CO ₂ (экв.)	9109.22	8966.36	98
Истощение природных ресурсов (FD), кг н.э.	2271.11	2199.54	97
Загрязнение пресной воды (FET), кг 1,4-DCB* (экв.)	5.91×10^{-4}	3.39×10^{-6}	0.6
Токсичность для человека (HT), кг 1,4-DCB (экв.)	1696.37	9.73	0.6
Загрязнение морской воды (MET), кг 1,4-DCB (экв.)	2.34×10^{-1}	1.34×10^{-2}	6
Образование твердых частиц (PMF), кг PM10 (экв.) (твердые частицы диаметром 10 мкм и менее)	6.186	5.814	94
Фотохимическое образование оксидантов (POF), кг неметановых летучих органических соединений	2.66	2.40	90
Закисление почв (TA), кг SO ₂ (экв.)	30.93	29.07	94
Токсичность почв (TET), кг 1,4-DCB (экв.)	6.29×10^{-4}	3.61×10^{-6}	0.6

* DCB (dichlorobenzene) – дихлорбензол.

ческие механизмы одинаковы, эти параметры “от колыбели до ворот → от колыбели до могилы” (подразумевается сравнение воздействия на окружающую среду двух вариантов: первый связан со всем жизненным циклом электростанции, а второй сосредоточен конкретно на экологии) одинаковы в каждой категории воздействия. Такой метод характерен только для ReCiPe LCIA. Поскольку метод предлагает как средний, так и конечный уровень, то CML ставит под угрозу единственный уровень средней точки. Имеется в виду, что ReCiPe обеспечивает комплексную оценку, которая включает в себя как ближайшие последствия для окружающей среды (средняя точка), так и потенциальный ущерб для конкретных проблемных областей (конечная точка). Напротив, CML концентрирует свою оценку только на ближайших последствиях и не дает детальной оценки потенциального ущерба, зафиксированного на уровне конечной точки. Выбор между двумя методами зависит от конкретных целей и требований оценки жизненного цикла.

Далее будет представлен сравнительный анализ полного цикла и цикла производства электроэнергии или эксплуатации угольной электростанции с использованием обоих методов, т.е. ReCiPe Midpoint (H) и CML 2001 (базовый уровень). Результаты анализа также приводятся в табл. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе при использовании методов ReCiPe Midpoint (H) и CML 2001 (базовый уровень) для оценки загрязнений, вызванных

эксплуатацией ТЭС, было получено девять и тридцать восемь воздействий соответственно. Были приняты во внимание “горячие точки” (hot spots) [они относятся к конкретным точкам или этапам системы (процесса) и вносят значительный вклад в общее воздействие этой системы на окружающую среду]. Эти точки являются “недружественными” на каждом этапе анализа средней точки. От добычи полезных ископаемых до их использования были выявлены различные воздействия на каждом уровне, которые затем были объединены методом нормализации в целях получения общих результатов. В табл. 4, 5 представлены окончательные результаты инвентаризационного анализа жизненного цикла.

Метод средней точки ReCiPe (H)

Метод RIVM (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu), разработанный в 2008 г., представляет собой метод LCIA под названием ReCiPe (применяется в Нидерландах и других странах Европы). Ключевая особенность метода – он позволяет объединить Эко-Индикатор 99 и CML в обновленной форме. Как уже отмечалось, ReCiPe Midpoint (H) – один из самых надежных методов. При проведении анализа с его помощью было выявлено несколько факторов, влияющих на окружающую среду.

Сохранив категорию воздействия неизменной, авторы рассчитали влияние на окружающую среду на обоих этапах: один от “от колыбели до ворот”, второй – только при производстве электроэнергии. Результаты исследований приведены в табл. 4.

Изменение климата

Для эгалитарного метода (Egalitarian method) был установлен временной горизонт в 1000 лет, что является самым длинным временным горизонтом, зарегистрированным в литературе для функции реакции CO_2 .

Под изменением климата понимается прежде всего повышение глобальной температуры, вызванное парниковым эффектом вследствие выбросов “парниковых газов” в результате деятельности человека. Существует распространенное научное мнение, что увеличение этих выбросов оказывает влияние на климат. Растущее количество CO_2 , образующегося в процессе сжигания ископаемого топлива и поступающего в атмосферу, является одной из главных причин глобальных климатических изменений. Было установлено, что выбросы CO_2 происходят преимущественно на этапе эксплуатации электростанции, работающей и по технологии совместного сжигания нескольких видов топлива.

Истощение природных ресурсов

Запасы природных ресурсов истощаются, когда люди добывают их больше и быстрее, чем природа их может восполнить. В эту категорию воздействия входит использование ископаемого угля на электростанциях для совместного сжигания с другими видами топлива. При изучении этого вопроса было установлено, что запасы угля сокращаются, поскольку уголь широко используется, во-первых, на электростанциях при производстве электроэнергии, чтобы удовлетворить растущий спрос на нее; во-вторых, для транспортировки топлива от мест его добычи до пункта назначения. В этом секторе уголь и дизельное топливо применяются в качестве топлива для транспорта: железнодорожного, автомобильного, морского.

Загрязнение пресной воды

Вместо европейской модели “судьба” использование фосфора (его движение и трансформация в окружающей среде) было рассмотрено с помощью сложной (более точной) глобальной модели.

Загрязняющие вещества, выбрасываемые в окружающую среду в процессе эксплуатации той или иной системы, могут быть весьма токсичными и потому оказывать негативное воздействие на водные объекты и приводить к деградации экосистемы. Так, проводя токсикологический анализ пресной воды, авторы пришли к выводу, что при транспортировке топлива в воду может попадать свинец.

Токсичность для человека

Оценка токсичности веществ и угрозы их для здоровья человека проводится как на молекуляр-

ном уровне, так и с учетом их возможной дозы. Определяется потенциальный вред, который может нанести “токсичная единица” при попадании в окружающую среду. Побочные токсичные вещества, в первую очередь мышьяк, дихромат натрия и фторид водорода, выделяются в основном в процессе выработки электроэнергии из ископаемых видов топлива. В данном исследовании было установлено, что токсикологическое воздействие на человека и природу вызвано свинцом, попадающим в окружающую среду на этапе транспортировки топлива.

Загрязнение морской воды

Для изучения причин накопления азота вместо европейской модели использовалась сложная глобальная модель его “судьбы”.

Токсичность морской воды является следствием выбросов вредных химических веществ (в том числе свинца) при транспортировке топлива, предназначенного для его сжигания на ТЭС, что оказывает негативное воздействие на морскую экосистему.

Образование твердых частиц

Сложная смесь микроскопических частиц образует особую материю. Соли некоторых кислот (такие как нитраты и сульфаты), органические соединения, металлы, а также частицы почвы или пыли — все это возможные компоненты загрязнений твердыми частицами. Находящиеся в атмосфере частицы формируются в результате сложных химических реакций с такими веществами, как, например, SO_2 , которые являются токсинами и образуются в процессе работы электростанции. В результате проведенного исследования было установлено, что твердые частицы образуются на всех этапах жизненного цикла топлива: при его добыче, транспортировке и сжигании в котлах ТЭС, при этом SO_2 выступает в роли основного загрязнителя.

Фотохимическое образование оксидантов

Озон защищает стратосферу, но в больших количествах он опасен для людей на Земле. Фотохимический озон, известный также как “приземный озон” (ground-level ozone), образуется в результате реакции молекул летучих органических веществ с оксидами азота в присутствии тепла и солнечного света. Согласно проведенному анализу, фотохимический озон тоже обнаруживается на всех стадиях жизненного цикла и на всех этих стадиях основными загрязнителями становятся SO_2 и CO .

Таблица 5. Результат (1), описывающий общее воздействие на окружающую среду (“от колыбели до ворот”), и результат (2), отражающий общее воздействие на окружающую среду только при производстве электроэнергии (при работе электростанции) с использованием метода CML 2001 (базовый вариант) для угольных ТЭС

Категория воздействия	Результат, %		Отношение результата (2) к результату (1), %
	(1)	(2)	
Потенциал подкисления, кг SO ₂ (экв.):			
среднеевропейский	37.12	34.88	94
общий	30.93	29.07	94
Изменение климата, кг CO ₂ (экв.):			
GWP 100a	9114.40	8967.96	98
GWP 20a	9114.13	8967.78	98
GWP 500a	9110.05	8965.06	98
низкий уровень GWP	9112.46	8967.34	98
высокий уровень GWP	9119.06	8969.38	98
Истощение абиотических ресурсов, кг сурьмы (экв.)	66.57	64.78	97
Процесс эвтрофикации, кг NO _x (экв.)	8.10×10^{-3}	5.4×10^{-3}	66.7
Вещества, представляющие угрозу для организмов, обитающих в водной среде, кг 1,4-DCB (экв.):			
FAETP 100a	1.22×10^{-2}	6.99×10^{-5}	0.6
FAETP 20a	9.22×10^{-3}	5.29×10^{-5}	0.6
FAETP 500a	2.00×10^{-2}	1.15×10^{-3}	6
FAETP бесконечно	2.51×10^{-1}	1.44×10^{-2}	6
Токсичность донных отложений в пресных водах, кг 1,4-DCB (экв.):			
FSETP 100a	3.13×10^{-2}	1.8×10^{-3}	6
FSETP 20a	2.34×10^{-2}	1.34×10^{-3}	6
FSETP 500a	5.14×10^{-2}	2.95×10^{-3}	6
FSETP бесконечно	6.44×10^{-1}	3.69×10^{-2}	6
Токсичность для человека, кг 1,4-DCB (экв.):			
HTP 100a	6.02	2.81	46.7
HTP 20a	5.50	2.81	51
HTP 500a	8.02	2.82	35.2
HTP бесконечно	51.77	3.07	6
Загрязнение морской воды, кг 1,4-DCB (экв.):			
MAETP 100a	15.85	9.09×10^{-1}	6
MAETP 20a	2.77	1.59×10^{-1}	6
MAETP 500a	92.33	52.96×10^{-2}	0.6
MAETP бесконечно	737.30	4.23	0.6
Токсичность морских отложений, кг 1,4-DCB (экв.):			
MSETP 100a	24.11	13.83×10^{-2}	0.6
MSETP 20a	5.09	2.92×10^{-1}	6
MSETP 500a	104.24	59.97×10^{-2}	0.6
MSETP бесконечно	753.82	4.32	0.6

Таблица 5. Окончание

Категория воздействия	Результат, %		Отношение результата (2) к результату (1), %
	(1)	(2)	
Фотохимическое образование оксидантов (летний смог):			
EBIR, кг образовавшегося озона	1.22×10^{-1}	3.77×10^{-2}	31
РОСР с высоким содержанием NO_x , кг этилена (экв.)	1.57	1.42	90
РОСР с низким содержанием NO_x , кг этилена (экв.)	1.32×10^{-1}	4.08×10^{-2}	31
MIR, кг образовавшегося озона	5.28×10^{-2}	1.63×10^{-2}	31
MOIR, кг образовавшегося озона	9.57×10^{-2}	2.96×10^{-2}	31
Токсичность почв, кг 1,4-DCB (экв.):			
ТАЕТР 100a	1.50×10^{-2}	8.63×10^{-5}	0.6
ТАЕТР 20a	3.02×10^{-3}	1.73×10^{-5}	0.6
ТАЕТР 500a	7.40×10^{-2}	4.24×10^{-4}	0.6
ТАЕТР бесконечно	1.64	9.40×10^{-3}	0.6

Защеление почв

Используемый в мире среднестатистический коэффициент, в основе которого лежит система специальных показателей, был заменен на европейский коэффициент. Вместо интенсивной пропитки для определения восприимчивости почв использовали повышенную концентрацию H^{++} .

Защеление почв происходит в результате изменения ее химических характеристик, вызванного попаданием в нее различных вредных веществ. Проведенный анализ показал, что SO_2 — главный загрязнитель на всех этапах жизненного цикла топлива.

Токсичность почв

Загрязняющие вещества, оказывающиеся по тем или иным причинам в почве, приводят к повышению ее токсичности. В рамках настоящего исследования было установлено, что одним из элементов, влияющих на токсичность почв, является свинец, который попадает в почву при транспортировке топлива.

Базовый метод CML 2001

В 2001 г. в Лейденском университете (Нидерланды) был разработан метод CML, имеющий более 1700 различных опций. Этот метод был разделен на два: базовый и небазовый. В настоящей работе рассматривается базовый вариант. Проанализировав воздействия различных веществ на окружающую среду, авторы пришли к выводу, что каждое из них приводит к негативным последствиям для экосистемы. На данный момент выявлено тридцать восемь видов воздействий, которые подлежат обязательному учету и

отнесению к определенной категории негативно-го воздействия на окружающую среду.

Были определены воздействия на окружающую среду в двух вариантах: для всего цикла “от колыбели до ворот” и только для этапа производства электроэнергии при сохранении категории воздействия неизменной. В табл. 5 приводятся результаты, характерные для базового метода CML 2001.

Загрязнение морской воды (100a, 500a)¹

Выбросы опасных токсичных веществ на этапах работы угольных электростанций приводят к загрязнению морской воды и, следовательно, к токсичности водной среды, которая становится губительной для жизни морских организмов. Свинец является преобладающим загрязняющим элементом (попадает в воду на этапе транспортировки топлива).

Токсичность донных отложений пресных водоемов (100a, бесконечно)²

Сброс загрязняющих веществ в пресноводные объекты на этапе эксплуатации ТЭС приводит к

¹ Числа 100a и 500a обозначают категории опасности, используемые для количественной оценки экотоксичности вещества. Первое значение указывает на более слабое воздействие, второе — на более сильное.

² Число 100a представляет собой категорию опасности, характеризующую степень негативного воздействия определенного вещества на человека и природу, причем это воздействие имеет ограничение. Категория “бесконечно” в контексте экотоксичности указывает на то, что воздействие вредного вещества считается потенциально очень высоким или практически бесконечным. Это означает, что вещество может оказывать существенное и продолжительное воздействие на донные отложения пресных водоемов.

тому, что донные отложения рек, озер, прудов становятся токсичными, что наносит ущерб флоре и фауне этих водоемов и делает пресную воду непригодной для питья. Здесь свинец играет активную роль как основной загрязнитель, попадающий в пресные воды на этапе транспортировки топлива.

Токсичность морских отложений (500a, 20a)

Опасные химические вещества, образующиеся при работе угольной электростанции и попадающие тем или иным путем в моря и океаны, делают токсичными воду и донные отложения. Это приводит к деградации донных отложений и губительным последствиям для жителей морских глубин. Активным загрязнителем морских и океанических вод является свинец, который попадает туда при транспортировке топлива.

Потенциал закисления

Кислотные дожди, также известные как кислотные осадки, появляются, когда диоксид серы и другие кислые газы вступают в реакцию с водой в атмосфере. Когда дождь идет далеко от источника газа (например, кислотный дождь, вызванный газами, образовавшимися в Великобритании, выпадает в Швеции), он разрушает экосистемы в разной степени, в зависимости от ландшафта местности. Количество газов, ответственных за закисление водоемов, почвы, воздуха и окружающей среды в целом, называется потенциалом закисления. Угроза выбросов опасных для экологии веществ возникает на всех трех этапах жизненного цикла: добыча топлива, транспортировка и сжигание в котлах ТЭС. Эмиссия SO_2 — основная причина появления кислотных дождей.

Изменение климата (20a, верхний предел, 500a, 100a, нижний предел)³

Изменение климата — одно из самых катастрофических экологических последствий деятельности человека (в том числе из-за сложности борьбы с ним ввиду его масштабности). Рост уровня CO_2 в атмосфере, вызванный сжиганием ископаемого топлива, во многом является причиной глобальных “колебаний” климата. В рамках настоящего исследования с использованием базового уровня CML 2001 было установлено, что CO_2 выделяется главным образом в процессе эксплуатации электростанции, работающей на угле.

³ “Верхний предел” и “нижний предел” — подразумевается, что существует диапазон вариаций оценки (например, верхний предел может составлять 500a, а нижний — 100a). Буква “a” означает временной горизонт или продолжительность (обычно выражается в годах). Значения в скобках — это различные временные горизонты, в которых оценивается воздействие изменения климата, от 20 до 500 лет с указанием верхнего и нижнего предела.

Фотохимическое окисление (низкий NO_x , высокий NO_x)⁴

Фотохимическое окисление, или летний смог, вызывает вторичное загрязнение воздуха в тропосфере, которое в основном возникает в результате реакции солнечного света с загрязняющими веществами, образующимися при сгорании ископаемого топлива и поступающими в окружающую среду с дымовыми газами. Отдельные стадии этапов транспортировки и сжигания топлива на ТЭС характеризуются высокими и низкими значениями эмиссии NO_x , CO и SO_2 .

Токсичность почвы (500a, 100a, 20a)

Для определения степени негативного воздействия некоторых химических соединений на экосистему использовали образцы природной воды с максимально допустимой концентрацией в ней этих соединений. Загрязняющие вещества, попадающие в почву на этапах жизненного цикла топлива, приводят к повышению токсичности почвы. Согласно проведенному анализу, токсичность почвы обусловлена, прежде всего, наличием свинца, попадающего в нее на этапе транспортировки топлива.

Истощение абиотических ресурсов

Истощение абиотических ресурсов — это понятие, используемое для описания процессов, происходящих с компонентами неживой, неорганической природы, такими как глина, минералы, торф и другие виды ископаемого топлива. Мерой дефицита продукта является количество абиотических ресурсов, потраченных на его производство, таких, например, как лигнит или уголь. Это означает, что дефицит продукта зависит от количества ресурсов и скорости их добычи и использования. В настоящее время уголь является основным источником загрязняющих веществ как при транспортировке топлива, так и при работе тепловой электростанции. Дизельное топливо также заслуживает роли главного героя в выбросах вредных веществ на этапе его транспортировки.

Токсичность для человека (100a, 20a, бесконечно)

Токсичность для человека определяется путем объединения токсичности на молекулярном уровне с потенциальной дозой и отражает возможный ущерб, который способна нанести единица “загрязнения” при попадании в окружающую среду. Большинство побочных продуктов, в том числе мышьяк, дихромат натрия и фторид во-

⁴ Низкий NO_x , высокий NO_x — оценка выбросов оксида азота в окружающий воздух.

дорода, образуются в процессе выработки электроэнергии при сжигании ископаемого топлива. В настоящем исследовании свинец, попадающий в окружающую среду на этапе транспортировки топлива, является токсичным для человека, как и SO_2 , выбрасываемый в атмосферу во время работы электростанции.

Процесс эвтрофикации

Эвтрофикация возникает, когда концентрация химических питательных веществ, поступающих в экосистему, становится избыточной, что приводит к аномальной биологической продуктивности. В реках происходит чрезмерный рост водных растений, прежде всего водорослей. Вследствие этого снижается качество воды и уменьшается численность животных. В рамках данной статьи эвтрофикация рассматривается в связи с тем, что основной ее причиной являются оксиды азота, образующиеся при сжигании топлива на электростанции и попадающие в водоемы при транспортировке угля и работе ТЭС.

Вещества, представляющие угрозу для организмов, обитающих в водной среде (20a, 500a, бесконечно)

Экотоксичные отходы, выбрасываемые на этапах эксплуатации ТЭС, могут оказывать негативное воздействие на гидробионты, приводить к снижению их популяции и даже гибели. Например, серьезную угрозу для окружающей среды представляют тяжелые металлы. С целью определить, как влияют токсичные вещества на окружающую среду, использовали воду с максимально допустимой их концентрацией. Анализ токсичности пресной воды проводился в связи с тем, что на этапе транспортировки топлива происходят выбросы свинца в водные объекты.

Воздействие основных загрязнителей

1. Изменение климата (climate change – CC) (20a, 100a, 500a и т.д.). Причиной являются выбросы в атмосферу парниковых газов, прежде всего углекислого газа, и это одна из главных проблем, которые необходимо решить ученым. За последние 60 лет уровень CO_2 увеличился в 100 раз. В последний раз повышение температуры на Земле произошло 3 млн лет назад. Тогда, если учитывать доиндустриальную эпоху, температура поднялась почти на 5 градусов. Рост температуры влияет не только на окружающую среду, но и на организм человека, вызывая головноекружение, головную боль, затруднение дыхания и т.д. Проанализировав данные, полученные в процессе исследований, авторы определили отношение результата

(2) к результату (1), которое составило более 90% (см. табл. 4, 5).

2. Истощение природных ресурсов (fossil depletion – FD). С наступлением промышленной революции в Европе, США и других странах в XVIII в. использование ископаемых видов топлива стало основной движущей силой промышленного производства и впоследствии привело к экономическому процветанию. В настоящее время годовой объем их добычи приближается к 10000 млн т нефтяного эквивалента (н.э.), по сравнению с ним добыча полезных ископаемых в начале XVIII в. была ничтожной. На сегодняшний день ископаемое топливо обеспечивает почти 80% всех энергетических потребностей. После анализа данных было рассчитано, что отношение результата (2) к результату (1) превышает 90% (см. табл. 4).

3. Истощение абиотических ресурсов. Понятие “абиотические ресурсы” относится к компонентам неживой неорганической природы, таким как глина, торф, минералы, ископаемое топливо. Количество абиотических ресурсов, используемых для производства или использования вещества, например бурого угля, является мерой его дефицита (другими словами, если для такого вещества требуется большее количество абиотических ресурсов, чем для вещества, которому необходимо меньшее их количество, то оно считается более дефицитным). В табл. 4 представлено отношение результата (2) к результату (1), превышающее 90%.

4. Загрязнение морской воды (marine ecotoxicity – MET) – это воздействие токсичных веществ на морскую экосистему, вызванное попаданием в морскую среду свинца. В табл. 4, 5 приведено отношение результата (2) к результату (1), которое составляет менее 10%.

5. Загрязнение пресной воды (freshwater ecotoxicity – FET) – еще одна категория воздействия, возникающая вследствие выбросов свинца в окружающую среду. В табл. 4, 5 представлено отношение результата (2) к результату (1), которое не превышает 10%.

6. Токсичность почвы (terrestrial ecotoxicity – ТЭТ). Выбросы свинца при сжигании топлива на электростанции приводят к повышению токсичности земной поверхности. Отношение результата (2) к результату (1) оказалось менее 10% (см. табл. 4, 5).

ВЫВОДЫ

1. В XXI в. оценка жизненного цикла была провозглашена одним из наиболее практичных инструментов содействия экологически устойчивому развитию планеты.

2. В данном исследовании использовался подход средней точки. Последствия воздействия на

окружающую среду были рассчитаны с помощью средней точки ReCiPe (H) и базового уровня CML 2001. Предложено подробное сравнение методов, связанных с оценкой жизненного цикла. Согласно анализу, на изменение климата, истощение ископаемых, токсичность для человека и закисление почв приходится почти 99.930% общего воздействия, рассчитанного по средней точке ReCiPe (H). В соответствии с базовым уровнем CML 2001, на категории изменения климата с горизонтами 100, 20, 500 лет, изменения климата с нижним и верхним пределами потенциала глобального потепления — GWP приходится почти 95.513% общего количества воздействий, рассчитанных с помощью этого метода.

3. По мнению многих исследователей, CML 2001 (базовый уровень) является наиболее подходящим методом, поскольку он рассматривает множество категорий воздействия, тогда как средняя точка ReCiPe (H) представляет лишь несколько последствий. При сравнении двух методов было установлено следующее:

метод CML делит категории воздействия на базовые и небазовые, при этом базовый уровень является наиболее часто используемой категорией воздействия в LCA, хотя основная цель методов ReCiPe в обновленной версии — предоставить метод, который сочетает в себе Eco-Indicator 99 и CML;

метод CML использует несколько индикаторов на уровне средней точки, хотя ReCiPe имеет дело с индикаторами средней точки (E, H и I) и конечной точки (E, H и I) (E = эгалитарист, H = иерархист, I = индивидуалист);

в CML 2001 характеристика основана на средних данных по Европе и миру. Нормализация проводится таким образом, чтобы исходными данными служили показатели нормализации по миру за 1990 и 1995 гг., так же как и ежегодные данные о негативных воздействиях выбросов на среднестатистического жителя планеты, тогда как для ReCiPe информация была получена на европейском уровне, в качестве базового года выбирался любой год, затем проводились этапы описания и нормализации. Однако в 2010 г. в параметры нормализации средней точки были внесены некоторые изменения;

в методе CML 2001 не используется взвешивание, в методе ReCiPe применяется панельный подход для взвешивания.

4. Данная статья поможет исследователям составить представление об анализе воздействий с помощью двух методов и их ограничениях. Жизненный цикл угля таков: от угольной шахты до сжигания на электростанции — это оценка “от колыбели до ворот”. Помимо этого, возрастает интерес к изучению воздействия на окружающую среду, происходящего только во время производ-

ства электроэнергии, и проведению пропорционального анализа, который сделает исследование более сложным и научным. Соответственно, при взаимодействии категории воздействия стадий (“от колыбели до ворот” и при эксплуатации установки) в обоих методах (ReCiPe и CML) идентичны, но в показателях воздействия присутствует некоторая разница. Изменение климата, закисление почв, эвтрофикация водоемов, токсичность для человека и другие факторы оказывают влияние на промежуточные показатели. Характеристики топлива считаются постоянными, следовательно, все параметры работы электростанции также являются постоянными. По мере увеличения размера электростанции и роста ее мощности выбросы вредных веществ будут повышаться. Быстрое развитие энергетики (в плане масштабы) и его экологические последствия стали серьезной проблемой в последние годы. Таким образом, с позиций оценки жизненного цикла топлива, LCA — это небольшой шаг к смягчению экологических последствий цикла “от колыбели до ворот”. Оценки воздействия на окружающую среду, комплексное управление отходами и исследования загрязнения — все это выигрывает от LCA.

5. Необходимо провести детальное исследование CCS для угольных электростанций — современной технологии, которую можно использовать для сокращения выбросов углекислого газа в окружающую среду и повышения экологичности электростанций. В последних работах, посвященных производству электроэнергии с использованием ископаемого топлива, утверждается, что для большинства методов характерны значительные выбросы вредных веществ в окружающую среду, прежде всего газообразного диоксида углерода. Поэтому тепловые электростанции, на которых применяются передовые технологии улавливания и хранения парниковых газов, могут стать основой для дальнейшего поддержания традиционной электрогенерации, а также синтеза дополнительного топлива с помощью специальных установок. Транспортировка и сжигание такого синтезированного топлива будут значительно более экологичными, чем те же процессы при тепловой генерации замкнутого цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Emissions** reduction potential from CO₂ capture: A life cycle assessment of a Brazilian coal-fired power plant / D.A.C. Branco, M.C.P. Moura, A. Szklo, R. Schaeffer // *Energy Policy*. 2013. V. 61. P. 1221–1235. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.043>
2. **Life** cycle emissions and cost of producing electricity from coal, natural gas, and wood pellets in Ontario, Canada / Y. Zhang, J. Mckechine, D. Cormier, R. Lyng, W. Mabee, A. Ogino, H.L. MacLean // *Environ. Sci.*

- Technol. 2010. V. 44. Is. 1. P. 538–544.
<https://doi.org/10.1021/es902555a>
3. **A streamlined** life cycle assessment of a coal-fired power plant the South African case study / I. Dunmade, N. Madushele, P.A. Adedeji, E.T. Akinlabi // *Environ. Sci. Pollution Res.* 2019. V. 26. P. 18484–18492.
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-05227-6>
 4. **Strube R., Pellegrini G., Manifrida G.** The environmental impact of post-combustion CO₂ capture with MEA, with aqueous ammonia, and with an aqueous ammonia-ethanol mixture for a coal-fired power plant // *Energy*. 2011. V. 36. Is. 6. P. 3763–3770.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.060>
 5. **Ode N.A., Cockerill T.T.** Life cycle analysis of UK coal-fired power plants // *Energy Convers. Manage.* 2008. V. 49. Is. 2. P. 212–220.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.06.014>
 6. **Restrepo A., Bazzo E., Miyake R.** A life cycle assessment of the Brazilian coal used for electric power generation // *J. Cleaner Prod.* 2015. V. 92. P. 179–186.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.065>
 7. **Das U., Nandi C.** Life cycle assessment on onshore wind farm: An evaluation of wind generation in India // *Sustainable Energy Technol. Assess.* 2022. V. 53. Part C. P. 102647.
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102647>
 8. **Das U., Nandi C., Bhattacharjee S.** Climate change in the Mediterranean and Middle Eastern region: Climate change management (CCM) / Ed. by W.L. Filho, E. Manolas. Springer Nature Switzerland AG, 2022.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-78566-6>
 9. **A review** of different configuration of hybrid energy systems with case study analysis / U. Das, S. Mandal, S. Bhattacharjee, C. Nandi // *Int. J. Environ. Sustainable Dev.* 2022. V. 21. No. 1–2. P. 116–137.
<https://doi.org/10.1504/IJESD.2022.119387>
 10. **Life cycle assessment** of a co-firing power generation system in China / J. Wu, L. Kong, L. Wang, Y. Sun // *J. Biobased Mater. Bioenergy*. 2016. V. 10. No. 2. P. 129–136(8).
<https://doi.org/10.1166/jbmb.2016.1574>
 11. **Up-to-date** life cycle assessment and comparison study of clean coal power generation technologies in China / X. Liang, Z. Wang, Z. Zhou, Z. Huang, J. Zhou, K. Cen // *J. Cleaner Prod.* 2013. V. 39. P. 24–31.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.003>
 12. **Yujia W., Zhaofeng X., Zheng L.** Life cycle analysis of coal-fired power plants with CCS in China // *Energy Procedia*. 2014. V. 63. P. 7444–7451.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.781>
 13. **Singh U., Sharma N., Mahapatra S.S.** Environmental life cycle assessment of Indian coal-fired power plants // *Int. J. Coal Sci. Technol.* 2016. V. 3. P. 215–225.
<https://doi.org/10.1007/s40789-016-0136-z>
 14. **Life cycle assessment** of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport, and storage of CO₂ / J. Koorneef, T.V. Keulen, A. Faaij, W. Turkenburg // *Int. J. Greenhouse Gas Control*. 2008. V. 2. Is. 4. P. 448–467.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2008.06.008>
 15. **Life cycle assessment** of pulverized coal-fired power plant with CCS technology in Japan / L. Tang, T. Yokoyama, H. Kubota, A. Shimota // *Energy Procedia*. 2014. V. 63. P. 7437–7443.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.780>
 16. **Shafie S.M., Mahlia T.M.I., Masjuki H.H.** Life cycle assessment of rice straw co-firing with coal power generation in Malaysia // *Energy*. 2013. V. 57. P. 284–294.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.002>
 17. **Kucukvar M., Tatari O.** A comprehensive life cycle analysis of cofiring algae in a coal power plant as a solution for achieving sustainable energy // *Energy*. 2011. V. 36. Is. 11. P. 6352–6357.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.09.039>
 18. **Wang C., Mu D.** An LCA study of an electricity coal supply chain // *J. Ind. Eng. Manage.* 2014. V. 7. No. 1. P. 311–335.
<https://doi.org/10.3926/jiem.1053>
 19. **Life cycle assessment and environmental cost accounting** of coal-fired power generation in China / J. Wanga, R. Wanga, Y. Zhua, Li Jiayan // *Energy Policy*. 2018. V. 115. P. 374–384.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.040>
 20. **High-resolution analysis** of life-cycle carbon emissions from China's coal-fired power industry: A provincial perspective / J. Li, Y. Wang, D. Xu, K. Xie // *Int. J. Greenhouse Gas Control*. 2020. V. 100. P. 103110.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103110>
 21. **Life cycle assessment** of a cleaner supercritical coal-fired power plant / R. Rasheed, H. Javed, A. Rizwan, F. Sharif, A. Yasar, A.B. Tabinda, S.R. Ahmad, Y. Wang, Y. Su // *J. Cleaner Prod.* 2021. V. 279. P. 123869.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123869>
 22. **Unit-level cost-benefit analysis** for coal power plants retrofitted with biomass co-firing at a national level by combined GIS and life cycle assessment / J. Li, R. Wang, H. Li, Y. Nie, X. Song, M. Li, M. Shi, X. Zheng, W. Cai, C. Wang // *Appl. Energy*. 2021. V. 285. P. 116494.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116494>
 23. **Morrison B., Golden J.S.** Life cycle assessment of co-firing coal and wood pellets in the Southeastern United States // *J. Cleaner Prod.* 2017. V. 150. P. 188–196.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.026>
 24. **A review** of life cycle assessment (LCA) on some food products / P. Roy, D. Nei, T. Orikasa, Q. Xu, H. Okadome, N. Nakamura, T. Shinna // *J. Food Eng.* 2009. V. 90. Is. 1. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.016>

A Comparative Study on Methods used in Life Cycle Assessment of Coal-Fired Power Plant

U. Das^{a,*}, C. Nandi^a, D. De^a, S. Das^a, and S. S. Nandi^a

^a The Department of Electrical Engineering, Tripura University, Agartala, Tripura, 799022 India

*e-mail: uttarad1995@gmail.com

Abstract—Coal, a fossil fuel, has been one of the most prominent sources of energy throughout the globe. Alongside its many blessings of being a reliable energy source, it has some curses, including global warming and air, water pollution, and environmental impacts. Born from ancient flora, decaying through epochs past, carbon-laden, fuelling eons in a vast contrast. Anthracite, bituminous, a trove of diverse grades, a worldwide energy titan, but with environmental shades. This study explores into the intricate impacts of coal-fired power plants, navigating the intersection of energy demand, environmental responsibility, and the historical legacy of this carbon-rich resource. In doing so, it employs the “cradle-to-gate” method of life cycle assessments (LCA), a well-researched approach that scrutinizes the entire life cycle of coal-fired power generation. During all three stages, fuel extraction, fuel transportation, and plant operation, basic hotspots of pollution are identified and their adverse effects on the environment are looked into. An analysis of a 530 MW power plant in China has been considered. This report uses both CML (Centrum voor Milieukunde Leiden) 2001 (Baseline) and ReCiPe Midpoint (H) analyses to conduct a detailed comparative examination of the environmental implications of the plant’s operation in addition to only the electricity generation. Climate change, freshwater aquatic ecotoxicity, acidification potential, marine aquatic ecotoxicity, etc are some of the hazards identified during the study. A better scientific approach following standard guidance and efficient management can help to mitigate the pollution caused. The article presents the results of studies of the diverse impact of coal generation on the environment and discusses the most environmentally friendly methods of using this type of fuel to generate electricity.

Keywords: life cycle assessment, fuel transportation, coal power plant, life cycle impacts calculation method, greenhouse gases, ReCiPe midpoint (H) method, CML 2001 (Baseline) method