

Анализ влияния редкоземельных элементов на рост установленной мощности ветровых электростанций

Rare earth elements influence
analysis due to wind farms
installed capacity growth

Олег СИГИТОВ

Ассистент кафедры энергетического
машиностроения инженерной академии, к. т. н.,
Российский университет дружбы народов имени
Патриса Лумумбы

Oleg SIGITOV

Assistant of the Department of Power Engineering,
PhD, Academy of Engineering, Peoples' Friendship
University of Russia named after Patrice Lumumba

Константин СУСЛОВ

Профессор кафедры гидроэнергетики
и возобновляемых источников энергии,
д. т. н., Национальный исследовательский
университет «МЭИ»
E-mail: SuslovKV@mpei.ru

Konstantin SUSLOV

Professor of the Department of Hydropower and
Renewable Energy Sources, Doctor of Sciences
(Techn.), National Research University «Moscow
Power Engineering Institute»
E-mail: SuslovKV@mpei.ru

Добыча лития в Салинас-Грандес, Аргентина

Источник: xura / depositphotos.com



Аннотация. Рост установленной мощности ветровых электростанций (ВЭС) в энергосистемах приводит к увеличению потребления полезных ископаемых, включая редкоземельные элементы (РЗЭ), необходимых для их строительства. В статье показан анализ потребления материалов для производства различных компонентов ветровых турбин. Предложен способ определения доли потребления РЗЭ при производстве ветровых турбин относительно мирового потребления. Расчет учитывает рост установленной мощности ВЭС, связанный с увеличением энергопотребления и заменой ветровых турбин по истечению срока службы. Проведенный расчет показывает, что в результате высокого удельного потребления редкоземельных элементов при производстве ветровых турбин возникают риски роста стоимости отдельных компонентов, снижения эффективности генераторов и отдельных элементов конструкции при уменьшении концентрации или замене РЗЭ и других критических элементов, а также замедления роста установленной мощности ВЭС в энергосистемах в долгосрочной перспективе. Для снижения перечисленных рисков в настоящее время проводятся разработки по трем основным направлениям: внедрение новых технологий, увеличение количества циклических нагрузок и переработка и повторное использование компонентов ветровых турбин.

Ключевые слова: энергетика, электроэнергетические системы, ветровые электростанции, редкоземельные элементы, ветровые турбины.

Abstract. Wind farms installed capacity increase in electric power system leads to a growth in consumption of minerals, including rare earth elements (REE), necessary for their production. The paper presents an analysis of materials consumption for production of various wind turbine components. A method determin proportion of REE consumption for wind turbines production relative to global consumption. The calculation takes into account increase of wind farms installed capacity associated with an energy consumption increase and wind turbines plant replacement at the end of their service life. The calculation results show, that as a result of high specific consumption of rare earth elements in the process of wind turbines production, there are risks of an increase in cost of production of different components, a decrease of generator efficiency and others equipment due to decrease of REE and other critical elements in their concentration. In addition to the shown risks, high consumption of REE may lead to a decrease of wind farms installed capacity in energy systems in the long term. To reduce these risks, developments are currently underway in three main directions: introduction of new technologies, an increase of cyclic loads number, and the recycling and reuse of wind turbine components.

Keywords: energy, electric power systems, wind farms, rare earth elements, wind turbines.

Тенденции развития ветроэнергетики и потребления материалов для производства ветровых турбин

В апреле 2024 г. вступило в силу Распоряжение Правительства Российской Федерации от 16.04.2024 № 939-р «Об утверждении Перечня дефицитных видов твердых полезных ископаемых и Перечня продукции с высокой долей добавленной стоимости, производимой с использованием добытых дефицитных видов твердых по-

лезных ископаемых» [1]. Перечень состоит из 310 позиций. В список дефицитного сырья вошли: уран, марганец, хром, титан, бокситы, молибден, вольфрам. В нем зафиксированы редкие металлы: литий, бериллий; редкоземельные (иттрий, лантан, церий, празеодим, неодим, самарий, европий, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лютеций); цирконий, ванадий, ниобий, тантал и рений. Среди элементов, использующихся при производстве компонентов ветровых турбин, в перечень вошли: диспрозий, неодим, празеодим, тербий, скандий, иттрий, а также хром, марганец и молибден. Указанные

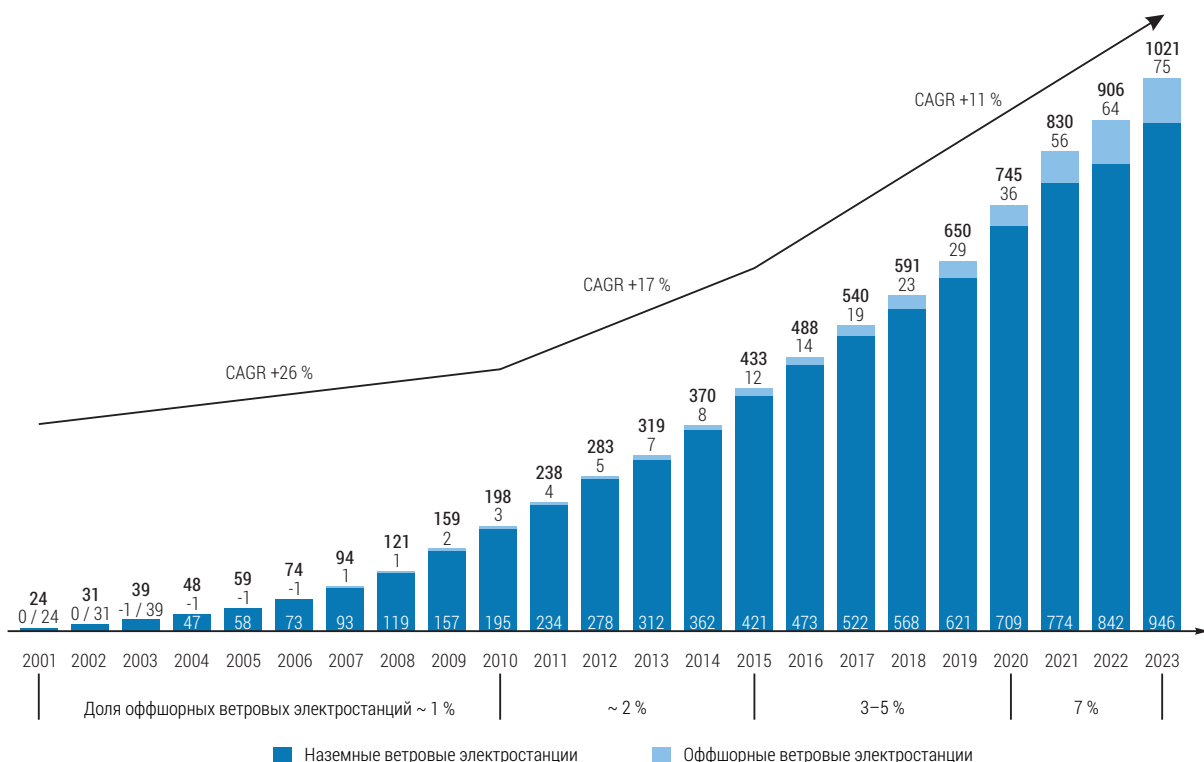


Рис. 1. Установленная мощность наземных и оффшорных ветровых электростанций

элементы используются в критических компонентах ветровых турбин, без использования которых невозможна надежная и длительная эксплуатация. Рост дефицита ископаемых будет продолжаться, учитывая темпы ввода новых ветровых электростанций (ВЭС), что будет в конечном итоге влиять на себестоимость произведенной электроэнергии.

В том же месяце Международная ассоциация ветроэнергетики выпустила очередной доклад, в котором отражаются основные тенденции развития отрасли [2]. На рис. 1 показан рост установленной мощности ВЭС с 2021 по 2023 гг. Из рисун-

ка виден устойчивый рост установленной мощности, при этом с 2014 г. прирост ВЭС составляет не менее 50 ГВт в год.

Очевидно, что рост установленной мощности ВЭС в энергосистемах приводит к росту потребления комплектующих материалов, таких как: сталь, медь, алюминий, углеродное и стекловолокно, эпоксидные смолы и редкоземельные элементы, такие как: диспрозий (Dy), неодим (Nd), празеорд (Pr) и др. [3, 4].

Материалы для изготовления компонентов ветровых турбин

В местах размещения ВЭС близость производства необходимых материалов и их поставка являются необходимым условием. Потребность материалов определяется конструкцией ВТ (номинальной мощностью, высотой) и типом применяемых технологий, например, среди генераторов. Использование тех или иных материалов также зависит от механических свойств рассматриваемого узла ветровой турбины (ВТ), а именно отношения прочности к весу, жесткости, ударной вязкости и усталости.

Как правило, ВТ преимущественно изготавливаются из стали (71–79% от общей

Рост мощности ВЭС в энергосистемах приводит к увеличению потребления комплектующих материалов, таких как: сталь, медь, алюминий, эпоксидные смолы и редкоземельные элементы

Компоненты		Материалы
Ротор	Лопаст	Стекловолокно, углеродное волокно, эпоксидные смолы, решетка в виде сот, пробковое дерево, полиэфирные смолы
	Ступица	Сталь, чугун
Гондола	Редуктор	Сталь, алюминий, латунь, хром, железо, марганец, молибден, никель
	Анемометр	Нержавеющая сталь
	Вал	Сталь
	Генератор	Медь, железо, редкоземельные элементы (неодим, диспрозий, празеодим, тербий)
	Другие компоненты	Алюминий, хром, медь, железо, марганец, молибден, никель
Башня	-	Сталь, алюминий, пластик, медь, предварительно напряженный бетон, хром, железо, марганец, молибден, никель
Фундамент	-	Сталь, железо, бетон
Кабели	-	Пластик, алюминий, медь
Трансформатор	-	Сталь, медь

Таблица 1. Материалы для изготовления компонентов ветровых турбин

массы турбины), стекловолокна, смолы или пластика (11–16%), железа или чугуна (5–17%), меди (1%), алюминия (1%). В генераторах ветровых турбин на постоянных магнитах для их изготовления используют железо, бор и редкоземельные элементы для улучшения магнитных свойств. В таблице 1 показаны основные материалы, которые используются при изготовлении компонентов ветровых турбин.

Наибольшие риски к ограничению поставок необходимых материалов связаны с использованием редкоземельных элементов, особенно Nd, Pr и Dy, применяемых для производства генераторов с постоянными магнитами. Исследования, которые учитывают различные сценарии спроса на неодим и празеодим (включая потенциал переработки и повторного использования) показывают, что спрос на эти элементы составит $7,88 \cdot 10^5$ т к 2040 г. Несмотря на то, что полностью исключить ис-

пользование редкоземельных элементов для производства конкурентоспособных эффективных магнитов пока невозможно, производители ВТ проводят работу по сокращению их применения в своих генераторах. Например, в 2018 г. Siemens Gamesa удалось снизить концентрацию до менее 1%. Прототип генератора на постоянных магнитах на основе редкоземельного феррита был создан производителем GreenSpur. Все прототипы оказались успешными для генераторов мощностью 12 МВт, установленных для офшорных ВТ. Ожидается, что они будут также успешными для генераторов мощностью 20 МВт.

В таблице 2 показано необходимое количество материалов для производства реальных турбин Vestas V82 (высота башни 78 м, номинальная мощность 1,65 МВт) и Vestas V112 (высота башни 94 м, номинальная мощность 3,45 МВт) за исключением фундамента, трансформатор-

Таблица 2. Материалы для производства ветровых турбин Vestas V82 и Vestas V112

BT Vestas V82		BT Vestas V112	
Материал	Масса, т	Материал	Масса, т
Сталь	136,6	Сталь и железо	311,6
Алюминий	3,1	Алюминий	4,5
Пластик	3	Медь	3,21
Медь	2,9	Чугун	70,1
Чугун	29,3	Электроника	3,3
Инструментальная сталь	14,5	Смазочные материалы	1,9
Нержавеющая сталь	7,8	Полимеры	17,4
Стекловолокно и эпоксидная смола	27	Стекло/керамика	25,9
Электроника	2,5	-	-
Масло	1,3	-	-

ной подстанции, внутренних и внешних кабельных линий.

Из таблицы 2 видно, что основным материалом для ВТ является сталь (от 60 до 71%), чугун (от 12 до 16%), стекловолокно и эпоксидная смола (11%), стекло/керамика (6%), инструментальная сталь (6%), нержавеющая сталь (3%), алюминий (от 1 до 4%), медь (от 0,7 до 2%). Указанные компоненты и их количество приведены для ВТ редукторного типа с генератором с водяным охлаждением. Для изготовления генератора на постоянных магнитах, помимо изменения количества материалов, добавляются редкоземельные элементы.

Использование редкоземельных элементов при производстве ветровых турбин

Редкоземельные элементы представляют собой группу из 15 элементов лантанидов, а также элементов скандия и иттрия. Все 17 элементов характеризуются более высокой плотностью, температурой плавления и теплопроводностью. Празеодим (Pr), неодим (Nd), тербий (Tb) и диспрозий (Dy) являются редкоземельными

элементами, используемыми в технологии ветровых турбин. Празеодим (Pr) и неодим (Nd) используются для улучшения магнитной силы, а тербий (Tb) и диспрозий (Dy) улучшают сопротивление магнитов к размагничиванию, особенно при высоких температурах. Типовой постоянный магнит весит около 4 т, концентрация элементов в котором составляет: неодим – 28,5%, диспрозий – 4,4%, бора – 1% и железа – 66%. Использование тербия в настоящее время ограничено, так как он выполняет ту же функцию, что и диспрозий, но значительно дороже. Иногда и в небольших количествах используются празеодим и тербий. Генераторы с постоянными магнитами, которые в основном состоят из редкоземельных элементов Nd и небольшого количества Dy, становятся все более популярными, особенно в офшорных ветровых турбинах. Поэтому спрос на эти элементы резко вырос за последние два десятилетия: потребность Nd составляет 216 кг/МВт, а Dy 17 кг/МВт.

Другими важными металлами, используемыми в технологии ветряных турбин, являются хром (Cr), марганец (Mn), молибден (Mo) и никель (Ni). Эти критические металлы используются в виде сплава. В офшорных ВТ молибден используется с высо-

Хром

Источник: wikipedia.org



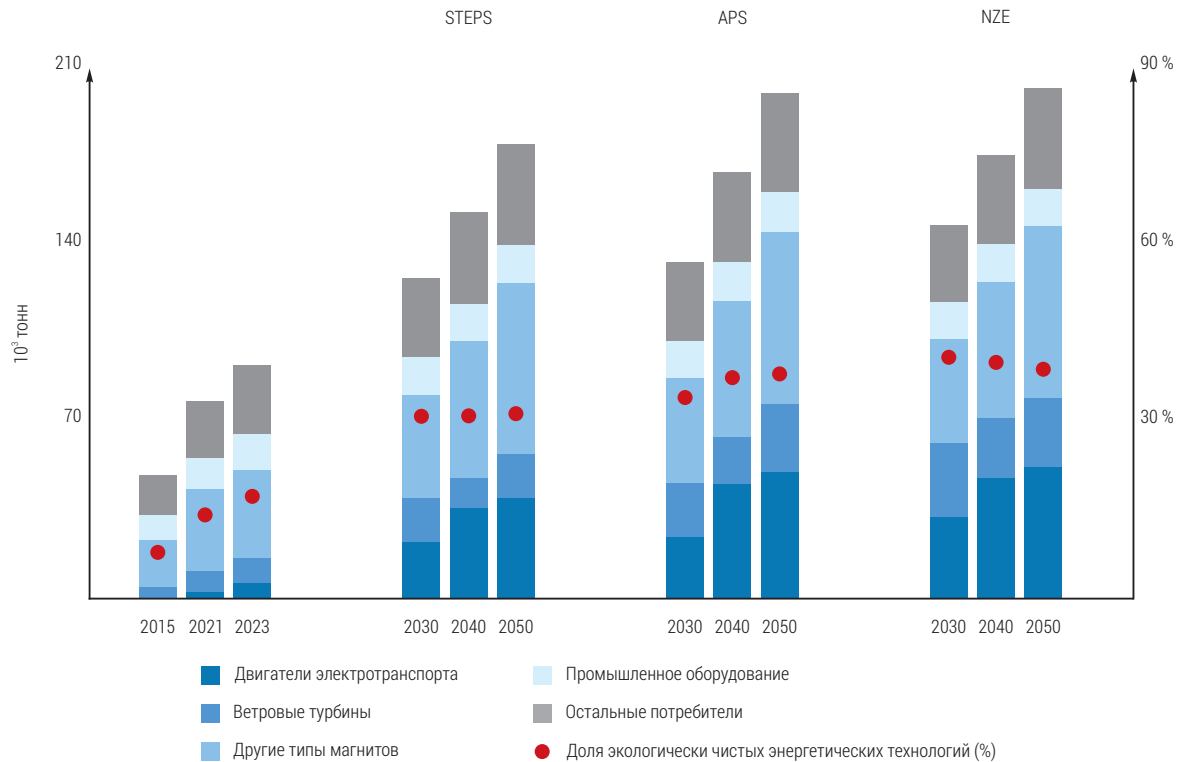


Рис. 2. Мировое потребление редкоземельных элементов для производства магнитов в различных отраслях экономики при трех сценариях развития мировой энергетики

копровой стали, а никель применяется в качестве сплава в нержавеющей стали. Нержавеющая сталь с 12–18% содержанием хрома и супернержавеющая сталь с 12–30% содержанием хрома и 7–10% содержанием никеля повышают прочность, твердость и ударную вязкость сплавов, а также препятствуют образованию коррозии и истиранию стали и уменьшают окисление. Потребность хрома для производства ВТ составляет 902 кг/МВт, марганца 81 кг/МВт, молибдена 137 кг/МВт, никеля 663 кг/МВт.

Наибольшие риски к ограничению поставок связаны с использованием редкоземельных элементов, особенно Nd, Pr и Dy, применяемых для производства генераторов с постоянными магнитами

Вклад ветровых турбин в мировое потребление редкоземельных элементов

Магниты, изготовленные из неодима, празеодима, тербия и диспрозия играют важную роль в переходе на экологически чистую энергию, поскольку они используются в двигателях для электромобилей, а также в генераторах ветровых турбин. Электродвигатели и генераторы, приводимые в действие постоянными магнитами, представляют собой наиболее энергоэффективные устройства, разработанные на сегодняшний день, которые обеспечивают экономию энергии примерно на 20–40% по сравнению с обычными двигателями. Более того, добавление небольшого количества указанных редкоземельных элементов позволяет значительно снизить потребность в других важнейших минералах, необходимых для производства двигателей электромобилей: 1–2 кг РЗЭ замещает 60–80 кг лития, никеля, кобальта.

На рис. 2 показано мировое потребление редкоземельных элементов (Pr, Nd, Tb,

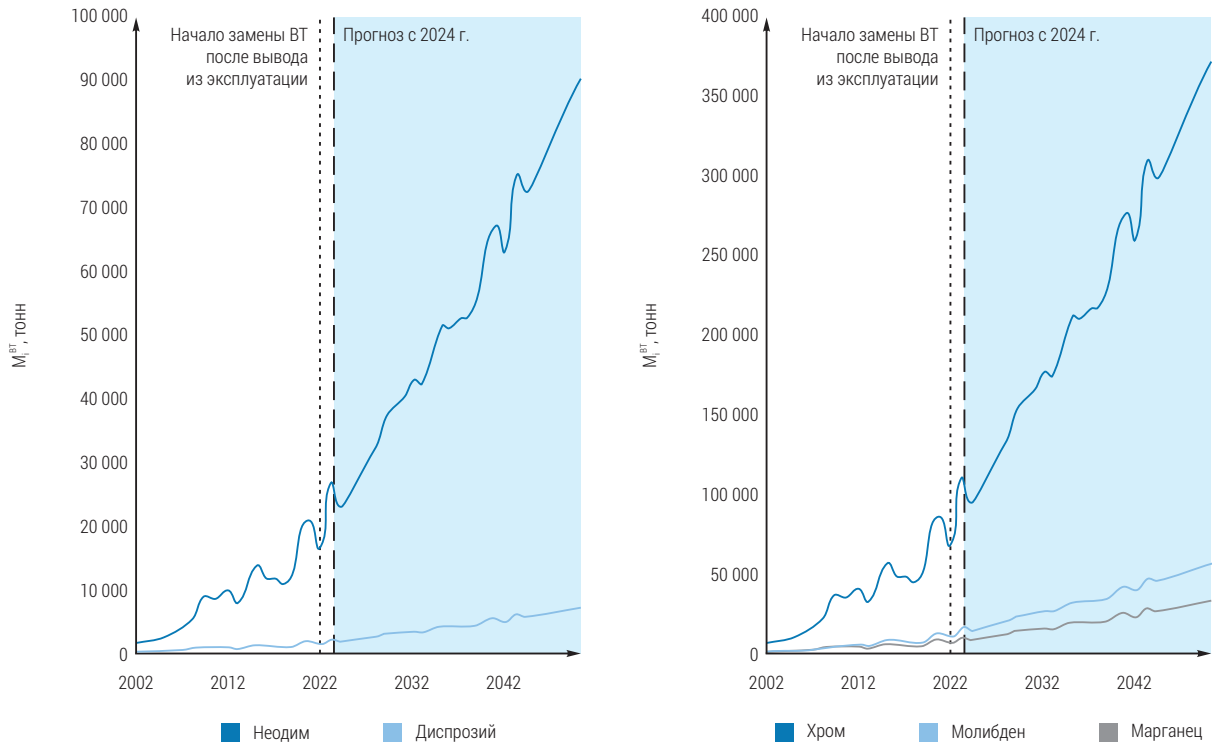


Рис. 3. Расход редкоземельных элементов для производства ветровых турбин

Dy) для производства магнитов в различных отраслях экономики при трех сценариях развития мировой энергетики [5]. Сценарий Stated Policies Scenario (STEPS) учитывает существующую климатическую политику, в результате которой прогнозируется повышение температуры на $2,4^{\circ}\text{C}$ выше доиндустриального уровня к 2100 г. (с вероятностью 50%). Сценарий Announced Pledges Scenario (APS) учитывает выполнение всех поставленных обязательств, направленных на предотвращение изменения климата, в результате чего повышение температуры составит $1,7^{\circ}\text{C}$ выше доиндустриального уровня к 2100 г. (с вероятностью 50%). Сценарий Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE) основан на ключевых целях устойчивого развития в энергетике и ограничивает повышение глобальной температуры на $1,5^{\circ}\text{C}$ выше доиндустриального уровня к 2100 г. (с вероятностью 50%).

Во всех сценариях потребление РЗЭ для производства ветровых турбин занимает значительную долю. Определение доли потребления РЗЭ при производстве ветровых турбин относительно мирового потребления РЗЭ можно определить по следующему выражению:

$$F = 100 \sum_{i=1}^n \frac{M_i^{\text{BT}}}{M_i^{\text{П}}},$$

где: F – доля потребления РЗЭ при производстве ВТ, %, M_i^{BT} – расход РЗЭ для производства ВТ в год i , тонн, $M_i^{\text{П}}$ – производство РЗЭ в год i , тонн, n – рассматриваемый период времени, лет.

$$M_i^{\text{BT}} = m \cdot r \cdot \left(\sum_{i=1}^n \Delta P_i^{\text{BT}} + \sum_{j=20}^n \Delta P_j^{\text{BT}} \right),$$

где: m – удельный расход РЗЭ, кг/МВт, ΔP_i^{BT} – прирост установленной мощности ВТ в год i , обусловленный ростом потребления электроэнергии, МВт, ΔP_j^{BT} – прирост установленной мощности ВТ в год i , обусловленный заменой ВТ по истечению срока службы, МВт, r – коэффициент, учитывающий производство дополнительных компонентов ветровых турбин при проведении ремонтных программ (в расчетах принят равным 1,05).

Срок службы ветровой турбины связан с циклическими нагрузками, которые возникают в процессе эксплуатации. Ветровые турбины рассчитываются на большое количество циклических нагрузок. Нижняя граница количества циклов, вызывающих усталостное напряжение в компонентах ветровой турбины,

пропорциональна числу оборотов лопасти в течение срока службы турбины. Например, ветровая турбина с частотой вращения около 30 оборотов в минуту, работающая 4000 часов в год, за 20-летний срок службы испытает более 10^8 циклов. Общее количество циклов за весь срок службы рассчитывается [6]:

$$n_L = 60k n_{\text{rotor}} N_{\text{op}} Y,$$

где: k – количество циклов за один оборот (для основания лопасти равно 1, для редуктора и башни равно количеству лопастей), n_{rotor} – частота вращения ротора (об/мин), N_{op} – число часов работы в год, Y – число лет эксплуатации.

На основании удельных расходов РЗЭ и данных об установленной мощности ВЭС в мире на рис. 3 представлены результаты расчетов расхода РЗЭ для производства ВТ с прогнозом до 2050 г. Срок службы ветровых турбин принят равным 20 лет.

На рис. 4 показана доля потребления редкоземельных элементов при производстве ветровых турбин относительно мирового потребления РЗЭ. При этом на правой стороне рис. 4 показана доля потребления неодима и диспрозия для производства ВТ относительно производства четырех РЗЭ [5]: неодима, празеодима,

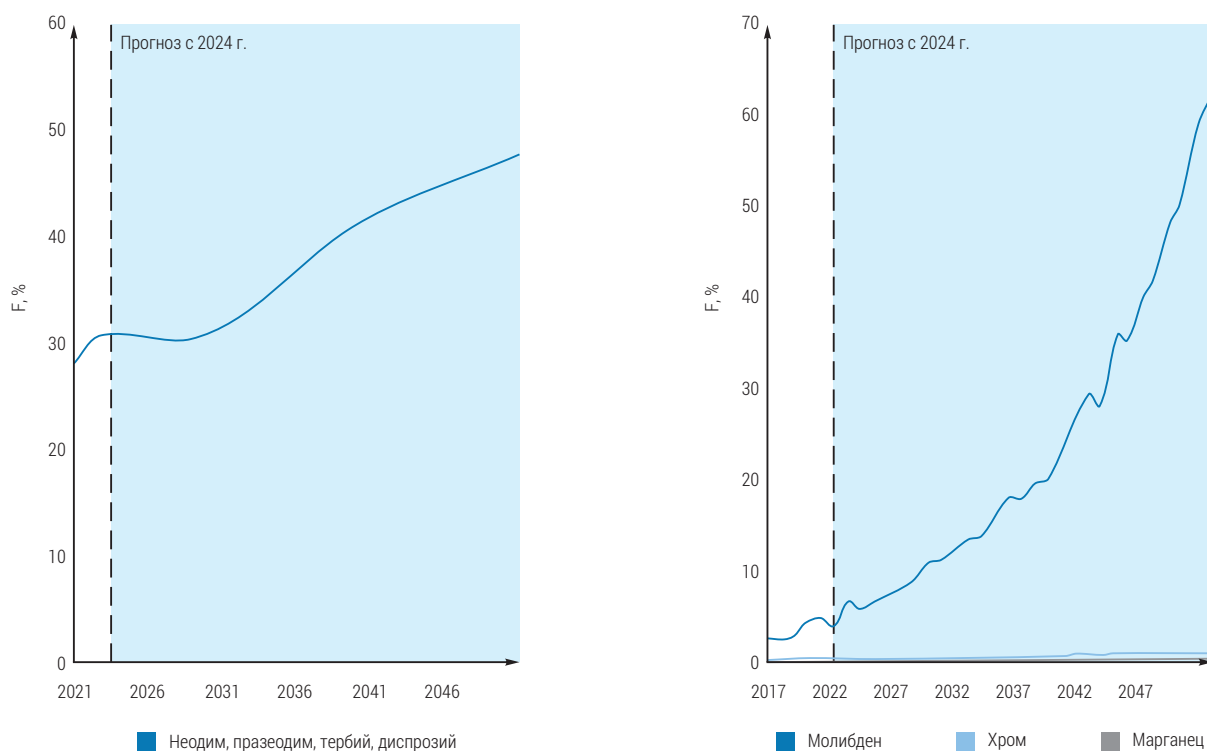
ма, тербия и диспрозия. На левой стороне рис. 4 показана доля потребления хрома, марганца и молибдена относительно мирового производства [7–8]. Результаты расчетов показывают, на сколько производство ВТ влияет на общую структуру потребления РЗЭ, особенно неодима, диспрозия и молибдена.

Прогнозный рост потребления редкоземельных металлов для производства ВТ приводит к сокращению их запасов и, как следствие, росту их стоимости. На рис. 5 показано потребление хрома, марганца, молибдена в мире во всех отраслях промышленности относительно разведанных запасов [9–10] к 2050 г. с учетом прогнозов производства РЗЭ и роста установленной мощности ВЭС. Наибольшие риски связаны с сокращением запасов молибдена на 32,8%.

Способы сокращения использования редкоземельных элементов при производстве ветровых турбин

Рост установленной мощности ВЭС в мире сопряжен с ростом потребления

Рис. 4. Доля потребления редкоземельных элементов при производстве ветровых турбин



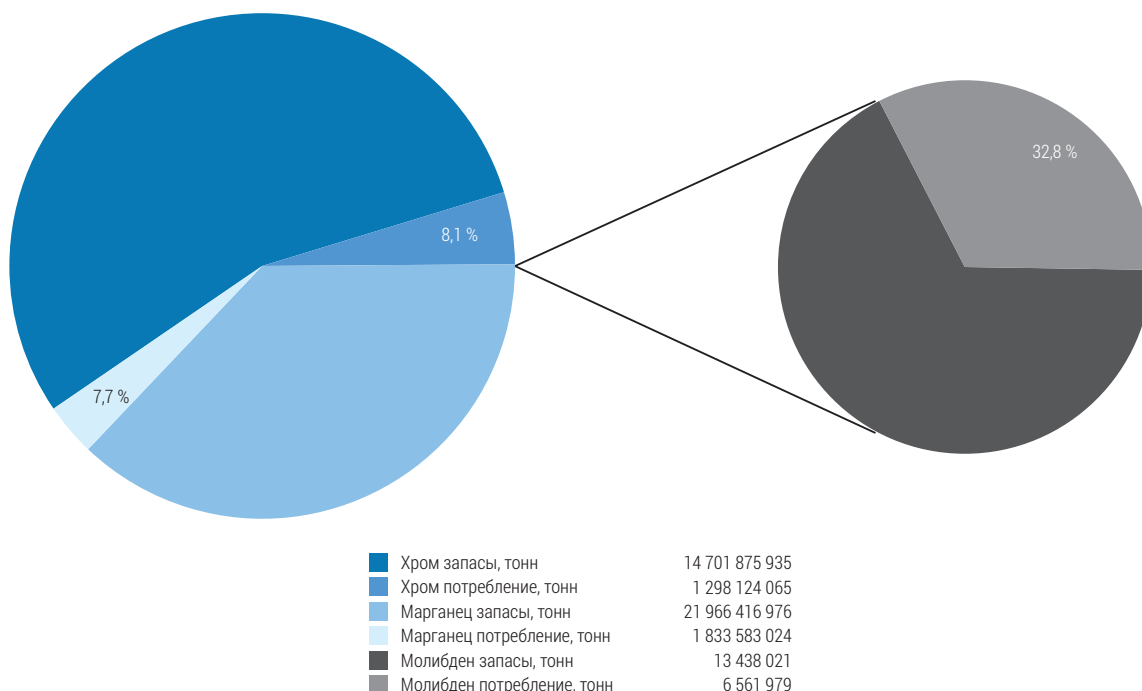


Рис. 5. Потребление хрома, марганца, молибдена в мире во всех отраслях промышленности относительно разведанных запасов

РЗЭ и других критических элементов для производство ветровых турбин, что приводит к следующим основным рискам:

- рост стоимости производства отдельных компонентов ВТ в связи с ростом стоимости элементов, вызванных их дефицитом;
- возможное снижение эффективности генераторов и отдельных элементов конструкции при снижении концентрации или замене РЗЭ и других критических элементов на их аналоги с худшими характеристиками;

- замедление роста установленной мощности ВЭС в энергосистемах в долгосрочной перспективе в связи с дефицитом отдельных элементов и их высокой стоимостью и, как следствие, невыполнение долгосрочных энергетических стратегий различных стран.

Указанные риски приводят к необходимости внедрения способов сокращения использования редкоземельных элементов при производстве ветровых турбин. На сегодняшний день можно выделить 3 основных направления по сокращению использования РЗЭ.

1. Внедрение новых технологий при проектировании компонентов ВТ для снижения доли потребления РЗЭ при производстве.

К данному направлению относится в первую очередь внедрение новых типов генераторов с меньшим использованием РЗЭ. ВТ без генераторов на постоянных магнитах могут использовать редукторный привод с электромагнитным генератором или генератор с прямым приводом с магнитом, изготовленным из медных обмоток (эта конфигурация, известная как синхронный генератор с электрическим возбуждением, исключает использование редкоземельных магнитов, но увеличива-

Производители энергетического оборудования уже сегодня проводят исследования по сокращению использования редкоземельных металлов и других элементов в генераторах ветровых турбин

ет масса-габаритные характеристики). В последнее время начали внедряться генераторы со средней скоростью вращения, использующие меньшее количество редкоземельных элементов. Также снижение веса генераторов возможно за счет применения высоковольтных генераторов постоянного тока и замены стали на чугун в валу ротора и главном подшипнике [11].

Помимо снижения доли РЗЭ в генераторах ВТ, значительное потребление материалов занимают такие компоненты, как башни, лопасти, гондолы. Применение альтернативных материалов при проектировании башни (дерево, алюминий, бетон, композитные материалы), включая их гибридное исполнение со сталью, позволяет значительно снизить потребление критических элементов, использующихся для сплавов в нержавеющей стали (особенно для оффшорных ВТ). Например, в нижние секции основания башни могут включать бетонное исполнение.

Снижение потребления РЗЭ и других критических элементов может быть достигнуто не только прямыми методами (замена на альтернативные материалы), но и косвенно, в результате снижения общей массы ветровой турбины. Например, уменьшение массы гондолы позволяет снизить нагрузку на башню, в результате чего масса башни также снижается. Ис-

Учитывая высокую зависимость производства от дефицитных элементов, нехватка которых будет нарастать, увеличение доли ветровых станций в балансе энергосистем может быть ограничено

пользование лонжеронов лопастей из композитных материалов на основе углеродных волокон позволяет снизить массу лопастей до 25% в сравнении с лонжеронами со стеклопластиковым исполнением.

2. Увеличение количества циклических нагрузок компонентов ВТ. Увеличение количества циклических нагрузок компонентов приводит к увеличению срока службы ВТ. Прирост установленной мощности ВТ ΔP_j^{BT} , обусловленный заменой ВТ по истечению срока службы снижается, одновременно сокращается расход редкоземельных металлов для производства ВТ M_i^{BT} . Для увеличения срока эксплуатации ВТ можно либо наращивать количество циклических нагрузок за счет внедрения новых техно-

Сборка ветрогенератора в Дании

Источник: kruwt / depositphotos.com



логий и материалов, либо проводить дополнительное техническое обслуживание и модернизацию для продления срока службы. Второй способ позволяет достичь увеличения срока службы с 20 до 25 лет и снижения потребности в РЗЭ на 15%.

3. Переработка и повторное использование компонентов ветровых турбин. Вторичная переработка уже вносит значительный вклад в поставки алюминия, железа, стали, никеля, меди, хрома, олова и других элементов. Возможности их вторичной переработки и использования зависят от соотношения между спросом на элементы и их запасами, а также степени вторичной переработки после срока службы. При этом степень переработки также отличается. Например, степень переработки меди составляет около 50%, а свинца – около 90%. Степень переработки железа и стали, которые составляют большую часть массы ветровой турбины, по различным оценкам, достигает от 70 до 90% переработки.

Однако в настоящее время не существует эффективного метода вторичной переработки магнитов с РЗЭ. Только от 3 до 7% таких магнитов перерабатываются, поскольку существующие процессы неэкономичны и/или приводят к образованию огромного количества токсичных отходов.

Хотя современные методы переработки все еще находятся на различных стадиях исследований и разработок, предполагается, что в ближайшие 10–15 лет переработанные редкоземельные элементы из постоянных магнитов с истекшим сроком службы будут играть значительную роль в общем объеме поставок.

Выводы

1. Предложенный расчет доли спроса на редкоземельные элементы при производстве ветровых турбин относительно мирового потребления показывает, что увеличение установленной мощности ветровых электростанций в мире ведет к росту дефицита элементов, используемых для производства компонентов: диспрозия, неодима, празеодима, тербия, скандия, иттрия, а также хрома, марганца и молибдена.
2. В зависимости от спроса на дефицитные виды твердых полезных ископаемых, вызванного географическими, политическими и рыночными обстоятельствами, их критическая потребность в компонентах

Литиевые аккумуляторные батареи

Источник: [firefox / depositphotos.com](https://www.firefox.com/stockphotos)





Утилизация ветряных турбин

Источник: highworthcitizen.com

ветровых турбин может меняться. Производители оборудования уже сегодня проводят исследования по сокращению использования редкоземельных элементов в своих генераторах и других критических элементов в компонентах ветровых турбин по 3 основным направлениям: внедрение новых технологий, увеличение количества циклических нагрузок и переработка и повторное

использование компонентов ветровых турбин.

3. Учитывая высокую зависимость производства ветровых турбин от дефицитных элементов и прогнозируемый дальнейший дефицит в связи с ежегодными темпами строительства новых ВЭС, увеличение доли ветровых электростанций в балансе энергосистем может быть ограничено.

Использованные источники

1. Распоряжение Правительства РФ от 16.04.2024 г. № 939-р «Об утверждении Перечня дефицитных видов твердых полезных ископаемых и Перечня продукции с высокой долей добавленной стоимости, производимой с использованием добытых дефицитных видов твердых полезных ископаемых».
2. Global wind report [Text] // Global Wind Energy Council (GWEC). 2024. – 168 p.
3. Verma S., Paul A.R., Haque N. Assessment of Materials and Rare Earth Metals Demand for Sustainable Wind Energy Growth in India. *Minerals* 2022, 12, 647. <https://doi.org/10.3390/min12050647>
4. Manwell James & McGowan, Jon & Rogers A. (2006). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, Second Edition.
5. Global Critical Minerals Outlook 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024>
6. Manwell J. F., McGowan J. G. and Rogers A. L. *Wind Energy Explained: Theory Design and Application* // John Wiley & Sons, Hoboken, 2002.
7. Idoine N.E., Raycraft E.R., Price F., Hobbs S.F., Deady E.A., Everett P., Shaw R.A., Evans E.J., and Mills A.J. 2023. *World Mineral Production 2017-21*. British Geological Survey, Keyworth, Nottingham.
8. Idoine N.E., Raycraft E.R., Hobbs S.F., Everett P., Evans E.J., Mills A.J., Currie D., Horn S. and Shaw R.A. 2024. *World Mineral Production 2018-22*. British Geological Survey, Keyworth, Nottingham.
9. Moran-Palacios H., Ortega-Fernandez F., Lopez-Castaño R., Alvarez-Cabal J.V. The Potential of Iron Ore Tailings as Secondary Deposits of Rare Earths. *Appl. Sci.* 2019, 9, 2913. <https://doi.org/10.3390/app9142913>
10. Приказ Минпромторга России от 05.05.2014 № 839 «Об утверждении Стратегии развития черной металлургии России на 2014-2020 гг. и на перспективу до 2030 г. и Стратегии развития цветной металлургии России на 2014-2020 гг. и на перспективу до 2030 г.».
11. *Materials Used in U.S. Wind Energy Technologies: Quantities and Availability for Two Future Scenarios*, NREL Technical Report (2023).