

Экологические и экономические аспекты утилизации солнечных панелей и ветровых турбин¹

DOI: <http://doi.org/10.34981/Lab-67.2020.innovconf.13-ratner-sv>

Существенное снижение стоимости производства энергии с помощью фотоэлектрических панелей и ветровых турбин, достигнутое за последние годы, а также быстрое развитие мощностей, выпускающих данные виды генерирующего оборудования, открывают перспективы для еще более быстрого и масштабного развития возобновляемой энергетики по всему миру, включая и те страны, которые в прошлом довольно скептически относились к возобновляемой энергетике. В полной мере это относится и к России, которая в последние годы пытается сократить свое отставание от стран-лидеров по развитию ВИЭ (возобновляемых источников энергии). Поспешное внедрение реактивных инноваций в сфере ВИЭ как вынужденный ответ на отставание в технологическом развитии, конечно, не является конкурентным преимуществом с экономической точки зрения, однако позволяет учесть имеющийся опыт и принять более взвешенные решения в планировании энергосистем с точки зрения экологии. Следует отметить, понимание того, какое воздействие на окружающую среду производят не только начальные фазы жизненного цикла ветровой и солнечной энергетики, но и фаза утилизации, складывается в научной литературе только сейчас, когда подходит время массовой утилизации солнечных станций и ветровых парков, построенных 20-25 лет назад в качестве демонстрационных проектов. Новые данные, которые появляются в литературе, позволяют ставить и решать задачи оптимального проектирования энергосистем, в частности, регулировать масштабы строительства объектов ВИЭ, их вид, выбирать способ утилизации/переработки генерирующего оборудования, локацию для размещения перерабатывающих производств и т.д. Решение таких задач будет способствовать развитию циркулярной экономики.

К концу 2018 года кумулятивная установленная мощность фотоэлектрических панелей достигла 486 ГВт [1]. Учитывая, что средний срок эксплуатации современных солнечных панелей составляет 25 лет [2], а средняя масса употребляемого в 92% всех солнечных панелей поликристаллического модуля мощностью 200 Вт составляет 16,8 кг [3], в ближайшие годы мир может столкнуться с необходимостью утилизации более 37 млн. тонн отработавших свой срок солнечных модулей (рисунки 1).

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 19-010-00383 «Модели и механизмы перехода к циркулярной экономике в условиях институциональных ограничений».

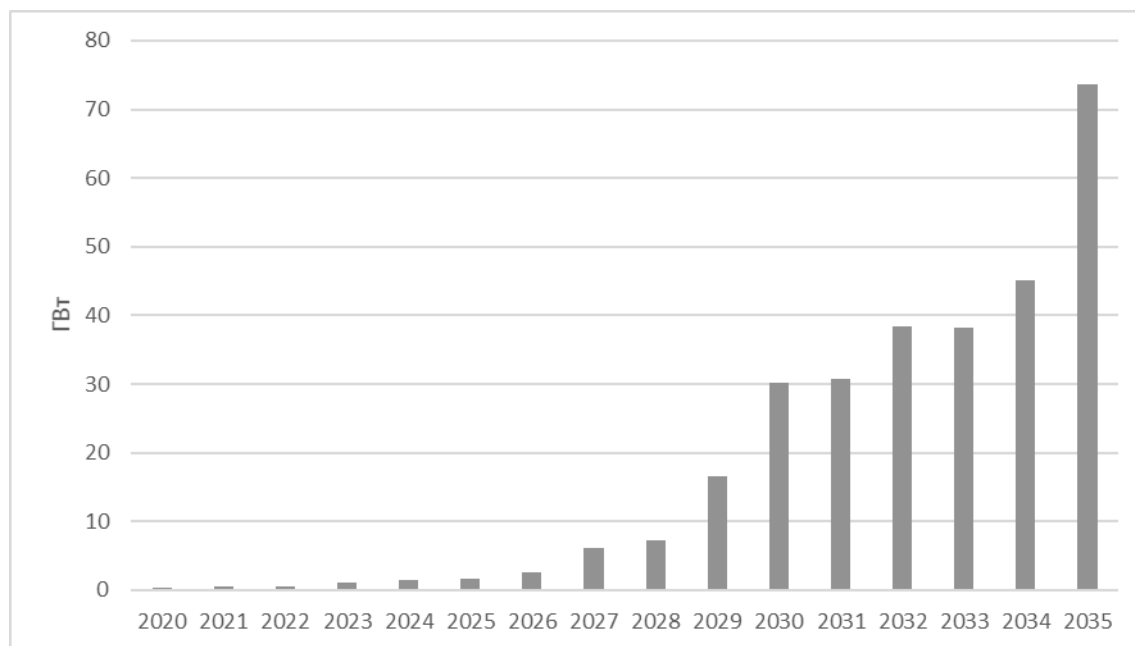


Рис. 1. Ожидаемые годовые объемы вывода из эксплуатации солнечных панелей

Источник: составлено автором на основе данных [1].

В будущем эти объемы будут только возрастать в связи с развитием солнечной энергетики во всех странах, которая, согласно экспертным прогнозам, к середине века достигнет 4500 ГВт кумулятивной установленной мощности во всем мире.

Солнечные панели содержат свинец (Pb), кадмий (Cd) и многие другие довольно опасные для здоровья человека и окружающей среды химические элементы. Пока что наиболее распространенной технологией утилизации солнечных модулей остается их захоронение на мусорных полигонах [2], что является достаточно опасным так как, вредные химические элементы могут протекать и поступать в почву, загрязняя источники питьевой воды. Также используется технология сжигания, аналогичная сжиганию обычных муниципальных отходов. Такой тип обращения со всеми видами так называемых электронных отходов может выбрасывать в атмосферу токсичные тяжелые металлы. Кроме того, из литературных источников известно, что некоторые материалы, содержащиеся в солнечных модулях, могут накапливаться в экосистеме, создавая долгосрочные негативные экологические эффекты. Сжигание использованных солнечных панелей также не позволяет повторно использовать содержащиеся в них ценные материалы. Достоинством данного метода является только то, что солнечные модули не нуждаются в какой-либо предварительной сортировке и отделению от других видов муниципальных отходов [4].

Мощности по промышленной переработке использованных или бракованных солнечных панелей в настоящее время в мире ограничены и представлены только Чешской компанией Retina, несколькими заводами

компании First Solar в США, Германии и Малайзии, фабрикой Toshiba Environmental Solutions [2], а также новым заводом Veolia во Франции. На сегодня на законодательном уровне только Евросоюз закрепил правила сбора и переработки солнечных панелей в директиве Waste of Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Directive (Directive 2012/19/EU). Некоторые страны с развитой солнечной энергетикой, такие как Южная Корея, Япония и США, активно работают над проблемой организации переработки solar waste, тогда как другие, в том числе Китай, пока лишь исследуют возможности решения данной проблемы.

Современный промышленный алгоритм переработки фотоэлектрических панелей на основе кремния начинается с их разборки, в процессе которой отделяются алюминиевые (рама) и стеклянные детали (покрытие). Почти 95% стекла подлежит переработке, а все внешние металлические детали могут использоваться повторно для формования новых каркасов для солнечных модулей. Остальные материалы подвергаются термической обработке при температуре 500°C, в процессе которой инкапсулирующий пластик испаряется, оставляя кремниевые элементы готовыми для дальнейшей переработки. На современных предприятиях испаряющийся пластик не выбрасывается в окружающую среду, а используется в качестве источника тепла для дальнейшей термической обработки (технология рекуперации энергии), что позволяет частично снизить негативные экологические эффекты.

После термической обработки 80% фотоэлектрических модулей могут быть использованы повторно, в то время как остальная часть подлежит дополнительному очищению. Повторное использование кремниевого материала может существенно снизить негативные экологические эффекты производства кремниевых фотоэлектрических панелей за счет экономии, помимо самого кварцевого песка, значительного количества энергии и воды, используемых на стадии производства металлургического кремния.

Процесс переработки тонкопленочных фотоэлектрических панелей более сложный. На первом шаге панель измельчается до размера частиц не более 4-5 мм, что позволяет удалить ламинирование, удерживающее внутренние материалы. В отличие от кремниевых панелей, оставшееся вещество состоит как из твердого, так и из жидкого материала, которые разделяются. Жидкости проходят через процесс осаждения и обезвоживания, чтобы обеспечить восстановление полупроводниковых материалов. Разделение полупроводниковых металлов производится различными способами в зависимости от технологии, используемой при производстве панелей; однако в среднем достигается 95%-ный уровень восстановления. Твердые вещества, загрязненные так называемыми межслойными материалами, очищаются посредством вибрации. Далее материал проходит промывку, в результате которой остается частое стекло, подлежащее переплавке и повторному использованию.

На стадии лабораторных исследований находятся такие технологии переработки фотоэлектрических кремниевых модулей как: технология растворения ламинирующей пленки в органическом растворителе, технология растворения с дополнительным ультразвуковым воздействием, горячая резка, пиролиз, технология растворения в азотной кислоте и некоторые другие [4]. Для тонкопленочных модулей, помимо технологий растворения в органическом растворителе и горячей резки, также разрабатываются технологии лазерного воздействия, вакуумной обработки и флотации.

Что касается экономических аспектов промышленной переработки фотоэлектрических панелей, то, согласно данным работы [5], переработка кремниевых модулей становится целесообразной при масштабах не менее 19 000 тонн в год. Только при достижении таких объемов стоимость переработки снижается за счет эффектов масштаба производства. Экономическая целесообразность переработки цельной фотоэлектрической панели гораздо выше, чем целесообразность переработки фотоэлектрических модулей, так как металлическая рама и электрические кабели перерабатываются легче, а восстановленные из них материалы (алюминий, медь) ценятся выше. Экономическая целесообразность переработки кремниевого модуля существенным образом зависит от цены новых модулей, которая в последние годы значительно упала. Однако для некоторых регионов мира, например, для Европы, коммерческая привлекательность переработки кремния определяется еще и недостатком собственных добывающих предприятий.

По данным на конец 2019 года общий кумулятивный объем установленных ветровых мощностей достиг 621 ГВт для наземных ветровых парков и 29 ГВт для морских [6]. Средний срок эксплуатации ветровых турбин составляет 20 лет, это означает, что, с учетом исторических темпов развития ветровой энергетики в мире, в ближайшие годы объемы вывода из эксплуатации ветровых турбин, установленных в начале 2000-х годов, будут нарастать экспоненциально (рисунок 2).

Наиболее сложным для переработки компонентом ветровых турбин являются лопасти и бетонное основание. Лопасти в настоящее время просто подлежат захоронению на мусорных полигонах или, в некоторых случаях, сжиганию на мусорных заводах. Из-за того, что они производятся из композитных материалов, их восстановление сильно затруднено. В тех случаях, когда это все-таки технологически возможно, переработанные материалы имеют гораздо более низкое качество, что не позволяет их использовать вновь для тех же целей. Кроме того, большие размеры лопастей, которые на современных турбинах достигают 80-90 метров в длину, затрудняют их транспортировку на место переработки.

Захоронение больших объемов лопастей ветровых турбин является серьезной экологической и экономической проблемой.

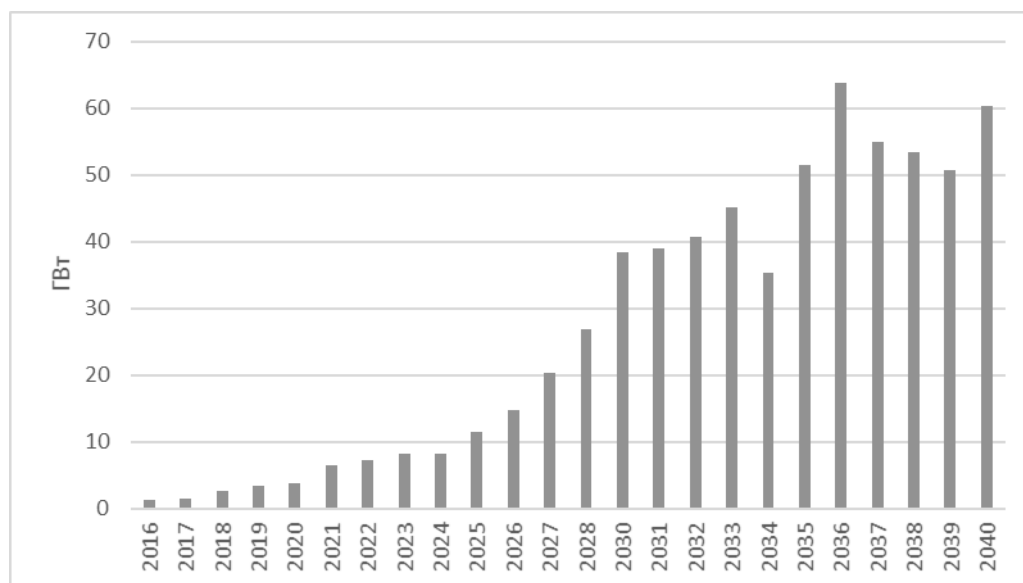


Рис. 2. Ожидаемые объемы вывода ветровых турбин из эксплуатации

Источник: составлено автором на основе данных [1].

Масса лопастей современных ветровых турбин достигает 12,37-13,41 тонн на 1 МВт мощности, а у турбин, заканчивающих свой срок службы в ближайшие годы, она составляет около 8,34 тонн на 1 МВт [7]. Это означает, что если в 2020 году необходимо захоронить на мусорных полигонах более 31 тыс. тонн ветровых турбин, то в 2025 году – уже более 142 тыс. тонн, в 2030 году – более полумиллиона тонн. Захоронение таких крупных объектов потребует их предварительного измельчения путем перемалывания или резки, что достаточно энергозатратно.

С экономической точки зрения извлечение из отработавших свой срок лопастей ценных материалов представляет существенней интерес. Так, например, лопасти производства компании Vestas состоят из стекловолокна, углеродного волокна, эпоксидной смолы и полиуретана [8]. Углеродное волокно, помимо ветровой энергетики, также активно используется в самолётостроении, автомобильной промышленности, судостроении и других секторах промышленности. Производится углеродное волокно из легких фракций сырой нефти – пропана и пропилена путем многоступенчатой химической обработки, требующей значительных затрат энергии. Производство одного кг углеродного волокна требует 165 кВтч, тогда как восстановление – только 8,8 кВтч. Сопоставимые данные по соотношению энергоемкости процесса производства и переработки стекловолокна приводит источник [9], оценивая его как 10/1.

Некоторые европейские страны, наиболее приверженные концепции развития циркулярной экономики, на законодательном уровне налагают запрет на захоронение необработанных отходов с высокой органической составляющей. Из-за наличия углеродного волокна в составе композитного

материала лопастей органическая составляющая достигает в них 30%, что обязывает энергетические компании искать другие пути утилизации выводимых из эксплуатации ветровых турбин.

Как видно из проведенного анализа существующих на настоящий момент технологий переработки использованного генерирующего оборудования для ветровой и солнечной энергетики, заключительный этап жизненного цикла объектов ВИЭ может оказывать существенную нагрузку на окружающую среду. Поэтому выбор технологии генерации энергии, осуществляемый при планировании развития энергетикой системы на конкретной территории (регионе, муниципалитете), должен производиться с учетом суммарных экологических эффектов по всему жизненному циклу.

Литература

1. REN21. Renewables 2019 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat, 2020.
2. Chowdhury M., Rahman K., Chowdhury T., Nuthammachot N., Techato K., Akhtaruzzaman M. et al. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews*. 2020. Vol. 27, 100431. DOI: 10.1016/j.esr.2019.100431.
3. Huang B., Zhao J., Chai J., Xue B., Zhao F., Wang X. Environmental influence assessment of China's multi-crystalline silicon (multi-Si) photovoltaic modules considering recycling process. *Solar Energy*. 2017. Vol. 143. Pp. 132-141. DOI: 10.1016/j.solener.2016.12.038.
4. Lunardi M., Alvarez-Gaitan J., Bilbao J., Corkish R. A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules. *Solar Panels and Photovoltaic Materials*. 2018. DOI: 10.5772/intechopen.74390.
5. Deng R., Chang N., Ouyang Z., Chong C. A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 109. Pp. 532-550. DOI: 10.1016/j.rser.2019.04.020.
6. Global Wind Report 2019. Global Wind Energy Council, 2020.
7. Li Y., Li H., Wang G., Liu X., Zhang Q. Study on the optimal deployment for Photovoltaic components recycle in China. *Energy Procedia*. 2019. Vol. 158. Pp. 4298-4303. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.794.
8. Cherrington R., Goodship V., Meredith J., Wood B., Coles S., Vuillaume A. et al. Producer responsibility: Defining the incentive for recycling composite wind turbine blades in Europe. *Energy Policy*. 2012. Vol. 47. Pp. 13-21. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.03.076.
9. Shuaib N., Mativenga P. Carbon Footprint Analysis of Fibre Reinforced Composite Recycling Processes. *Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 7. Pp. 183-190. DOI: 10.1016/j.promfg.2016.12.046.