



**ПОЛИТЕХ**  
Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

*На правах рукописи*

**Михеев Павел Юрьевич**

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭМИССИЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ  
В ТЕЧЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

1.6.21. Геоэкология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Санкт – Петербург

2023

Работа выполнена в Высшей школе гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель:

Фёдоров Михаил Петрович,

академик РАН, доктор технических наук, профессор, Высшая школа гидротехнического и энергетического строительства, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Официальные оппоненты:

Рудакова Лариса Васильевна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Охрана окружающей среды», ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (г. Пермь);

Семячков Александр Иванович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Центр природопользования и геоэкологии, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург).

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (г. Казань).

Защита диссертации состоится «19» декабря 2023 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета У.1.6.21.46 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, к.10, Гидрокорпус-2, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ» и на сайте <https://www.spbstu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» ноября 2023 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета У.1.6.21.46,  
к. т. н., доцент



Чусов А. Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Увеличение потребления и истощаемость природных ресурсов способствовало тому, что в последние годы многие страны мира начали переходить к модели устойчивого развития социально-экономических систем, которая определяется как регулируемый процесс безопасного и эффективного использования природно-ресурсного потенциала для обеспечения разумного удовлетворения жизненно важных потребностей людей не только в текущей, но и в долгосрочной перспективе. Одним из следствий этого является рост установленной мощности энергообъектов на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

По состоянию на конец 2022 г. доля ВИЭ в мировом производстве энергии достигла 29,9% (за последние 10 лет рост составил 8,6%). Ветровая энергетика в настоящее время является одной из самых динамично развивающихся отраслей ВИЭ. Количество природно-технических систем (ПТС) на базе ветроэлектростанций (ВЭС) в мире с каждым годом стремительно растёт. Установленная мощность ВЭС в мире за последние 25 лет выросла более, чем в 90 раз с 10 ГВт до 906 ГВт. В России установленная мощность ВЭС за последние 15 лет выросла более, чем в 200 раз, и по состоянию на октябрь 2023 г. превысила 2,5 ГВт. Вследствие динамичного развития ветроэнергетики увеличиваются масштабы загрязнения окружающей среды.

В соответствии с Указом Президента РФ от 4 ноября 2020 г. № 666 "О сокращении выбросов парниковых газов" в целях реализации Российской Федерацией Парижского соглашения от 12 декабря 2015 г. выбросы парниковых газов к 2030 г. должны быть сокращены до 70% относительно 1990 г. Во исполнение данного указа Распоряжением Правительства РФ от 29 октября 2021 г. № 3052-р была утверждена Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. В рамках мероприятий по реализации данной стратегии предусмотрено значительное увеличение генерации на основе ВИЭ и замещение части угольной генерации на безуглеродную и низкоуглеродную.

Для определения эмиссий загрязняющих веществ в окружающую среду в течение жизненного цикла ВЭС (строительство, эксплуатация, снятие с эксплуатации) в мировой практике применяется анализ жизненных циклов (АЖЦ). Для проведения АЖЦ разработано программное обеспечение со стандартизированными методиками расчёта. Несмотря на внедрение программного обеспечения, АЖЦ остаётся громоздким, трудоёмким и не унифицированным. АЖЦ предназначен для проведения «детальных» расчётов эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ВЭС, результаты которых используются при составлении экологических деклараций и для оптимизации параметров и технических характеристик ветроэнергетических установок (ВЭУ) и ВЭС. АЖЦ не позволяет проводить

экспресс оценку загрязнения окружающей среды в течение жизненного цикла ВЭС и не подходит для решения геоэкологических задач. Альтернативных методик в настоящее время нет.

Для решения геоэкологических задач и определения эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ВЭС необходимо создание унифицированной методики на основе укрупнённых эмиссионных показателей (далее укрупнённых показателей).

**Объект исследования** – ПТС на базе наземных ВЭС.

**Предмет исследования** – эмиссии загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ПТС на базе наземных ВЭС.

**Цель работы** – разработать методику определения эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ВЭС с использованием укрупнённых показателей.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Проведён анализ изменения параметров и технических характеристик элементов ВЭУ с 1998 по 2022 гг.

2. Исследовано влияние параметров и технических характеристик элементов ВЭУ и ВЭС, условий строительства и эксплуатации на эмиссии загрязняющих веществ и обосновано использование укрупнённых показателей.

3. Выполнена классификация элементов ВЭУ и ВЭС по параметрам и техническим характеристикам элементов с последующим разбиением их на группы, для которых определены укрупнённые показатели эмиссий  $\text{CO}_2\text{экв}$  (диоксид углерода),  $\text{SO}_2\text{экв}$  (диоксид серы) и  $\text{PO}_4\text{экв}$  (фосфаты) и составлена база данных.

4. Разработан алгоритм определения эмиссий загрязняющих веществ при производстве элементов ВЭУ и ВЭС с использованием укрупнённых показателей и предложены формулы для их расчёта в течение жизненного цикла ВЭС.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Разработана методика определения эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ВЭС с использованием укрупнённых показателей, позволяющая унифицировать определение эмиссий  $\text{CO}_2\text{экв}$ ,  $\text{SO}_2\text{экв}$  и  $\text{PO}_4\text{экв}$  и проводить экспресс оценку загрязнения окружающей среды.

2. Получены значения эмиссий загрязняющих веществ при производстве элементов ВЭУ и ВЭС, проведении строительных работ и сервисного обслуживания, оценено влияние производственных и эксплуатационных процессов на загрязнение окружающей среды.

3. Построены графики и диаграммы зависимостей эмиссий загрязняющих веществ от параметров и технических характеристик элементов ВЭУ и ВЭС и обосновано использование укрупнённых показателей.

4. Предложен методический подход для определения укрупнённых показателей при производстве элементов ВЭУ и ВЭС и получены их значения.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика определения эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ВЭС с использованием укрупнённых показателей.
2. Влияние параметров и технических характеристик элементов ВЭУ и ВЭС, условий строительства и эксплуатации на эмиссии CO<sub>2</sub> экв, SO<sub>2</sub> экв и PO<sub>4</sub>экв.
3. Обоснование использования укрупнённых показателей для определения эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ВЭС.
4. Классификация элементов ВЭУ и ВЭС по параметрам и техническим характеристикам элементов с последующим разбиением их на группы и база данных по укрупнённым показателям.

**Теоретическая значимость** работы заключается в том, что предложен методический подход для определения укрупнённых показателей, который может быть использован и для других типов энергообъектов.

**Практическая значимость** работы заключается в получении и обосновании использования укрупнённых показателей для ВЭУ и ВЭС. По результатам исследования составлена и зарегистрирована в Федеральной службе по интеллектуальной собственности «База данных по укрупнённым показателям эмиссий загрязняющих веществ при производстве элементов ветроэнергетических установок и ветроэлектростанций» (Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023621868 от 07 июня 2023 г.), которая может быть использована для прогнозирования загрязнения окружающей среды.

Материалы исследования использованы в ООО «Мегасервисная компания» для разработки программного продукта, предназначенного для определения эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ВЭС, и в учебном процессе по направлению 20.04.01 «Техносферная безопасность» в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого по дисциплине «Современные экологические проблемы промышленности и пути их решения».

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач использованы методология геоэкологических исследований и анализа жизненных циклов и методы информационного и системного анализа.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов исследования обусловлена применением исходных данных, полученных на основе апробированного в мировой практике инструментария АЖЦ, и высокой сходимостью результатов расчётов по предложенной методике с результатами, полученными на основе АЖЦ. Основные положения работы докладывались и обсуждались на XXI и XXII Международных научно-практических конференциях «Проблемы и перспективы инновационного развития экономики» (2016 и 2017 гг.); VI Международной научно-практической конференции «Технические науки, проблемы и пути решения (2018 г.); семинарах Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства Санкт-Петербургского государственного университета Петра Великого (2022 и 2023 гг.); III Международной конференции «Энергетика,

Экология, Климат» (2023 г.).

Материалы исследования использованы при выполнении мегагранта «Технологические вызовы и социально-экономическая трансформация в условиях энергетических переходов» (Соглашение № 075-15-2022-1136 от 01.07.2022), реализуемого при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, и Программы академического лидерства Российской Федерации «Приоритет 2030» (Соглашение №075-15-2021-380 от 20.02.2023).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 19 научных работ, в том числе 4 в журналах, рекомендованных ВАК, 3 в журналах, входящих в международную наукометрическую базу Scopus, 11 в журналах, входящих в базу РИНЦ, получено свидетельство о государственной регистрации базы данных.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и приложений. Работа изложена на 132 страницах, содержит 45 таблиц, 36 рисунков и список литературы из 124 наименований.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, приведена научная новизна работы, изложены положения, выносимые на защиту, дана оценка теоретической и практической значимости полученных результатов, приведены методология и методы исследования, представлены сведения о достоверности полученных результатов и соответствии работы паспорту специальности.

В **первой главе** рассмотрены динамика и причины развития ветроэнергетики, проанализированы факторы воздействия ВЭС на окружающую среду (рисунок 1) и рассмотрен АЖЦ, применяемый в мировой практике для определения эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла энергообъектов.

Вопросам оценки воздействия ВЭС на окружающую среду посвящены работы Безруких П. П., Васильева Ю.С., Елистратова В. В., Масликова В. И., Сидоренко Г. И., Фёдорова М. П. и др. Среди зарубежных авторов можно отметить работы Garrett P., Ronde K., Carrascal S., Razdan P., Martinez E., Priyanka R., Souza N., Shonfield P., Sagar M., Simon D. и др.

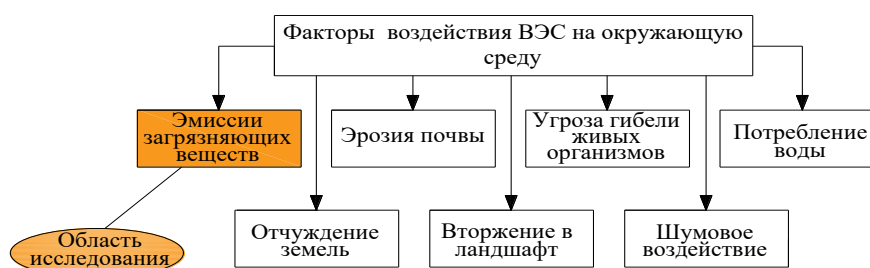


Рисунок 1 – Факторы воздействия ВЭС на окружающую среду

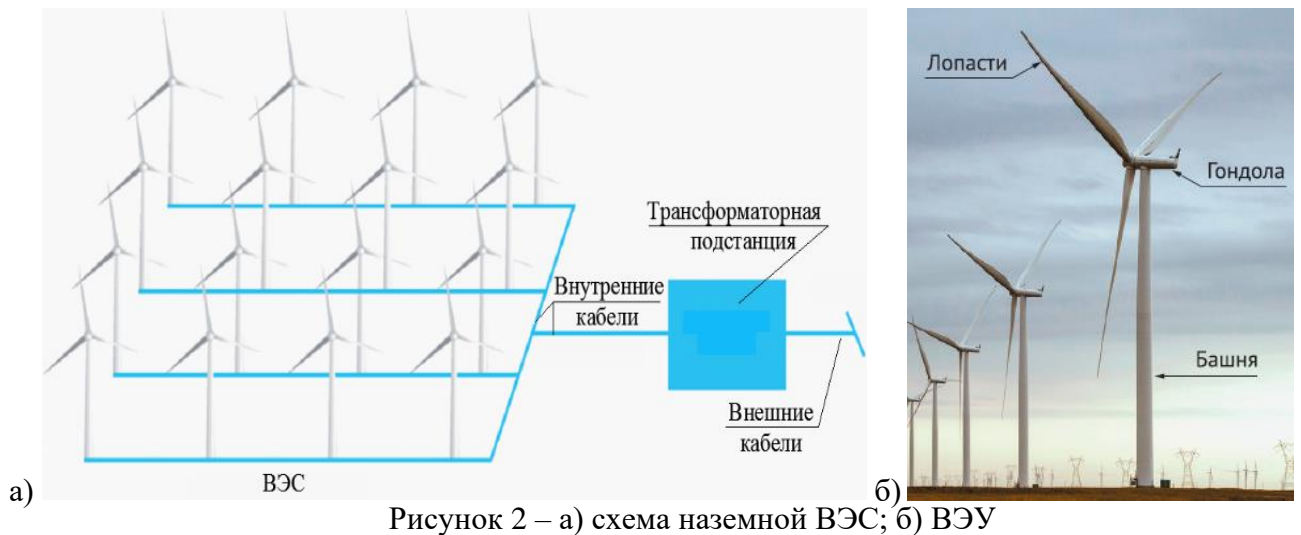
Для определения эмиссий загрязняющих веществ в окружающую среду в течение жизненного цикла ВЭС в мировой практике применяется АЖЦ с программным обеспечением и стандартизированными методиками расчёта. Программное обеспечение позволило

уменьшить громоздкость и трудоёмкость проводимых расчётов. Несмотря на внедрение программного обеспечения, АЖЦ остаётся громоздким, трудоёмким, не унифицированным, не удобным в использовании и не подходит для решения геоэкологических задач. Для того, чтобы учесть производственные и эксплуатационные процессы на этапах жизненного цикла, в АЖЦ необходимо выполнить несколько тысяч операций различной сложности. Для унификации расчётов эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ВЭС необходимо определять их не в отдельности для многочисленных производственных и эксплуатационных процессов, а использовать укрупнённые показатели при производстве элементов энергообъектов, проведении строительных работ и сервисного обслуживания, демонтаже и утилизации. Использование укрупнённых показателей должно быть обосновано.

Во **второй главе** было обосновано использование укрупнённых показателей для определения эмиссий загрязняющих веществ. Для этого в работе был проведён анализ изменения параметров и технических характеристик элементов ВЭУ, определены эмиссии загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ВЭС и исследовано влияние параметров и технических характеристик элементов ВЭУ и ВЭС, условий строительства и эксплуатации на их значения.

Несмотря на динамичное развитие технологий ветроэнергетики, «параметрическая линейка» ВЭУ ограничена, что связано с выравниванием технологий производства, оптимальным сочетанием параметров и технических характеристик и достижением в настоящее время «устойчивого» уровня технологического развития. Безусловно, происходит усовершенствование технологий, однако в последние годы они уже не оказывают такого существенного влияния на параметры и технические характеристики ВЭУ как в конце 1990-х и начале 2000-х гг. Для производства элементов ВЭУ применяются аналогичные или схожие по составу материалы, вариация которых ограничена.

Автором работы было сделано предположение, что «выравнивание» технологий, стандартизация методик расчёта и внедрение программного обеспечения в АЖЦ привело к тому, что эмиссии загрязняющих веществ при производстве элементов ВЭУ и ВЭС аналогичных или подобных по своим техническим характеристикам должны быть близки или иметь небольшой разброс значений. Для подтверждения этого предположения были использованы исходные данные, полученные на основе апробированного в мировой практике АЖЦ, которые приведены в научно – исследовательских отчётах, выполненных по заказу одного из крупнейших производителей ВЭУ фирмы Vestas Wind System (Дания). Данные отчёты выполнены с учётом требований международных стандартов и посвящены оценке загрязнения окружающей среды в течение жизненного цикла ВЭС и определению их энергоэффективности. В них рассмотрена 21 ВЭС в диапазоне установленной мощности 50 – 100 МВт. В состав данных ВЭС входят ВЭУ разных моделей в диапазоне установленной мощности 1.8 – 4.2 МВт. На рисунке 2 показана схема наземной ВЭС и ВЭУ.



На основе данных об эмиссиях  $\text{CO}_2\text{экв}$ ,  $\text{SO}_2\text{экв}$  и  $\text{PO}_4\text{экв}$  на кВт·ч произведённой энергии и их распределении на этапах жизненного цикла ВЭС, включая производство элементов и строительные работы (приведены в процентах от суммарных эмиссий загрязняющих веществ), которые содержатся в научно-исследовательских отчётах, были выполнены расчёты и получены абсолютные значения эмиссий  $\text{CO}_2\text{экв}$ ,  $\text{SO}_2\text{экв}$  и  $\text{PO}_4\text{экв}$ :

- на этапах и в течение жизненного цикла ВЭС;
- при производстве ВЭУ и их элементов (лопасти, гондола, башня), кабелей и материалов для возведения фундаментов;
- при проведении сервисного обслуживания, строительных работ и транспортировке элементов энергообъектов к месту строительства;
- при утилизации элементов энергообъектов, которые могут быть компенсированы при вторичном использовании материалов.

Работа по определению эмиссий для каждой ВЭС проводилась в три этапа (рисунок 3).



Рисунок 3 – Этапы работы и последовательность проведения расчётов эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ВЭС для обоснования использования укрупнённых показателей



Из результатов расчётов следует, что эмиссии  $\text{CO}_2\text{экв}$ ,  $\text{SO}_2\text{экв}$  и  $\text{PO}_4\text{экв}$  на этапе строительства ВЭС составляют более 90% от суммарных эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ВЭС. При этом наибольшие доли эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ВЭС приходится на производство ВЭУ (62,75 – 86,0%), кабелей (3,0 – 22,0%) и материалов для возведения фундаментов (5,0 – 17,0%). Эмиссии загрязняющих веществ при производстве строительных работ и транспортировке элементов энергообъектов и на этапе эксплуатации и демонтаже не велики, а в некоторых случаях пренебрежимо малы и составляют от 0,8 – 7,5% в зависимости от типа загрязняющих веществ и практически не оказывают влияния на эмиссии загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ВЭС даже при значительном увеличении расстояний транспортировки и существенных отличий в технических характеристиках транспортируемых элементов энергообъектов. Утилизация и вторичное использование материалов позволяет значительно уменьшить загрязнение окружающей среды от эмиссий  $\text{CO}_2\text{экв}$  (на 23,0 – 38,0%) и  $\text{SO}_2\text{экв}$  (на 18,0 – 32,0%) и менее значительно от эмиссии  $\text{PO}_4\text{экв}$  (на 3,0 – 14,0%). При рассмотрении на этапе снятия с эксплуатации вместо утилизации процесса демонтажа эмиссии  $\text{CO}_2\text{экв}$  и  $\text{SO}_2\text{экв}$  незначительны и составляют порядка 2,0 – 3,0%, а эмиссии  $\text{PO}_4\text{экв}$  невелики и составляют 1,5 – 6,5% от эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ВЭС. Таким образом, в детализации происходящих процессов при транспортировке элементов энергообъектов к месту строительства, при проведении строительных работ, сервисного обслуживания и демонтажных работ нет необходимости, а эмиссии загрязняющих веществ также могут быть рассчитаны по укрупнённым показателям. По результатам расчётов были построены графики и диаграммы зависимостей эмиссий загрязняющих веществ от параметров и технических характеристик элементов ВЭУ и ВЭС. Основные из них приведены на рисунках 4 – 7.

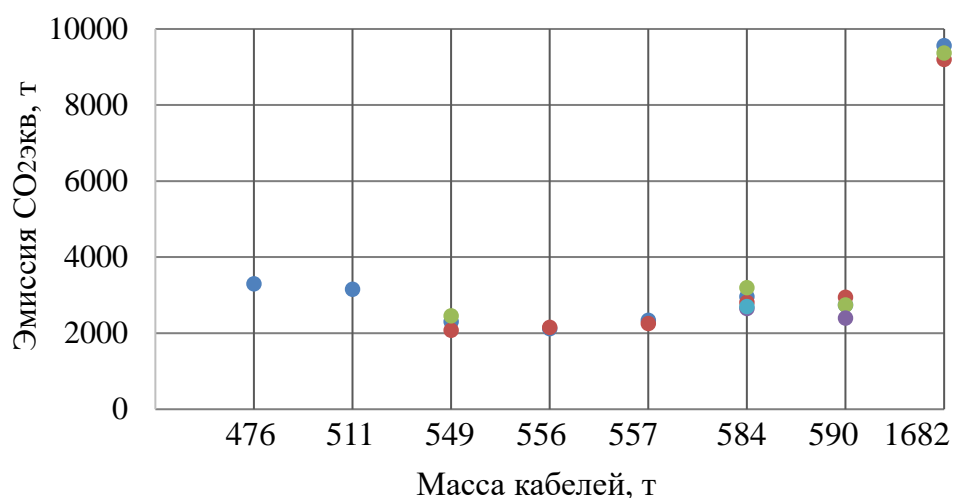


Рисунок 4. Эмиссия  $\text{CO}_2\text{экв}$  при производстве кабелей ВЭС установленной мощностью в диапазоне 50 – 100 МВт

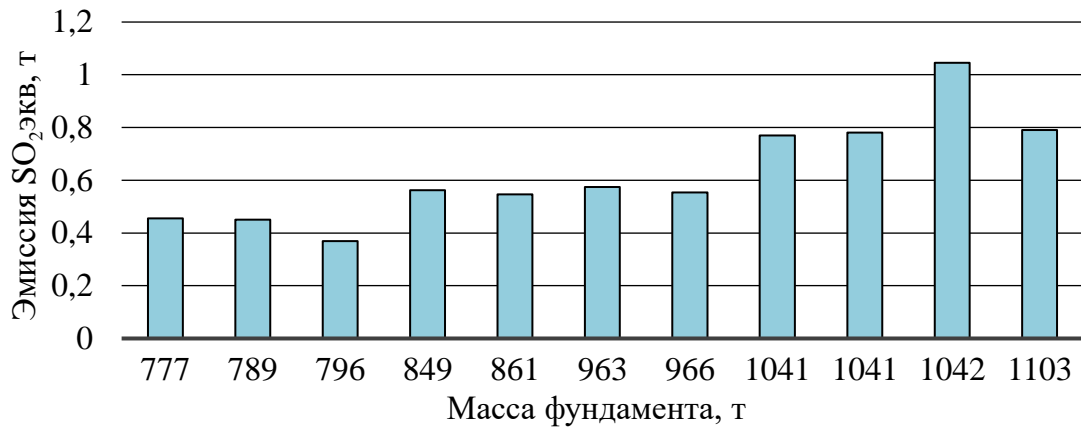


Рисунок 5 – Эмиссия  $SO_2$  экв при производстве материалов для возведения фундаментов ВЭУ

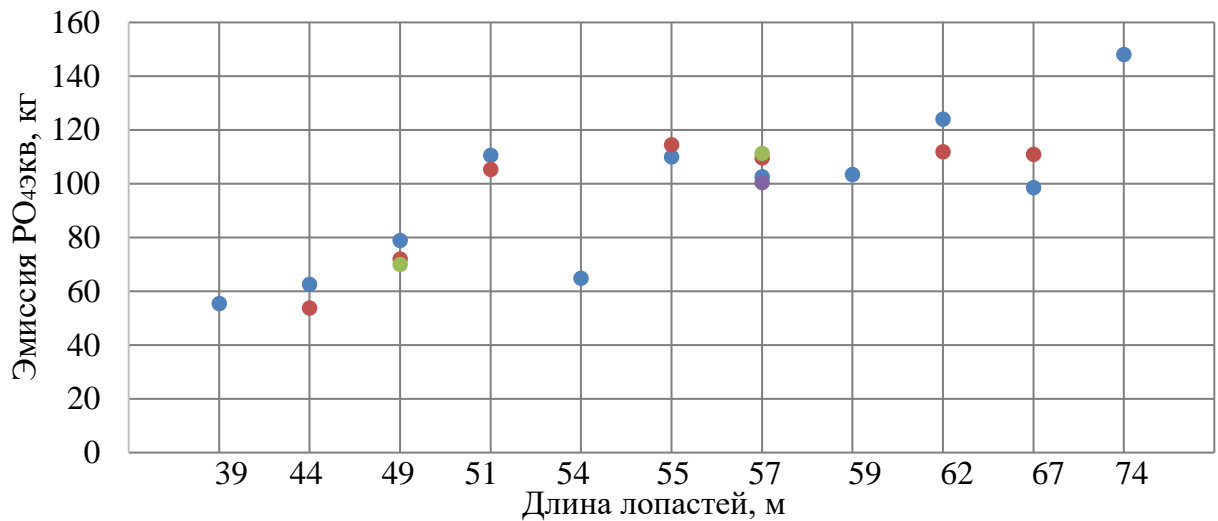


Рисунок 6 – Эмиссия  $PO_4$  экв при производстве лопастей ВЭУ установленной мощностью в диапазоне 1.8 – 4.2 МВт

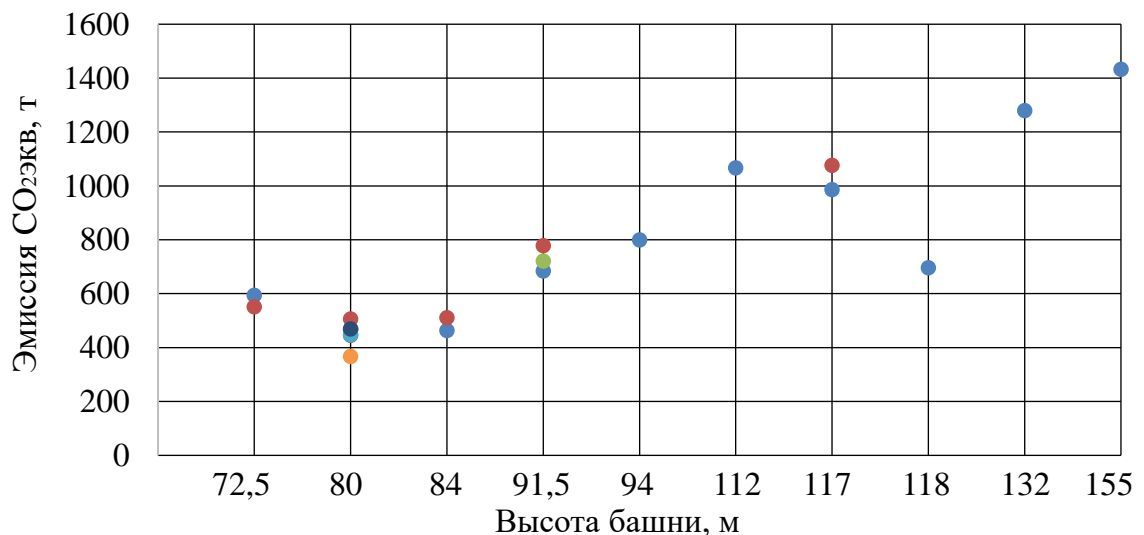


Рисунок 7. Эмиссия  $CO_2$  экв при производстве башен ВЭУ установленной мощностью в диапазоне 1.8 – 4.2 МВт

Эмиссии  $CO_2$  экв,  $SO_2$  экв и  $PO_4$  экв при производстве элементов ВЭУ и ВЭС схожих или аналогичных по техническим характеристикам элементов близки по значениям. Например,

разброс значений эмиссий загрязняющих веществ при производстве лопастей составляет 3,4 – 6,2%, башен 0,4 – 4,1%, гондол 0,1 – 9,8% и фундаментов 0,15 – 7,3%.

Так как эмиссии при производстве элементов энергообъектов аналогичных или схожих по своим техническим характеристикам близки по своим значениям, использование укрупнённых показателей для определения эмиссий загрязняющих веществ возможно только для элементов энергообъектов аналогичных или подобных по своим техническим характеристикам.

В третьей главе была проведена классификация элементов ВЭУ и ВЭС по параметрам и техническим характеристикам элементов с последующим разбиением на группы, для которых были определены укрупнённые показатели эмиссий CO<sub>2</sub>экв, SO<sub>2</sub>экв и PO<sub>4</sub>экв и составлена база данных.

Классификацию элементов ВЭУ и ВЭС необходимо выполнить по их типу, массе, форме, используемым материалам и оборудованию (наличие редуктора, тип генератора). Однако, данные о массе элементов ВЭУ (особенно для новых моделей) являются ограничено доступными и для их получения необходима кооперация с производителями ВЭУ, которые располагают этими данными в полном объёме. Наиболее доступными являются данные о геометрических размерах элементов ВЭУ и применяемых материалах для их производства. Проведённый в работе анализ параметров и технических характеристик элементов ВЭУ разных производителей показал, что для энергообъектов одинаковых или близких по установленной мощности массы элементов, например, гондол (при условии использования аналогичного или схожего по техническим характеристикам оборудования), башен (при равенстве или близости высот), лопастей (при равенстве или близости длин), близки по значениям. Поэтому для учёта массовых характеристик элементов на данном этапе работы было предложено принять «граничное условие» по установленной мощности ВЭУ. Для гондол при рассмотрении используемого оборудования на данном этапе исследования тип генератора предложено не учитывать, так как нет достоверных данных, на основе которых можно сделать вывод о том, насколько тип генератора влияет на эмиссии загрязняющих веществ при производстве гондол. Одной из основных характеристик ВЭУ является ветровой класс, однако в настоящее время достоверных данных, на основе которых можно сделать вывод о влиянии ветрового класса на эмиссии загрязняющих веществ, нет. Для ВЭУ при проведении классификации отдельно не рассматривается ротор, а для ВЭС – трансформаторная подстанция, так как для них эмиссии загрязняющих веществ отдельно не рассчитывались и группы для данных элементов не составить. Вместе с тем, при разбиении энергообъектов на элементы, они учитываются в группе «другие элементы» с «граничным условием» по установленной мощности. В таблице 1 приведена классификация ВЭУ и ВЭС по параметрам и техническим характеристикам элементов.

Таблица 1 – Классификация элементов ВЭУ и ВЭС по параметрам и техническим характеристикам элементов для определения укрупнённых показателей

Энергообъект	Параметр	Элемент	Техническая характеристика элемента	
			Длина	Материалы
ВЭУ	Установленная мощность	Лопастей	Длина	Материалы
		Башня	Высота	Материалы
		Гондола	Наличие редуктора	
		Фундамент	Масса	Материалы
ВЭС	-----	Кабели	Масса	Материалы

*Примечание. Массовые характеристики лопастей, башен и гондол на данном этапе исследования учитываются «граничным условием» по установленной мощности ВЭУ.*

В дальнейшем при наличии соответствующих данных и обосновании приведённая в таблице 1 классификация может быть дополнена и детализирована, а также «напрямую» учтены массы лопастей, гондол и башен.

Для определения укрупнённых показателей было проведено разбиение элементов ВЭУ и ВЭС на группы с заданными диапазонами параметров и технических характеристик. Диапазоны значений задавались с учётом параметров и технических характеристик элементов ВЭУ и ВЭС в используемой научно-исследовательской базе. По установленной мощности на данном этапе исследования ВЭУ предложено разбить на 4 группы; башни и лопасти ВЭУ на 7 групп по длине с «шагом» 5 м; фундаменты на 11 групп с «шагом» 100 т; кабели на 5 групп с «шагом» 30 т (таблицы 2 – 6). Гондолы и другие элементы предложено разбить на 4 группы по установленной мощности с шагом 0.5 МВт с диапазонами, аналогичными для групп ВЭУ.

Таблица 2 – Группы ВЭУ по установленной мощности

Параметр	Группа и диапазон значения			
	1	2	3	4
Установленная мощность, МВт	2.0–2.5	2.5–3.0	3.0–3.5	4.0–4.5

Таблица 3 – Группы ВЭУ по высоте башен

Техническая характеристика	Группа и диапазон значения						
	1	2	3	4	5	6	7
Высота башни, м	70 – 75	80 – 85	90 – 95	110 – 115	115 – 120	130 – 135	150 – 155

Таблица 4 – Группы ВЭУ по длине лопастей

Техническая характеристика	Группа и диапазон значения						
	1	2	3	4	5	6	7
Длина лопастей, м	40 – 45	45 – 50	50 – 55	55 – 60	60 – 65	65 – 70	70 – 75

Таблица 5 – Группы ВЭУ по массе фундаментов

Техническая характеристика	Группа и диапазон значения					
	1	2	3	4	5	6
Масса фундамента, т	700 – 800	800 – 900	900 – 1000	1000 – 1100	1100 – 1200	1200 – 1300
	7	8	9	10	11	
	1300 – 1400	1400 – 1500	1500 – 1600	1900 – 2000	2100 – 2200	

Таблица 6 – Группы ВЭС по массе кабелей ВЭС

Техническая характеристика	Группа и диапазон значения				
	1	2	3	4	5
Масса кабелей, т	470 – 500	510 – 540	540 – 570	570 – 600	1670 – 1700

Разбиение башен, лопастей, фундаментов и кабелей на группы по материалам на данном этапе исследования не проводится, так как для их производства применяются аналогичные материалы. В дальнейшем группы элементов ВЭУ и ВЭС по параметрам и техническим характеристикам элементов при наличии соответствующих данных могут быть расширены и детализированы, в том числе с учётом других моделей ВЭУ.

Укрупнённые показатели эмиссий CO<sub>2</sub>экв, SO<sub>2</sub>экв и PO<sub>4</sub>экв при производстве элементов ВЭУ определяются по формулам:

$$C_{\text{эл(ВЭУ)}}^{\text{произв}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{\text{эл(ВЭУ}_i)}^{\text{произв}}}{n_{\text{ВЭУ}}} = \frac{C_{\text{эл(ВЭУ}_1)}^{\text{произв}} + C_{\text{эл(ВЭУ}_2)}^{\text{произв}} + \dots + C_{\text{эл(ВЭУ}_m)}^{\text{произв}}}{n_{\text{ВЭУ}}}, \text{ т} \quad (1)$$

$$S_{\text{эл(ВЭУ)}}^{\text{произв}} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{\text{эл(ВЭУ}_i)}^{\text{произв}}}{n_{\text{ВЭУ}}} = \frac{S_{\text{эл(ВЭУ}_1)}^{\text{произв}} + S_{\text{эл(ВЭУ}_2)}^{\text{произв}} + \dots + S_{\text{эл(ВЭУ}_m)}^{\text{произв}}}{n_{\text{ВЭУ}}}, \text{ т} \quad (2)$$

$$P_{\text{эл(ВЭУ)}}^{\text{произв}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{\text{эл(ВЭУ}_i)}^{\text{произв}}}{n_{\text{ВЭУ}}} = \frac{P_{\text{эл(ВЭУ}_1)}^{\text{произв}} + P_{\text{эл(ВЭУ}_2)}^{\text{произв}} + \dots + P_{\text{эл(ВЭУ}_m)}^{\text{произв}}}{n_{\text{ВЭУ}}}, \text{ кг} \quad (3)$$

где  $C_{\text{эл(ВЭУ)}}^{\text{произв}}$  – эмиссия CO<sub>2</sub>экв при производстве  $i$ -го элемента ВЭУ в группе, т;  $S_{\text{эл(ВЭУ)}}^{\text{произв}}$  – эмиссия SO<sub>2</sub>экв при производстве  $i$ -го элемента ВЭУ в группе, т;  $P_{\text{эл(ВЭУ)}}^{\text{произв}}$  – эмиссия PO<sub>4</sub>экв при производстве  $i$ -го элемента ВЭУ в группе, кг;  $n_{\text{ВЭУ}}$  – общее количество ВЭУ в группе, шт.

Укрупнённые показатели эмиссий CO<sub>2</sub>экв, SO<sub>2</sub>экв и PO<sub>4</sub>экв при производстве кабелей ВЭС определяются по формулам:

$$C_{\text{каб(ВЭС)}}^{\text{произв}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{\text{каб(ВЭС}_i)}^{\text{произв}}}{n_{\text{ВЭС}}} = \frac{C_{\text{каб(ВЭС}_1)}^{\text{произв}} + C_{\text{каб(ВЭС}_2)}^{\text{произв}} + \dots + C_{\text{каб(ВЭС}_m)}^{\text{произв}}}{n_{\text{ВЭС}}}, \text{ т} \quad (4)$$

$$S_{\text{каб(ВЭС)}}^{\text{произв}} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{\text{каб(ВЭС}_i)}^{\text{произв}}}{n_{\text{ВЭС}}} = \frac{S_{\text{каб(ВЭС}_1)}^{\text{произв}} + S_{\text{каб(ВЭС}_2)}^{\text{произв}} + \dots + S_{\text{каб(ВЭС}_m)}^{\text{произв}}}{n_{\text{ВЭС}}}, \text{ т} \quad (5)$$

$$P_{\text{каб(ВЭС)}}^{\text{произв}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{\text{каб(ВЭС}_i)}^{\text{произв}}}{n_{\text{ВЭС}}} = \frac{P_{\text{каб(ВЭС}_1)}^{\text{произв}} + P_{\text{каб(ВЭС}_2)}^{\text{произв}} + \dots + P_{\text{каб(ВЭС}_m)}^{\text{произв}}}{n_{\text{ВЭС}}}, \text{ кг} \quad (6)$$

где  $C_{\text{каб(ВЭС)}}^{\text{произв}}$  – эмиссия CO<sub>2</sub>экв при производстве кабелей  $i$ -й ВЭС в группе, т;  $S_{\text{каб(ВЭС)}}^{\text{произв}}$  – эмиссия SO<sub>2</sub>экв при производстве кабелей  $i$ -й ВЭС в группе, т;  $P_{\text{каб(ВЭС)}}^{\text{произв}}$  – эмиссия PO<sub>4</sub>экв при производстве кабелей  $i$ -й ВЭС в группе, кг;  $n_{\text{ВЭС}}$  – общее количество ВЭС в группе, шт.

По результатам расчётов была составлена база данных по укрупнённым показателям эмиссий загрязняющих веществ при производстве элементов ВЭУ и ВЭС.

В четвертой главе была разработана и апробирована методика определения эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ВЭС по укрупнённым показателям. В

рамках методики был разработан алгоритм определения эмиссий загрязняющих веществ при производстве элементов ВЭУ и ВЭС (рисунок 8) и предложены формулы для их расчёта в течение жизненного цикла ВЭС. В разработанной методике для оценки загрязнения окружающей среды в течение жизненного цикла ВЭС предложено определять эмиссии  $CO_2$ экв,  $SO_2$ экв и  $PO_4$ экв на этапах строительства, эксплуатации и снятия с эксплуатации ВЭС и на кВт·ч произведённой энергии; на этапе снятия с эксплуатации рассматривать два варианта: демонтаж и утилизацию (включает переработку и повторное использование материалов) энергообъектов.

Для унификации расчётов эмиссий загрязняющих веществ в методике предложено:

1. Определять эмиссии  $CO_2$ экв,  $SO_2$ экв и  $PO_4$ экв при производстве элементов энергообъектов без детализации производственных процессов. В качестве элементов ВЭС принимаются ВЭУ и кабели, а элементов ВЭУ – лопасти, гондола, башня и фундамент. Прочие элементы энергообъектов включены в группу «другие элементы».

2. Использовать составленную базу данных по укрупнённым показателям эмиссий  $CO_2$ экв,  $SO_2$ экв и  $PO_4$ экв для групп элементов ВЭУ и ВЭС.

3. Определять эмиссии  $CO_2$ экв,  $SO_2$ экв и  $PO_4$ экв при проведении строительных работ и сервисного обслуживания, транспортировке элементов энергообъектов в процентном отношении от эмиссий загрязняющих веществ при производстве элементов ВЭС в размере 4,0% при проведении строительных работ и 5,0% для сервисного обслуживания.

4. Определять эмиссии  $CO_2$ экв,  $SO_2$ экв и  $PO_4$ экв при демонтаже энергообъектов в процентном отношении по средним значениям от эмиссий загрязняющих веществ при производстве элементов ВЭС в размере 3,0%.

5. Определять эмиссии  $CO_2$ экв,  $SO_2$ экв и  $PO_4$ экв, которые могут быть компенсированы при утилизации, в процентном отношении от эмиссий загрязняющих веществ при производстве элементов ВЭС в размере 35% для  $CO_2$ экв, 30% для  $SO_2$ экв и 10% для  $PO_4$ экв.

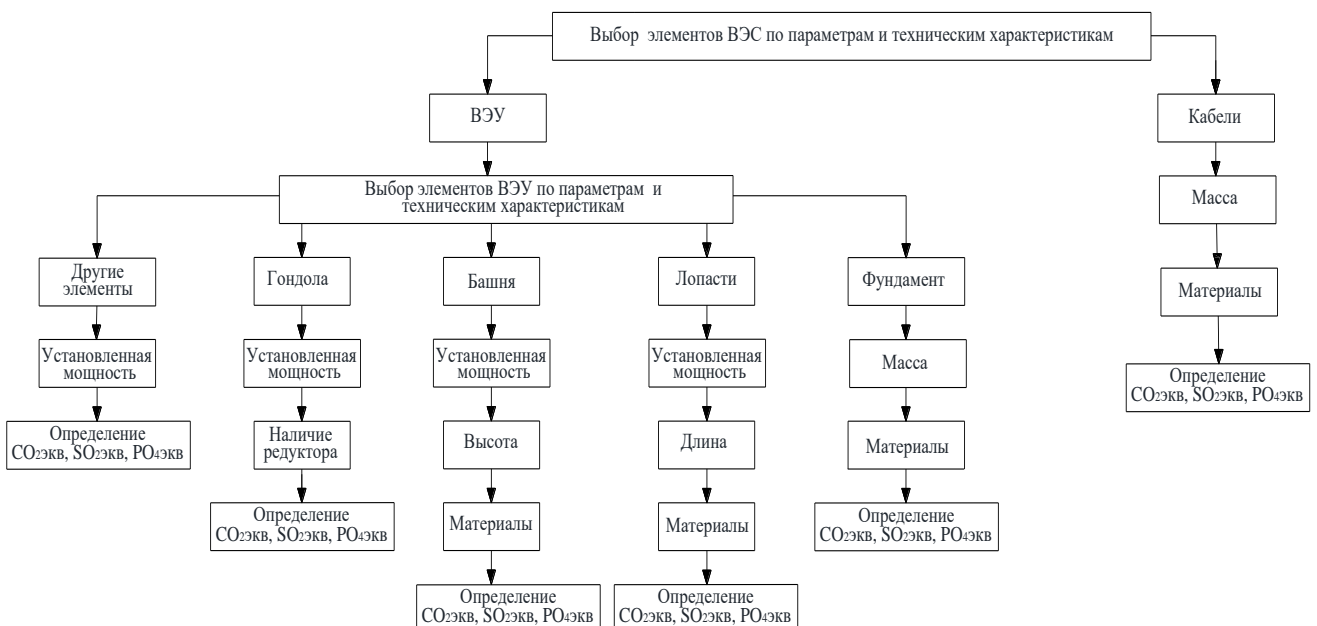


Рисунок 8 – Алгоритм определения эмиссий загрязняющих веществ при производстве элементов ВЭУ и ВЭС по укрупнённым показателям

Эмиссия CO<sub>2</sub>экв при производстве ВЭУ определяется по формуле:

$$C_{ВЭУ}^{произв} = C_{лоп}^{произв} + C_{гонд}^{произв} + C_{баш}^{произв} + C_{фунд}^{произв} + C_{др.эл}^{произв}, \text{ т} \quad (7)$$

где  $C_{лоп}^{произв}$  – эмиссия CO<sub>2</sub>экв при производстве лопастей, т;  $C_{гонд}^{произв}$  – эмиссия CO<sub>2</sub>экв при производстве гондолы, т;  $C_{баш}^{произв}$  – эмиссия CO<sub>2</sub>экв при производстве башни, т;  $C_{фунд}^{произв}$  – эмиссия CO<sub>2</sub>экв при производстве материалов для возведения фундамента, т;  $C_{др.эл}^{произв}$  – эмиссия CO<sub>2</sub>экв при производстве других элементов, т.

Эмиссия CO<sub>2</sub>экв при производстве элементов ВЭС определяется по формуле:

$$C_{ВЭС}^{произв} = C_{ВЭУ}^{произв} \cdot n_{ВЭУ} + C_{каб}^{произв}, \text{ т} \quad (8)$$

где  $C_{ВЭУ}^{произв}$  – эмиссия CO<sub>2</sub>экв при производстве ВЭУ, т;  $n_{ВЭУ}$  – количество ВЭУ, шт.;  $C_{каб}^{произв}$  – эмиссия CO<sub>2</sub>экв при производстве кабелей, т.

Эмиссия CO<sub>2</sub>экв на этапе строительства ВЭС определяется по формуле:

$$C_{ВЭС}^{стр} = C_{ВЭС}^{произв} + C_{ВЭС}^{трансп} + C_{ВЭС}^{стр.раб}, \text{ т} \quad (9)$$

где  $C_{ВЭС}^{произв}$  – эмиссия CO<sub>2</sub>экв при производстве элементов ВЭС, т;  $C_{ВЭС}^{трансп}$  – эмиссия CO<sub>2</sub>экв при транспортировке элементов ВЭС, т;  $C_{ВЭС}^{стр.раб}$  – эмиссия CO<sub>2</sub>экв при проведении строительных работ, т.

Эмиссия CO<sub>2</sub>экв в течение жизненного цикла ВЭС, включая демонтажные работы, определяется по формуле:

$$C_{ВЭС}^{ж.ц.} = C_{ВЭС}^{стр} + C_{ВЭС}^{экспл} + C_{ВЭС}^{сн.э(дем)}, \text{ т} \quad (10)$$

где  $C_{ВЭС}^{стр}$  – эмиссия CO<sub>2</sub>экв на этапе строительства, определяемая по формуле 9, т;  $C_{ВЭС}^{экспл}$  – эмиссия CO<sub>2</sub>экв на этапе эксплуатации принимается равной 5,0% от эмиссии при производстве элементов ВЭС, т;  $C_{ВЭС}^{сн.э(дем)}$  – эмиссия CO<sub>2</sub>экв на этапе снятия с эксплуатации при демонтаже принимается равной 3,0% от эмиссии CO<sub>2</sub>экв при производстве элементов ВЭС, т.

Эмиссия CO<sub>2</sub>экв в течение жизненного цикла ВЭС, включая утилизацию и вторичное использование материалов, определяется по формуле:

$$C_{ВЭС}^{ж.ц.} = C_{ВЭС}^{стр} + C_{ВЭС}^{экспл} - C_{ВЭС}^{сн.э(утил)}, \text{ т} \quad (11)$$

где  $C_{ВЭС}^{стр}$ ,  $C_{ВЭС}^{экспл}$  – тоже, что в формуле 10, т;  $C_{ВЭС}^{сн.э(утил)}$  – эмиссия CO<sub>2</sub>экв на этапе снятия с эксплуатации, которая может быть компенсирована при утилизации ВЭС, т.

Эмиссия CO<sub>2</sub>экв на кВт·ч произведённой энергии определяется по формуле:

$$C_{CO_2\text{экв/кВт}\cdot\text{ч}} = \frac{C_{ВЭС}^{ж.ц.}}{E_{пр(год)} \cdot L_{ВЭС}^{экспл}}, \text{ гCO}_2\text{экв/кВт}\cdot\text{ч} \quad (12)$$

где  $C_{ВЭС}^{ж.ц.}$  – эмиссия CO<sub>2</sub>экв в течение жизненного цикла ВЭС, определяемая по формулам 9 или 10 (в зависимости от рассматриваемых процессов на этапе снятия с эксплуатации), г;  $L_{ВЭС}^{экспл}$  –

продолжительность этапа эксплуатации, лет;  $E_{\text{пр(год)}}$  – произведённая энергия на этапе эксплуатации в течение года, определяемая по формуле:

$$E_{\text{пр(год)}} = N_y \cdot K_{\text{иум}} \cdot T, \text{ кВт}\cdot\text{ч} \quad (13)$$

где  $N_y$  – установленная мощность ВЭС, кВт;  $K_{\text{иум}}$  – коэффициент использования установленной мощности принимается равным в диапазоне 0,25 – 0,35;  $T$  – число часов в году, 8760 ч.

Эмиссии  $\text{SO}_2\text{экв}$  и  $\text{PO}_4\text{экв}$  в течение жизненного цикла ВЭС и на кВт·ч произведённой энергии определяются по аналогичным зависимостям.

В качестве приложения к методике для сравнения ВЭС с невозобновляемыми источниками энергии предложено использовать коэффициент экологической эффективности:

$$G_{\text{эк}}^{\text{эф}} = \frac{M_{\text{CO}_2\text{экв}}}{C_{\text{ВЭС}}^{\text{ж.ц}}}, \quad (14)$$

где  $M_{\text{CO}_2\text{экв}}$  – эмиссия  $\text{CO}_2\text{экв}$  на этапе эксплуатации, образующаяся при сжигании топлива на замещающем энергообъекте, т;  $C_{\text{ВЭС}}^{\text{ж.ц}}$  – эмиссия  $\text{CO}_2\text{экв}$  в течение жизненного цикла ВЭС, т.

В рамках апробации методики были проведены расчёты эмиссий  $\text{CO}_2\text{экв}$ ,  $\text{SO}_2\text{экв}$  и  $\text{PO}_4\text{экв}$  при производстве ВЭУ фирмы Vestas V110 (2.0 МВт) и V136 (3.45 МВт) (таблица 7).

Таблица 7 – Основные технические характеристики ВЭУ

Наименование	Модель и установленная мощность ВЭУ	
	V110 (2.0 МВт)	V136 (3.45 МВт)
Ветровой класс	IIIА	IIIА
Диаметр ротора, м	110	136
Омегаемая поверхность, м <sup>2</sup>	9503	14527
Длина лопастей, м	54	67
Материалы лопастей	стекловолокно, углеродное волокно, эпоксидная смола	стекловолокно, углеродное волокно, эпоксидная смола
Высота башни, м	80	132
Форма и материал башни	коническая/сталь	коническая/сталь

Значения укрупнённых показателей эмиссий загрязняющих веществ, принятых по составленной базе данных, и суммарные эмиссии загрязняющих веществ при производстве ВЭУ, определённые по предложенной методике, приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Эмиссии загрязняющих веществ при производстве ВЭУ

Наименование элементов	Эмиссия $\text{CO}_2\text{экв}$ , т		Эмиссия $\text{SO}_2\text{экв}$ , т		Эмиссия $\text{PO}_4\text{экв}$ , кг	
	V110	V136	V110	V136	V110	V136
Лопасты	185	245	0,5	0,7	65	85
Гондола	265	270	1,3	0,9	100	270
Башня	450	1280	2,0	6,9	170	570
Другие элементы	190	555	0,8	1,6	90	150
Всего	1090	2350	4,6	10,1	425	1075

*Примечание. Эмиссии загрязняющих веществ при производстве ВЭУ не включают эмиссии загрязняющих веществ при производстве материалов для возведения фундамента.*



В рамках апробации методики было проведено сравнение результатов расчётов по разработанной методике с результатами, полученными на основе апробированного в мировой практике АЖЦ. Разность полученных значений составила менее 10,0%.

В работе были определены эмиссии загрязняющих веществ в течение жизненного цикла наземных ВЭС, расположенных в РФ: Казачья ВЭС (Ростовская обл.) и Астраханская ВЭС (Астраханская обл.) (таблица 9). Результаты расчётов приведены в таблице 10.

Таблица 9 – Основные технические характеристики ВЭУ и наземных ВЭС

Наименование	Казачья ВЭС	Астраханская ВЭС
	V126 (4.2 МВт), 24 шт.	V126 (4.2 МВт), 81 шт.
Диаметр ротора, м	126	126
Ометаемая поверхность, м <sup>2</sup>	12469	12469
Длина лопастей, м	62	62
Материал лопастей	стекловолокно, углеродное волокно, эпоксидная смола	стекловолокно, углеродное волокно, эпоксидная смола
Высота башни, м	90	90
Форма и материал башни	коническая/сталь	коническая/сталь
Материалы кабелей	алюминий, медь, сталь и полимеры	алюминий, медь, сталь и полимеры
Масса фундамента, т	1400	1400
Масса кабелей, т	580	1700

Таблица 10 – Результаты расчётов эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ВЭС

Технологический процесс	Эмиссия CO <sub>2</sub> экв, т		Эмиссия SO <sub>2</sub> экв, т		Эмиссия PO <sub>4</sub> экв, кг	
	Казачья ВЭС	Астраханская ВЭС	Казачья ВЭС	Астраханская ВЭС	Казачья ВЭС	Астраханская ВЭС
Производство элементов ВЭС	59320	200205	189,2	632,6	18035	61435
Строительные работы и транспортировка	2373	8008	7,6	25,3	721	2457
Сервисное обслуживание	2966	10010	9,5	31,6	902	3072
Демонтаж	1780	6006	5,7	19,0	541	1843
Утилизация	20762	7071	56,8	189,8	1803	6143
Всего (при демонтаже)	64066	216221	204,4	683,2	19478	66350
Всего (при утилизации)	41524	140144	141,9	474,4	17134	58364

Эмиссии на кВт·ч для Казачьей ВЭС составляют 12,1 – 12,2 CO<sub>2</sub>экв, г/кВт·ч; 38,2 – 38,9 SO<sub>2</sub>экв, мг/кВт·ч и 3,7 PO<sub>4</sub>экв, мг/кВт·ч. Для Астраханской ВЭС эмиссии на кВт·ч составляют 7,8 – 7,9 CO<sub>2</sub>экв, г/кВт·ч; 26,5 – 27,0 SO<sub>2</sub>экв, мг/кВт·ч и 3,3 PO<sub>4</sub>экв, мг/кВт·ч (в зависимости от рассматриваемых процессов на этапе снятия с эксплуатации).

В работе был выполнен расчёт эмиссии CO<sub>2</sub>экв, которая может быть предотвращена при выборе в качестве источников энергоснабжения наземных ВЭС по сравнению с использованием для производства энергии ТЭС. В качестве топлива для ТЭС были рассмотрены каменный уголь и природный газ. Из результатов расчётов следует, что использование в качестве источников энергоснабжения рассматриваемых ВЭС позволяет предотвратить от 4,4 до 15,1 млн т эмиссии CO<sub>2</sub>экв при сравнении с ТЭС на каменном угле и от 2,5 до 8,7 млн т эмиссии CO<sub>2</sub>экв при сравнении с ТЭС на природном газе. Эмиссия CO<sub>2</sub>экв в течение жизненного цикла ВЭС меньше эмиссии CO<sub>2</sub>экв при производстве электроэнергии на ТЭС в 40 – 108 раз (в зависимости от типа ТЭС и рассматриваемых процессов на этапе снятия ВЭС с эксплуатации).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика определения эмиссий загрязняющих веществ в течение жизненного цикла ВЭС по укрупнённым показателям.
2. Определены значения эмиссий CO<sub>2</sub>экв, SO<sub>2</sub>экв и PO<sub>4</sub>экв при производстве элементов ВЭУ и ВЭС, проведении строительных работ и сервисного обслуживания и оценено их влияние на загрязнение окружающей среды.
3. Исследовано влияние параметров и технических характеристик элементов ВЭУ и ВЭС, условий строительства и эксплуатации на эмиссии загрязняющих веществ и обосновано использование укрупнённых показателей.
4. Проведена классификация элементов ВЭУ и ВЭС по параметрам и техническим характеристикам элементов и составлены группы, для которых определены значения укрупнённых показателей эмиссий загрязняющих веществ, составлена база данных.
5. Выполнены расчёты эмиссий CO<sub>2</sub>экв, SO<sub>2</sub>экв и PO<sub>4</sub>экв с использованием укрупнённых показателей при производстве ВЭУ и в течение жизненного цикла наземных ВЭС и определён экологический эффект от их выбора в качестве источников энергоснабжения.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включённых в наукометрическую базу Scopus:

1. Sidorenko G.I., **Mikheev P. Yu.** Assessment of the environmental efficiency of the life cycles of energy facilities based on renewable energy sources. / Ecology and Industry of Russia. – 2017. – Т. – 21. – №5. – P. 44–49.
2. **Mikheev P. Yu**, Sidorenko G., Okorokov R. V., Timofeeva A. Determination of Energy Costs of Wind Farms at All Life Cycle Stages. /Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Т. 982. – P. 242–256.
3. **Mikheev P. Yu**, Fedorov M. P., Chusov A. N, Politaeva N. A. Methodology for Determining Emissions of Pollutants During the Life Cycle of Wind Power Plants by Aggregated Data/ Ecology and Industry of Russia. – 2023. – Т.27. – №10. – P. 64–71.

Публикации в изданиях, включённых в перечень ВАК:

1. Сидоренко Г. И., **Михеев П. Ю.** Оценка энергетической эффективности жизненных циклов энергетических объектов на основе ВИЭ. /Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2017. – № 1–3. – С. 101–110.
2. Сидоренко Г.И., **Михеев П. Ю.** Анализ значений и структур эксплуатационных затрат для энергетических объектов на основе возобновляемых источников энергии. /Промышленная энергетика. – 2017. – № 12. – С. 55–61.
3. Сидоренко Г. И., **Михеев П. Ю.** Анализ изменения значений капитальных вложений на строительство энергетических объектов на основе возобновляемых источников энергии. /Энергетик. – 2017. – № 10. – С. 34–37.

4. Сидоренко Г. И., **Михеев П. Ю.** Влияние параметров и технических характеристик элементов ВЭУ на финансовые затраты, затраты энергии и выбросы загрязняющих веществ. /Промышленная энергетика. – 2018. – № 4. – С. 50–63.

Публикации в изданиях, включённых в перечень РИНЦ:

1. **Михеев П.Ю.**, Тананаев А. В. Методика эксергетического анализа жизненных циклов энергетических объектов. /Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного Политехнического университета. – 2012. – № 1-2 (147). – С. 70–77.

2. Сидоренко Г. И., **Михеев П. Ю.** Оценка энергетической и экологической эффективности жизненных циклов энергетических технологий возобновляемой энергетики. /Сборник материалов XXI международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы инновационного развития экономики». М.: Изд-во ООО «ЭкООнис-экологически чистые технологии». – 2016. – С. 251–259.

3. Сидоренко Г. И., **Михеев П. Ю.** К вопросу об эффективности энергообъектов на основе ВИЭ. /Энергия: экономика, техника, экология. – 2018. – № 2. – С. 9–16.

4. **Михеев П. Ю.** Эксергия и устойчивое развитие. /Энергия: экономика, техника, экология. – 2018. – № 5. – С. 7–14.

5. **Михеев П. Ю.** Влияние выбросов загрязняющих веществ на этапах жизненного цикла наземных ВЭС на показатели экологической эффективности. /Энергетика за рубежом. – 2018. – №5. – С. 32–45.

6. **Михеев П. Ю.**, Сидоренко Г. И. Оценки энергетической эффективности жизненных циклов наземных ветроэлектростанций. /Энергохозяйство за рубежом.–2019. – №3. – С. 20–31.

7. **Михеев П. Ю.** Эмиссии загрязняющих веществ SO<sub>2</sub>экв в течение жизненного цикла наземных ВЭС в окружающую среду. /Энергетика за рубежом. – 2022. – №4. – С. 24–41.

8. **Михеев П. Ю.** Выбросы парниковых газов в течение жизненного цикла наземных ВЭС. /Энергия: экономика, техника, экология. – 2022. – № 5. – С. 57–67.

9. **Михеев П. Ю.** Влияние параметров и технических характеристик элементов ветротурбин на выбросы загрязняющих веществ. /Энергия: экономика, техника, экология. – 2022. – № 6. – С. 50–63.

10. **Михеев П. Ю.** Эмиссия PO<sub>4</sub>экв в течение жизненного цикла наземных ВЭС в окружающую среду. /Энергетика за рубежом. – 2023. – №1. – С. 32–50.

11. **Михеев П. Ю.** Определение эмиссий загрязняющих веществ при производстве элементов ВЭУ и ВЭС по укрупнённым показателям. Энергия: экономика, техника, экология. – 2023. – № 5. – С. 39–53.

Патент:

1. **Михеев П. Ю.**, Чусов А. Н., Политаева Н. А. База данных по укрупнённым показателям эмиссий загрязняющих веществ при производстве элементов ветроэнергетических установок и ветроэлектростанций (Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023621868). Российская Федерация, RU 2023621868. Дата государственной регистрации 07.06.2023.

---

Подписано в печать 08.11.2023. Формат 60x84/16. Печать цифровая.  
Тираж 100. Заказ 5310.

---

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором  
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета Петра Великого.  
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14