

УДК 621.31

СПОСОБЫ УТИЛИЗАЦИИ ЛОПАСТЕЙ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ

Типпель Н.М. студент гр. ЭРб-241, II курс,
Научный руководитель: Черникова Т.М., д.т.н., профессор
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

Ветроэнергетика с самого начала своего существования подразумевает под собой экологичный способ выработки электричества. Высокие ветряные мельницы, генерирующие доступную человеку и безопасную для природы энергию, стали символом борьбы с изменением климата и перехода к стабильному будущему. Однако такой вид производства ведет все страны и народы к кризису, ведь вопрос о том, куда девать установки после окончания их срока службы остается открытым. А именно нас интересуют лопасти ветрогенераторов, которые изготавливаются из композитных материалов и практически не поддаются переработке.

Первое поколение ветропарков, активно строившихся в двухтысячных годах, приближается к завершению 20-25 летнего срока эксплуатации. Уже в ближайшее десятилетие 43 миллиона тонн [1] композитных отходов должны подвергнуться утилизации. Отсутствие инфраструктуры и технологий для переработки лопастей ставит под угрозу чистоту нашей планеты и будущее энергетики. Поиск решений этой проблемы критически важен для дальнейшего устойчивого развития ветроэнергетики и сохранения экологии.

Целью данной работы является анализ существующих и перспективных способов утилизации лопастей ветрогенераторов, а также оценка их эффективности и безопасности.

Чтобы понять сложность утилизации лопастей, нужно сначала разобраться в общем устройстве ветрогенератора и, в частности, в конструкции самой лопасти (рис.1) [2].

Ветрогенератор – устройство, преобразующее кинетическую энергию ветра в электричество. Конструктивно его можно разделить на три основные части.

1. Башня.

Это опорная конструкция, которая поднимает гондолу на высоту, где ветер сильнее и стабильнее (обычно от 60 до 120 метров и выше), обеспечивает устойчивость и прочность всей установки. Внутри башни часто находится лестница или лифт для подъема персонала, а также силовые кабели, передающие электричество вниз. Состоит она чаще из стали, реже из бетона или гибридных конструкций.

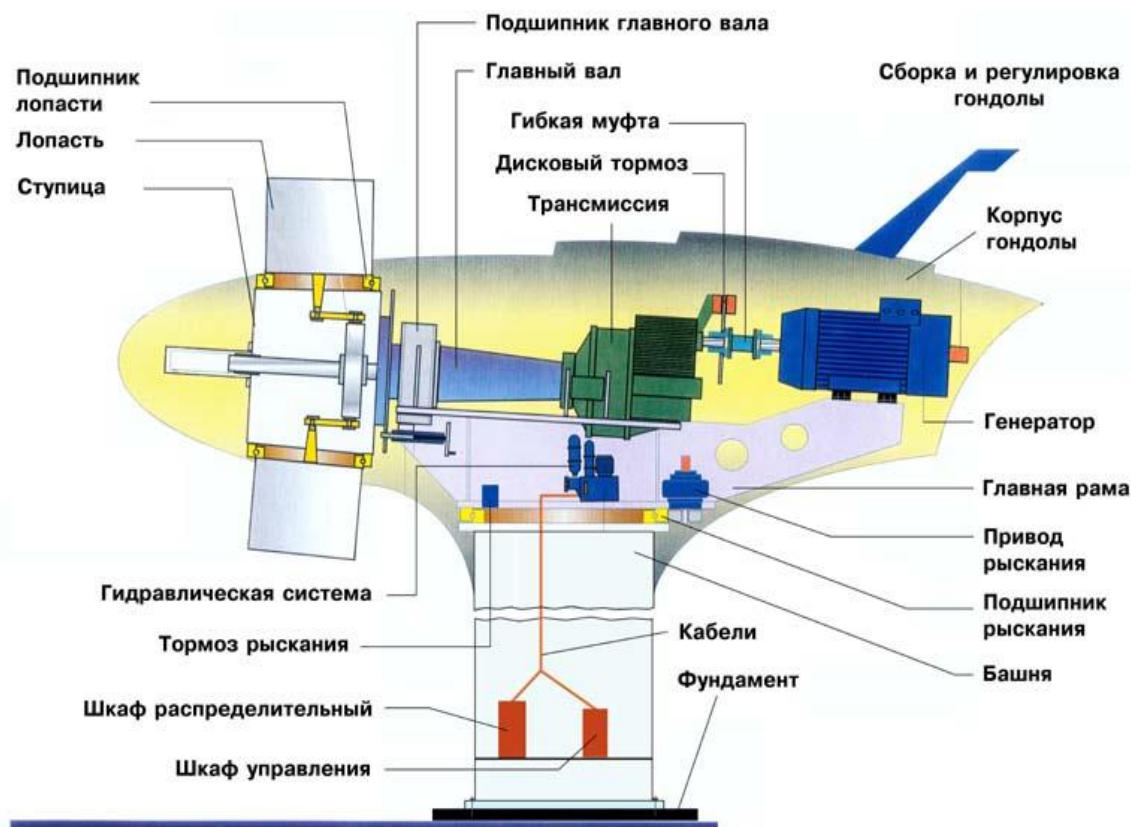


Рис.1. Внутреннее устройство ветрогенератора

2. Гондола.

Часть, являющаяся корпусом ветрогенератора, которая содержит в себе все основные механизмы, необходимые для преобразований:

1) главный вал и подшипники участвуют в передаче вращения от ротора к редуктору или напрямую к генератору;

2) редуктор – механизм повышающий скорость вращения вала до скорости, необходимой для работы генератора. Используется в старых моделях;

3) генератор – машина, преобразующая механическую энергию в электрическую;

4) система ориентации на ветер представляет собой датчик (флюгер) и мотор-редуктор, которые поворачивают всю гондолу так, чтобы лопасти всегда были навстречу ветру;

5) система торможения, которая включает в себя дисковые тормоза и аэродинамические тормоза для остановки ротора при аварийном режиме работы;

6) система охлаждения – это смесь радиаторов и вентиляторов для отвода тепла от генератора и редуктора.

3. Ротор с лопастями, именно он непосредственно взаимодействует с ветром. Имеет 2 составляющие:

1) ступица – литая деталь, к которой крепятся лопасти. Внутри ступицы может находиться механизм изменения угла лопастей, позволяющий регулировать мощность и останавливать ротор;

2) лопасти – изделия длиной от 40 до 100 метров и более. Они должны быть одновременно легкими, невероятно прочными и жесткими [3].

Лопастей ветрогенераторов – это высокотехнологичное изделие, включающее в себя множество материалов.

1. Армирующие волокна:

1) стекловолокно – самый доступный и часто используемый материал, который составляет основную массу лопасти;

2) углеродное волокно – используется в особо длинных и нагруженных лопастях, обычно примесью среди стекловолокна, оно легче и прочнее, но дороже и сложнее в переработке [3].

Волокна могут использоваться в силовых лонжеронах, обшивке, флюгере, защитных покрытиях от эрозии и для оптимизации обтекания.

2. Термореактивные смолы – ключевой элемент, затрудняющий утилизацию. Чаще всего используются эпоксидные, полиэфирные или винилэфирные смолы. В отличие от термопластов, термореактивные смолы не плавятся и не растворяются при нагреве, а горят и обугливаются.

3. Заполнители: пространство между обшивкой и балками часто заполняется легким материалом, например, пеной или бальзовым деревом, которое приклеивается к обшивке.

Существуют следующие способы утилизации лопастей.

1. Захоронение на полигонах – простой и самый распространенный метод, особенно в странах, где нет жестких эко-стандартов. Лопасти разрезают на месте, чтобы их можно было транспортировать. Затем эти фрагменты вывозят на специальный полигон и закапывают. Такой способ несет в себе полное разрушение природных зон без возможности их самостоятельного восстановления, т.к. композиты не разлагаются в земле и выделяют мелкую пыль и токсичные вещества в грунтовые воды. Захоронения, в силу размера лопастей, уже занимают около 50 гектар (70 футбольных полей) [1, 7], размеры которых будут только расти по мере пользования человечеством ветроэнергетикой. В Европе этот метод активно запрещается или облагается налогами [4]. В других регионах пока остается основным.

2. Сжигание в мусоросжигательных заводах – лопасти измельчают и сжигают в печах. Выделяемое тепло используют для выработки электричества или отопления. Однако, такой вид утилизации имеет последствия в виде большого количества выбросов в атмосферу [5]. Так же стоит отметить, что сжигание не является способом переработки даже при выработке энергии вследствие этого процесса, ведь оно несет за собой потерю дорогостоящих волокон.

3. Сжигание в цементных печах – измельченные лопасти сжигают в печах для производства клинкера (основы цемента). Стекловолокно в лопастях содержит песок, который является сырьем для цемента, но цементные печи в

первую очередь предназначены для производства клинкера, и не все эксплуатационные условия идеальны для уничтожения отходов.

4. Механический рециклинг – лопасти режут и мелко дробят в специальных shreddерах и дробилках, получая крошку и волокна, которые могут использоваться в добавках в цемент (микроармирование или наполнитель), производстве композитных плит, в наполнителе для асфальта или строительных материалов низкого уровня ответственности (шумозащитные экраны, бордюры) [6]. Этот метод позволяет перерабатывать большие объемы, но за ним следуют экономические убытки, ведь длинные, прочные волокна, ради которых все затевалось, ломаются, и их ценность теряется.

5. Пиролиз – нагрев измельченных лопастей до высоких температур (450–700°C) в среде без кислорода [6]. На выходе получают волокна, загрязненные остатками смолы, что снижает их прочность. При таком уровне обработки их можно использовать как наполнитель. Качество материала ухудшается, но даже в этом случае метод экономически выгоден, т.к. волокна являются дорогостоящим ресурсом [6].

6. Сольволиз – использование химических растворителей при высоких температурах и давлении для растворения смолы. В отличие от предыдущего способа, волокна остаются чистыми и неповрежденными, что позволяет им сохранять свои свойства практически невредимыми. Их можно использовать заново для тех же целей. В настоящее время это единственный путь к замкнутому циклу в производстве. Но пока метод очень дорогой и находится в стадии лабораторных исследований.

Необходимо признать, что развитие ветроэнергетики, созданное для решения проблемы истощения ископаемых ресурсов и негативного экологического следа от производств, создаёт, не менее сложную проблему – утилизацию отслуживших свой срок лопастей ветрогенераторов. Проведенный анализ устройства и материалов лопастей подтвердил, что использование термоактивных композитов, обеспечивающих легкость и прочность конструкции, делает их фактически «вечными» с точки зрения естественного разложения и крайне сложными для переработки.

Рассмотренные способы утилизации – от примитивного захоронения до перспективного сольволиза – демонстрируют широкий спектр подходов, но ни один из них на сегодняшний день не является идеальным решением. Захоронение ведет к загрязнению почв и росту полигонов, сжигание сопряжено с выбросами в атмосферу, а механическая переработка хоть и позволяет избавиться от отходов, но ведет к потере ценности дорогостоящих материалов.

Особую остроту проблеме придает временной фактор. Первое поколение ветропарков, массово возводившееся на рубеже тысячелетий, в ближайшие годы выйдет из эксплуатации. Энергетика находится на пороге экологической катастрофы, которая поставит под сомнение саму идею чистой энергетики как абсолютно безопасной альтернативы.

В связи с этим крайне важно, чтобы осознание грядущего кризиса не осталось уделом узкого круга специалистов. Именно среди молодых инжене-

ров и экологов сегодня назревает острая необходимость в подъеме этой темы. От их инициативности, нестандартного мышления зависит, сможем ли мы замкнуть производственный цикл, превратив отходы в ценное вторичное сырье. Только так можно предотвратить экологическую катастрофу и обеспечить по-настоящему устойчивое развитие энергетики для следующих поколений.

Список литературы:

1. Пу Лю. Отходы от лопастей ветрогенераторов в 2050 году / Пу Лю, Клэр И Барлоу [Электронный ресурс] // PubMed: [сайт]. – URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28215972/> (дата обращения: 10.03.2026).
2. Ветрогенераторы для дома / [Электронный ресурс] // РИНА: [сайт]. – URL: <https://rina.pro/napravleniya-deyatelnosti/alternativnaya-energetika/vetroenergetika> (дата обращения: 10.03.2026).
3. Карбон для лопастей ветрогенераторов / [Электронный ресурс] // Carbon Composites: [сайт]. – URL: 2. <https://comcarbo.ru/news/karbon-dlya-lopastey-vetrogeneratorov/> (дата обращения: 10.03.2026).
4. Директива Совета Европейского Союза 1999/31/ЕС от 26 апреля 1999 г. по полигонам захоронения отходов / [Электронный ресурс] // PDF: [сайт]. – URL: <https://wescoop.eu/wp-content/uploads/2020/04/Директива-Совета-Европейского-Союза-199931ЕС-.pdf> (дата обращения: 12.03.2026).
5. Сейед Хоссейн Маманпуш. Переработанные лопасти ветрогенераторов как сырье для производства композитных материалов второго поколения / Сейед Хоссейн Маманпуш, Хуэй Ли, Карл Энглунд, Азаде Тавуси Табатабаи [Электронный ресурс] // PubMed: [сайт]. – URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29506776/> (дата обращения: 14.03.2026).
6. Леон Мишнаевский. Экологичная утилизация лопастей ветрогенераторов по окончании срока службы: обзор существующих и перспективных решений / Леон Мишнаевский [Электронный ресурс] // MDPI: [сайт]. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/5/1124> (дата обращения: 15.03.2026).
7. Лопасты на свалку: как ветроэнергетика решает проблему отходов / [Электронный ресурс] // ПроВиэ: [сайт]. – URL: <https://provie.ru/id/2633> (дата обращения: 16.03.2026).