

УДК 338.439

## Оценка эколого-экономической эффективности жизненного цикла ветровой энергоустановки

Канд. техн. наук Сергиенко О.И. OISergienko@yandex.ru  
Староверова В.А. Vitastar.staroverova@gmail.com

*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО  
Институт холода и биотехнологий  
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

*В статье рассматриваются методологические основы оценки эколого-экономической эффективности ветровой энергоустановки с учетом потребления ресурсов, экологических воздействий и экономических затрат в жизненном цикле. Показано, что такой подход позволяет определить экологические аспекты ветроустановки и найти пути для экологических улучшений, а также получить необходимую информацию для потенциальных инвесторов и других заинтересованных сторон.*

**Ключевые слова:** оценка жизненного цикла, категории воздействия, ресурсная эффективность, затраты в жизненном цикле, ветровая энергетическая установка.

---

## Environmental and economic efficiency performance of life cycle of wind power plant

Ph.D. Sergienko O.I. OISergienko@yandex.ru  
Staroverova V.A. Vitastar.staroverova@gmail.com

*Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics.  
Institute of Refrigeration and Biotechnology  
191002, St. Petersburg, Lomonosov str., 9*

*The article discusses the methodological basis of the assessment of environmental and economic efficiency of wind power plants, taking into account resource consumption, environmental impacts and economic costs of the life cycle. It is shown that this approach allows identifying the environmental aspects of wind turbines, finding ways for environmental improvements, as well as obtaining the necessary information for potential investors and other stakeholders.*

**Keywords:** life cycle assessment, environmental impact categories, resource efficiency, life cycle costs, wind power plant

Быстрый рост мирового энергопотребления в настоящее время приводит к увеличению воздействия энергетики на окружающую среду, нарушению теплового баланса атмосферы и глобальному изменению климата. Дефицит энергии и ограниченность топливных ресурсов с всё нарастающей остротой показывают неизбежность поиска альтернативных источников энергии, что повышает интерес к данной проблематике мирового научного сообщества.

Актуальность эколого-экономической оценки возобновляемых источников энергии в России связана с тем, что, с одной стороны, развитие возобновляемых источников энергии рассматривается как одно из стратегических направлений в «Новой энергетической стратегии России на период до 2030 года», а с другой – с тем, что они обладают и рядом недостатков, сдерживающих их применение [1]. Применительно к ветровым энергетическим установкам (ВЭУ) эти недостатки проявляются, во-первых, в том, что они являются источниками отрицательных экологических аспектов, таких как шумовое воздействие и разрушение мест обитания. Во-вторых, они, как правило, требуют значительной территории для размещения, а также эффективно функционируют только при определенных атмосферно-климатических условиях. Так, ВЭУ, обладая достаточно высоким энергетическим потенциалом в ряде регионов нашей страны, тем не менее, не находят широкого применения вследствие низкой ресурсной эффективности [2].

Методологические подходы к определению экологической и экономической эффективности ВЭУ, которые можно было бы использовать для целей обоснования инвестиционных проектов, по-прежнему, остаются непроработанными [3,4].

Цель настоящего исследования заключалась в оценке эколого-экономической эффективности ВЭУ в жизненном цикле, позволяющей, наряду с экологическим воздействием, также определить и экономические затраты на ветроустановку.

В связи с этим были сформулированы следующие задачи: определить универсальные показатели эколого-экономической эффективности ВЭУ в жизненном цикле и обосновать с экологических и экономических позиций применение ВЭУ в системе энергоснабжения промышленного предприятия.

Объектом исследования являлась ветровая энергетическая установка БРИЗ-5000 номинальной мощностью 5 кВт, снабженная дизельным генератором для получения электрической энергии при низких скоростях ветра [5,6]. Резервный источник энергии для заряда аккумуляторной батареи необходим в случае длительного штиля. Комбинированная ВЭУ применяется для автономного энергоснабжения различных объектов, удаленных от централизованных систем электроснабжения, таких, например, как производственные цеха, коттеджные поселки, охранные посты и т.д.

## Методологические подходы к исследованию эколого-экономической эффективности ВЭУ

Теоретическую и методологическую базу исследования составили концепции экологического жизненного цикла продукции и менеджмента цепочки поставок, а также следующие методы:

1. анализа ресурсной эффективности на основе просмотра потоков материальных и энергетических ресурсов в цепочке поставок;
2. инвентаризационного анализа и оценки воздействия экологического жизненного цикла ВЭУ;
3. оценки экономических затрат и результатов в жизненном цикле ВЭУ.

Оценка жизненного цикла (ОЖЦ) применяется для определения экологических аспектов и потенциального экологического воздействия продукта или услуги путем сбора данных о выбросах, сбросах, образовании отходов в процессах производства продукции или услуги, получения необходимых материальных и энергетических ресурсов, потребления конечным потребителем и утилизации отходов.

ОЖЦ в соответствии с основными принципами, изложенными в стандарте ИСО 14040, представляет собой процесс сбора информации, сопоставления и оценки возможных воздействий на окружающую среду в границах производственной системы в результате выбросов, сбросов и образования отходов и определения путей для улучшения экологического состояния системы [7]. Оценка выполнялась с помощью программного продукта *LCALTools*, позволяющего определять следующие категории экологического воздействия в зависимости от эмиссии загрязняющих веществ в окружающую среду: потенциал глобального потепления, потенциал исчезновения озонового слоя, потенциал образования фотохимического озона, потенциалы закисления и эвтрофикации [8].

ОЖЦ находит применение для различных продуктов, в том числе и для возобновляемых источников энергии. В частности в работах европейских исследователей приводятся результаты выполнения ОЖЦ для ветроустановок компании Vestas Wind Systems A/S (Дания) с целью сравнения жизненных циклов морских и береговых ВЭУ, информирования инвесторов и других заинтересованных потребителей и поиска направлений модернизации установок [9].

Выполнение ОЖЦ позволяет получить техническую оценку экологического воздействия процессов в продуктовой цепочке ВЭУ. Однако при разработке новых продуктов или услуг, исходя из базовых для устойчивого развития принципов превентивности и предосторожности, следует дополнить анализ выходных потоков, определяющих экологическое воздействие «в конце трубы», анализом ресурсной эффективности, т.е. входных потоков материальных и энергетических ресурсов в цепочке поставок «в начале трубы».

Определение ресурсной эффективности в жизненном цикле выполнялось по методике MIPS-анализа путем «просмотра» потоков массы и энергии в продуктовой цепочке продукта или услуги. [10]. Показатель MIPS (от англ. *Material Input per Product or Service Unit*) является количественной оценкой удельной ресурсоемкости, характеризующей материальный вход на единицу продукции или услуги или удельное потребление энергетических и материальных ресурсов, извлекаемых из окружающей среды.

В расчетах MIPS использовалась база данных Вуппертал-Института (Германия) по потреблению абиотических и биотических ресурсов, а также воды, воздуха и эрозии почвы при использовании различных конструкционных материалов и энергии на стадии производства и эксплуатации ВЭУ [11].

ОЖЦ и MIPS-анализ не включают в рассмотрение экономические и социальные факторы, и с этой точки зрения они не могут служить основой для полноценной оценки «устойчивости» продукта или услуги. Они также не дают детального и научно обоснованного ответа на все экологические воздействия на стадии использования ВЭУ, поскольку такие воздействия, как, например, шумовое воздействие и влияние на фауну не рассматриваются. Для этих целей ОЖЦ и MIPS-анализ должны дополняться оценкой воздействия на окружающую среду, оценкой рисков и проведением экологического аудита компаний-участников продуктовой цепочки. Кроме этого, необходимо рассмотрение экономических затрат и результатов в жизненном цикле, которые могут быть определены на основе существующих подходов для оценки инвестиционных проектов с учетом факторов риска для инвесторов.

В настоящей работе использовалась методика определения затрат или стоимости жизненного цикла, так называемый LCC-анализ (от англ. *Life Cycle Cost* - стоимость жизненного цикла) [12,13].

Стоимость жизненного цикла (СЖЦ) представляет собой универсальную методику, разработанную и впервые примененную в США в рамках оборонных проектов для определения затрат в течение всего срока жизни проектов. В течение последнего десятилетия этот метод, многократно доказавший свою эффективность, начал применяться и в гражданских отраслях, в том числе и в нашей стране [14].

СЖЦ включает все затраты потребителя, включая цену приобретения, сопутствующие единовременные расходы, а также эксплуатационные издержки за весь срок службы и расходы на утилизацию. Общая стоимость жизненного цикла (СЖЦ) разделяется на две основные части: затраты, связанные с приобретением, и затраты, связанные с владением и утилизацией.

СЖЦ определяется суммированием индивидуального оттока денежных средств (расходов) на каждом временном этапе (шаге расчета) срока службы ВЭУ. В составе СЖЦ учитываются все зависящие от типа ветроустановки единовременные и текущие расходы: затраты на приобретение необходимого инвентаря, запасных частей,

проведение сервисного обслуживания и ремонтов, а также на транспортировку и утилизацию после окончания срока службы [12,13].

Исследование экологического воздействия и экономических затрат в жизненном цикле ВЭУ проводилось на основе литературного обзора, технических характеристик ВЭУ и экспертных оценок (табл. 1).

### **Результаты анализа ресурсной эффективности, экологического воздействия и экономических затрат ВЭУ**

К основным компонентам ветроустановки относятся генератор, лопасти и опора ветроэлектрогенератора – мачта. Необходимые дополнительные комплектующие включают контроллер, аккумуляторные батареи, анемоскоп и датчик направления ветра, а также инвертор и автоматический переключатель источника питания АВР [6].

Все комплектующие ВЭУ производятся в Ленинградской области на соответствующих промышленных предприятиях и доставляются до склада предприятия-поставщика в Санкт-Петербурге на расстояние около 500 км. Негабаритные компоненты ВЭУ (мачты и опоры) транспортируются от предприятия-производителя до товарной железнодорожной станции электропоездом, откуда грузовым автотранспортом транспортируются до промежуточного склада на расстояние 15 км для временного хранения.

**Таблица 1. Цель, область и границы исследования жизненного цикла ВЭУ**

Цель, область и границы	Содержание
<b>1. Цели исследования</b>	
1.1. Причина проведения исследования	Эколого-экономическое обоснование применения ветроустановки в системе энергосбережения предприятия на основе оценки в жизненном цикле продукции
1.2. Предполагаемое применение	Разработка рекомендаций по совершенствованию ВЭУ и разработке новых инженерных решений Разработка рекомендаций по повышению эко-эффективности различных стадий жизненного цикла ВЭУ Разработка экологической декларации ВЭУ Определение экологических преимуществ ВЭУ по сравнению с объектами традиционной электроэнергетики Информирование потребителей
1.3 Предполагаемые потребители	Генеральный директор, главный инженер, главный технолог Заинтересованные потребители
<b>2. Область и границы исследования</b>	



2.1. Область применения	Производство, использование, транспортировка и утилизация ВЭУ
2.2. Функциональная единица (ФЕ)	1 кВт электроэнергии
2.3. Граница производственной системы	<p><i>«От ворот до могилы»:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• транспортировка комплектующих из мест производства до места хранения;</li> <li>• процесс сборки ВЭУ;</li> <li>• транспортировка ВЭУ до конечного потребителя;</li> <li>• стадия эксплуатации ВЭУ, включая техническое обслуживание и ремонт;</li> <li>• транспортировка отходов после демонтажа ВЭУ до места утилизации или переработки.</li> </ul> <p><i>За границами производственной системы</i> остаются этапы: извлечение руд металлов; изготовление конструкционных пластмасс и др. композитных материалов; извлечение природного газа, производство и доставка электрической и тепловой энергии; производство корпуса, комплектующих и деталей ВЭУ; освещение, отопление</p>
<b>3. Инвентаризационный анализ и требования к качеству данных</b>	
3.1 Описание категорий данных	Технические характеристики компаний-производителей ВЭУ, литературные данные, нормативные документы, экспертная оценка
3.2 Критерии для учета входных и выходных потоков	Рассматриваются потоки, доля которых в общем материальном и энергетическом потреблении превышает: для основных входных и выходных потоков – 1 %; для дополнительных входных потоков – 10 %
3.3 Требования к качеству данных	Охватываемый период времени – 5 лет Географическая протяженность – региональный уровень: Санкт-Петербург и Ленинградская область

Производственная система, включающая основные стадии жизненного цикла ВЭУ показана на рис. 1.

После эксплуатации в течение 20 лет и окончания срока службы происходит разборка ВЭУ, транспортировка основных материалов и комплектующих легковым и грузовым транспортом к местам переработки на расстояние до 50 км. Переработке подлежат, в основном, лопасти и аккумуляторные батареи.

В настоящее время существует два основных метода утилизации: лопастей: механическая и термическая переработка. Механический метод отличается простотой реализации. Лопасти демонтируют, разделяют на части для упрощения транспортировки, осуществляют механическое измельчение, позволяющее извлечь смолу, отделяют крупные волокна от мелких волокон и гранул. Термический способ осуществляется

путем сжигания и приводит к образованию большого количества золы (около 60% от сжигаемой массы), которая требует захоронения.

В условиях Ленинградской области наиболее целесообразно использовать кислотные аккумуляторы, которые надежно функционируют при температуре минус 40 °С и отличаются невысокой стоимостью.

На сегодняшний день существует две технологии переработки АКБ: ручная и автоматическая. Первая, используется в основном на небольших предприятиях и постепенно вытесняется более технологичной автоматической переработкой. На автоматической линии АКБ подвергают дроблению до состояния мелкой крупы, которую далее сортируют, обогащают и переплавляют. Эффективность таких линий очень высока, и практически все компоненты АКБ (кислота, свинец, пластмассы), можно использовать вторично в производстве новых аккумуляторов или иных производствах.

При условии работы ВЭУ в штатном режиме необходимость в утилизации возникнет не ранее, чем через 20 лет после ее установки. При этом вместо утилизации на полигоне твердых бытовых отходов (ТБО) можно прогнозировать сценарий восстановления лопастей, капитального ремонта и восстановления дизель-генератора, вторичную переработку металлоконструкций (мачт, растяжек и пр.), АКБ и их комплектующих, а также использование не перерабатываемых материалов, в частности, железобетонных изделий. Однако в связи с недостаточно развитой инфраструктурой переработки ТБО в Северо-Западном регионе, данные возможности не рассматривались, и восстановленные материалы не включались в производственную систему [15].

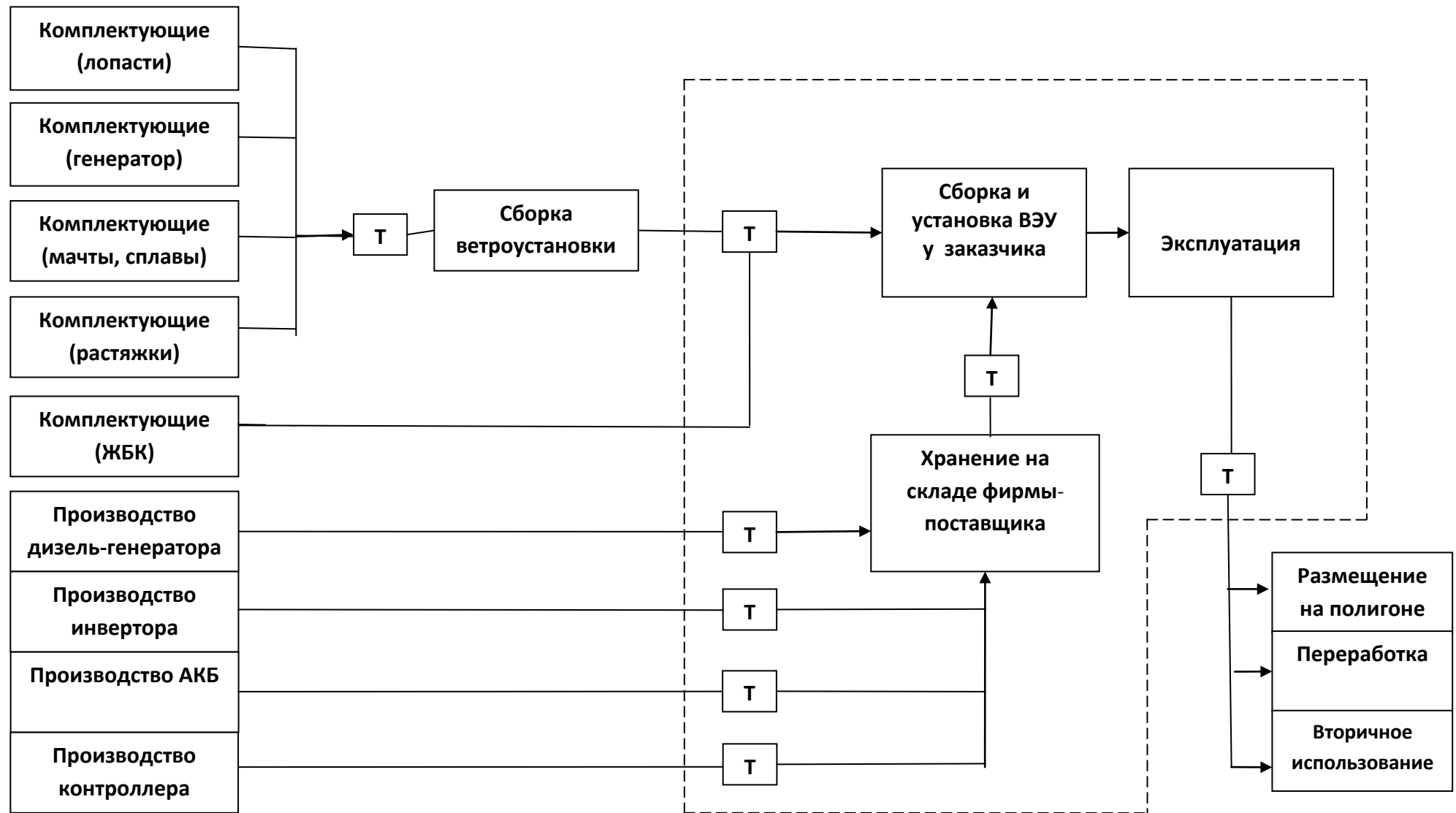




Рис. 1 Продукционная система ветроустановки

## Обсуждение результатов моделирования

На основании исходных данных были получены критерий MIPS на стадии производства ВЭУ, определены наиболее ресурсоемкие и водоемкие процессы.

Среди потребляемых ресурсов в производстве ВЭУ максимальный вклад вносят вода (77%) и абиотические ресурсы (14%) (рис.2.).

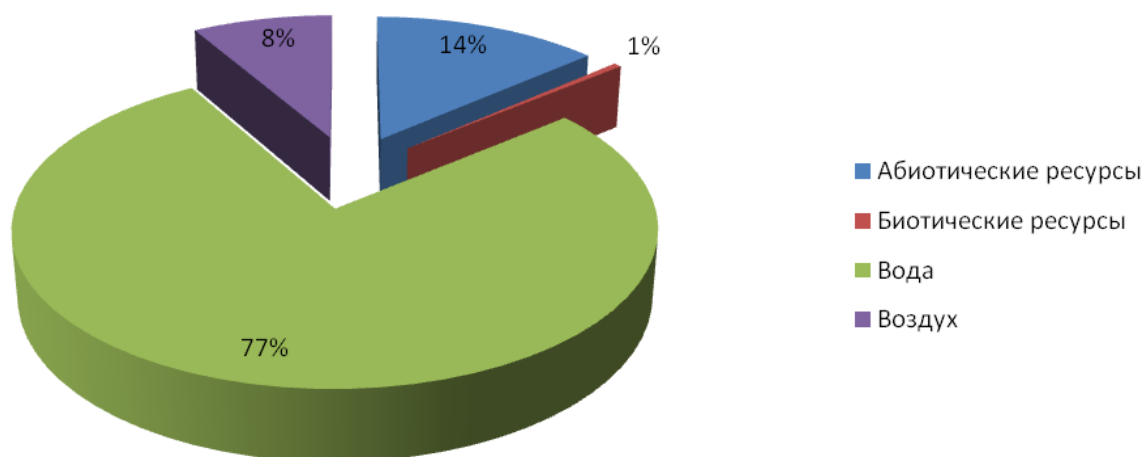


Рис. 2. Структура входных потоков ресурсов на стадии производства ВЭУ

На рис. 3 показана структура потребления водных ресурсов в производстве ВЭУ. Наиболее водоемкими являются процессы получения технической стали - 27 %, стекловолокна - 17 %, дистиллированной воды - 15 %, полипропилена - 10%, дюралюминия - 7%, полиэтилена - 6 % и эпоксидной смолы - 5%.

Наиболее ресурсоемкими, т.е. потребляющими наибольшее количество абиотических ресурсов, являются процессы получения технической стали - 56%, свинца - 18%, первичной меди - 8% и стекловолокна - 6% (рис.4).. Другими материалами, доля которых в общем материальном потоке составляет менее 1%, можно пренебречь.

Наибольшее воздействие на окружающую среду ветроустановка оказывает на стадии эксплуатации. При этом наибольший вклад вносят потенциал глобального потепления и потенциал эвтрофикации (рис.5).

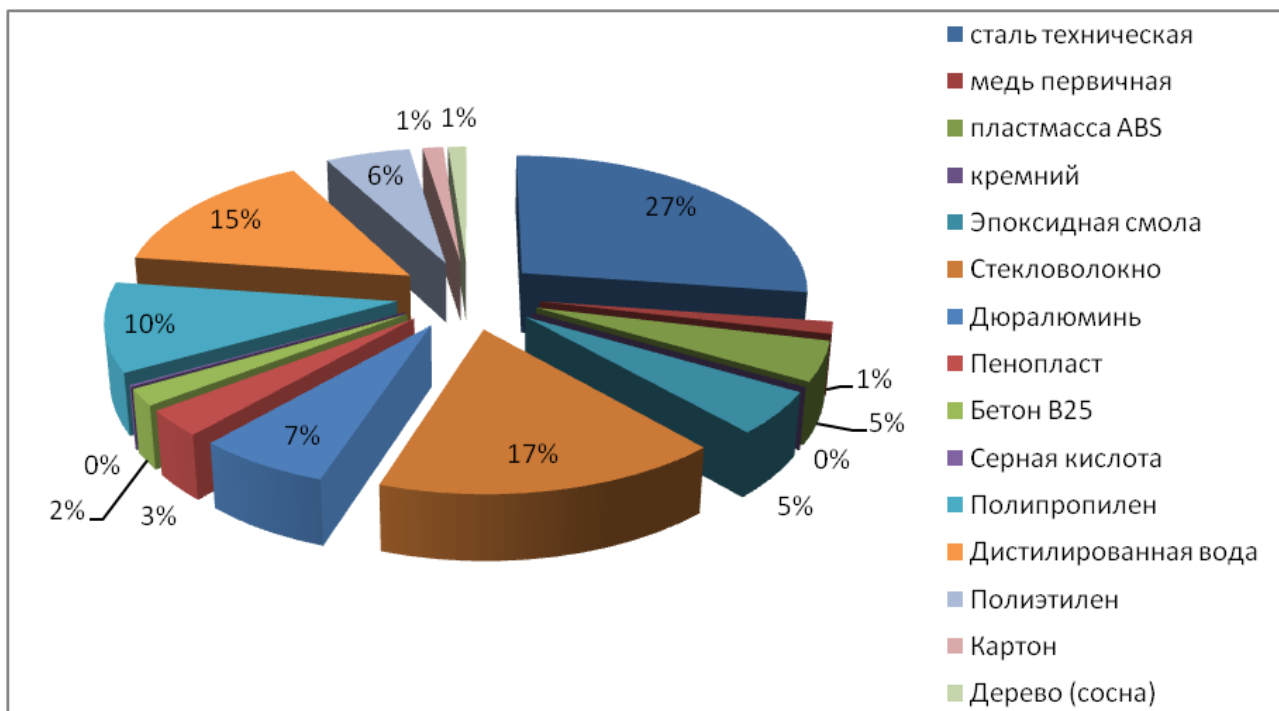


Рис.3. Структура потребления водных ресурсов в производстве ВЭУ

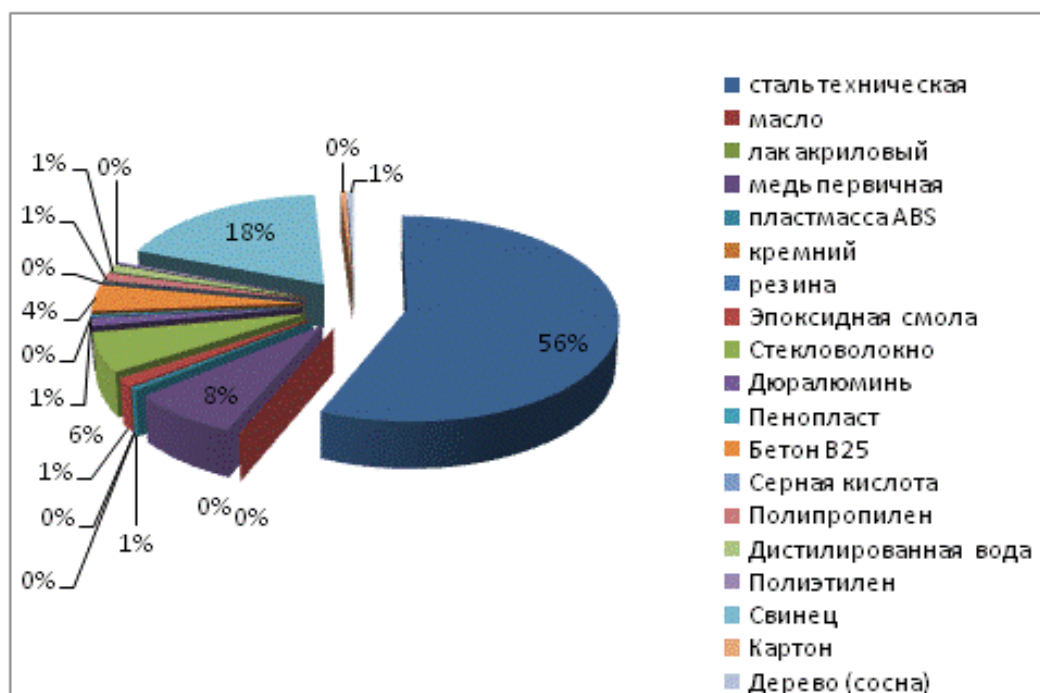


Рис 4. Структура потребления абиотических ресурсов в производстве ВЭУ

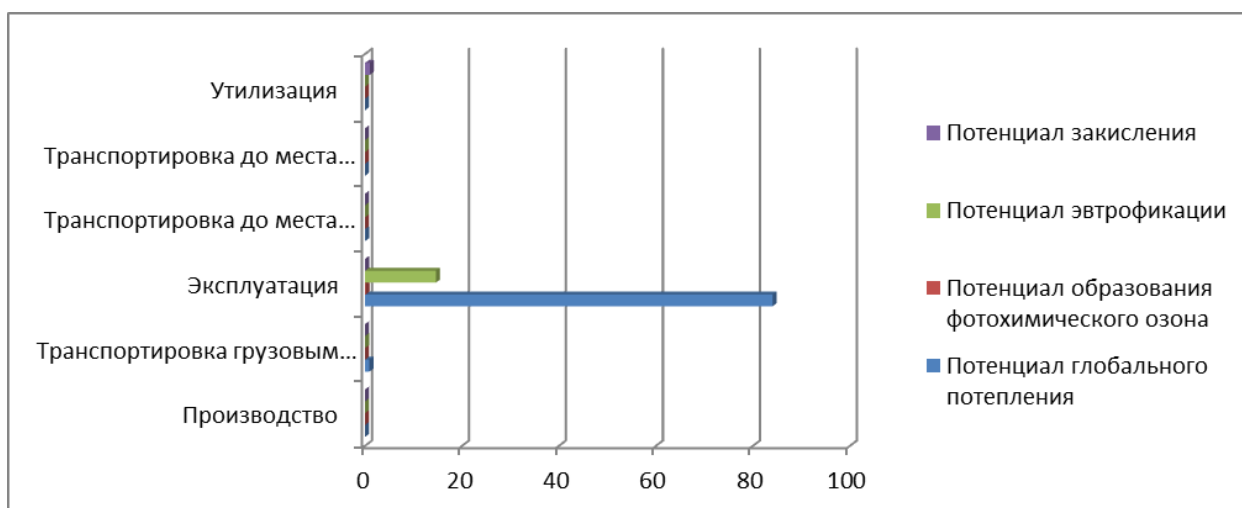


Рис.5. Показатели категорий воздействия производственной системы ВЭУ на протяжении жизненного цикла

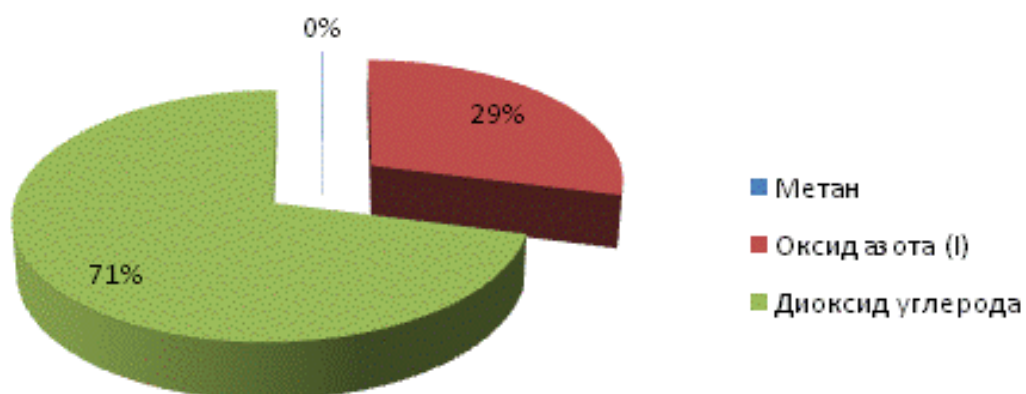


Рис.6. Выбросы парниковых газов на стадии эксплуатации ВЭУ

В соответствии с методическими рекомендациями [14] стоимость жизненного цикла ВЭУ включает затраты, связанные с приобретением, и затраты, связанные с владением и утилизацией. В составе эксплуатационных затрат учитывали стоимость дизельного топлива и горюче-смазочных материалов, затраты на техническое обслуживание, текущие и капитальные ремонты и на оплату труда эксплуатационного персонала. Затраты на утилизацию определяли исходя их затрат на транспортировку

отходов и на размещение на свалке. При продолжительности жизненного цикла 20 лет СЖЦ составила 5732,5 тыс. руб.

При выработке электроэнергии на ВЭУ в условиях Ленинградской области стоимость 1 кВт-ч составит 4,77 руб., что значительно превышает тариф на сетевую электроэнергию, который в среднем по области составляет 2,6 руб. за 1 кВт-ч, и обусловлено в основном затратами на дизельное топливо. Однако эти затраты и, соответственно, СЖЦ и себестоимость электроэнергии, вырабатываемой на ВЭУ, могут быть снижены при подключении ВЭУ к внешней электросети или другому альтернативному источнику энергии при низких скоростях ветра.

### Выводы

Основное экологическое воздействие в жизненном цикле ВЭУ оказывает стадия эксплуатации, т.к. именно на этой стадии при низких скоростях ветра включается дизель-генератор и образуются выбросы в атмосферу. В силу этого ресурсная и экономическая эффективность ВЭУ могут быть повышены, а стоимость жизненного цикла и негативное экологическое воздействие в жизненном цикле снижены при развитии следующих сценариев совершенствования ВЭУ или их сочетаний:

1. Снижение размещения на полигонах отходов, образующихся при утилизации ВЭУ; получение вторичных материалов за счет восстановления лопастей, капитального ремонта и восстановления дизель-генератора, переработки металлоконструкций, железобетонных изделий, АКБ и их комплектующих. Переработка лопастей термическим методом должна осуществляться с утилизацией теплоты. Суммарный материальный вход будет при этом уменьшен на массу восстановленных материалов и изделий и сэкономленной энергии.

2. Замена конструкционных материалов с высокой материальной интенсивностью на материалы с более низкой материальной интенсивностью. Например, замена первичного алюминия, стали и меди на вторичные; снижение потребления стали на изготовление опоры, растяжек, деталей лопастей и корпуса генератора и, в перспективе, замена стали на другие материалы.

3. Снижение затрат и расстояний на транспортировку комплектующих на стадии производства и ликвидационных отходов после окончания срока службы ВЭУ.

4. Замена дизель-генератора на альтернативный источник энергии, обеспечивающую работу комбинированной ВЭУ при низких скоростях ветра, например, на солнечную батарею. При этом эксплуатация ВЭУ будет действительно экологически более чистой по сравнению с традиционными источниками энергии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новая энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р.
2. Леже С. «Зеленая лихорадка»: инвестиции в новую энергетику // Вестник McKinsey. № 3. 2008. – С. 10 – 15.
3. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов от 21.06.1999 N ВК 477.
4. Алёшин Д.В. Проблемы развития альтернативной энергетики: правовой аспект // Журнал ЭГО. №3. 2012. – С. 10 – 12.
5. Ветрогенератор БРИЗ 5000 // Электронный ресурс. <http://www.electrosfera.ru/wind-generator-breeze-5000.html>
6. Руководство по эксплуатации Бриз Лидер 48В с Triplite. – СПб, 2009.
7. ГОСТ Р ИСО 14040-2010. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура / Национальный стандарт Российской Федерации. - М.: Стандартинформ, 2010.
8. LCA Tools. Conversion of emissions into contribution to environmental impact categories. – IVL. Swedish Environmental Research Institute. – 2006.
9. Life cycle assessment of offshore and onshore sited wind power plants based on Vestas V90-3.0 MW turbines. – Vestas Wind System A/S, Denmark, 2006.- 60 p.// Электронный ресурс [www.vestas.com](http://www.vestas.com) (30.03.2013)
10. Основы теории эко-эффективности. Монография / Под науч. ред. О. Сергиенко, Х. Рона. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2004. – 223 с.
11. Material intensity of materials, fuels, transport, food // Электронный ресурс. [http://wupperinst.org/uploads/tx\\_wupperinst/MIT\\_2011.pdf](http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/MIT_2011.pdf)
12. Баженов В.И., Кривошекова Н.А. Показатель LCC (Lifecylecost) - затраты жизненного цикла как базовый экономический анализ в альтернативу показателя приведенных затрат // Журнал «Водоснабжение и канализация». №1. 2008. – С. 12 – 17.
13. Борголова Е.А. Стоимость жизненного цикла проекта – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://borgolova.ampej.ru/students/mpei/dp-consulting/lc> (16.05.2013)
14. Методика определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта (основные положения), 2007. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.opzt.ru/\\_files/448.pdf](http://www.opzt.ru/_files/448.pdf)



15. Гофман В.Р., Лихачева М.А., Малыгин Д.А. Решение экологических проблем в рамках инновационного подхода. // Современные научные исследования и инновации. – Май, 2012 [Электронный ресурс]. <http://web.snauka.ru/issues/2012/05/12929> (27.04.2013)