

ВИЭ и побочные экологические эффекты

Эта статья является продолжением темы развития энергетики на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Речь идёт о вкладе энергетики на возобновляемых источниках в эмиссию парниковых газов и, в целом, побочных экологических эффектах развития энергетики на основе ВИЭ. В ряде случаев отрицательные последствия возобновляемой энергетики для среды и общества могут быть велики — вопреки заявленным целям об улучшении экологических показателей, и каждый проект требует отдельного тщательного анализа. В целом, положительные и отрицательные экологические эффекты энергетики на ВИЭ — вопрос, ещё требующий дополнительных комплексных исследований.

Автор: К.С. ДЕГТЯРЕВ



В предыдущей статье на тему ВИЭ, посвящённой факторам изменений климата, упоминался климатический аспект развития возобновляемой энергетики. Он связан с «нулевой эмиссией CO₂» при работе солнечных, ветряных, гидравлических и других энергетических станций на возобновляемых ресурсах. Действительно, в данных случаях выработка энергии идёт без сжигания углеводородного сырья и, как следствие, без выделения парниковых газов и других загрязнителей в атмосферу.

Однако ситуация сложнее, если рассматривать весь жизненный цикл производства, начиная с подготовительных стадий и включая побочные эффекты в процессе выработки энергии.

Для получения энергии необходимы изготовление и установка энергетического оборудования, создание инфраструктуры и обеспечение условий для его работы, подготовка сырья, утилизация отработанного материала и оборудования по истечении срока службы. Это требует работы металлургических, машиностроительных, сельскохозяйственных и других предприятий, использования энергии из ископаемых источников, и означает уже ненулевую эмиссию.

Учёт воздействий на окружающую среду на всех стадиях показывает, что

переход к возобновляемой энергетике не всегда ведёт к снижению загрязнения среды, в том числе к снижению эмиссии CO₂ и других парниковых газов.

Исследования побочных эффектов (в том числе экологических) возобновляемой энергетики в комплексе имеют сравнительно недавнюю историю, а в последнее время об этом заговорили активнее. Одна из недавних заметных работ — труд норвежского исследователя, научного сотрудника и руководителя проектов Западно-норвежского исследовательского института (Western Norway Research Institute, WNRI) Отто Андерсена (Otto Andersen) «Непреднамеренные последствия возобновляемой энергетики. Проблемы, требующие решения» [1]. Работа Андерсена использует ранее собранную разными исследователями информацию по отдельным видам энергии и регионам, на основе которых выстраивается обобщённая картина экологических рисков возобновляемой энергетики.

Ключевые понятия и подходы связаны с анализом жизненного цикла (Life Cycle Analysis, LCA) и оценкой так называемых «встречных эффектов», «эффектов отскока» или «обратных эффектов» — rebound effects, что переводят как «восстановительные эффекты» или, без перевода, «ребаунд-эффекты».





Рис. 1. Распределение эмиссии парниковых газов по стадиям жизненного цикла для ветряной и угольной энергетики (данные National renewable energy laboratory, NREL)

Основное внимание с позиций анализа жизненного цикла и встречных эффектов уделено биоэнергетике (выращиванию энергетических культур для производства биотоплива), солнечной фотовольтаической энергетике, некоторым аспектам водородной энергетики и использованию электромобилей.

Ряд вопросов остаётся открытым, исследование побочных эффектов в возобновляемой энергетике пока нельзя назвать достаточно хорошо изученной темой, хотя в предыдущие годы был проведён ряд локальных исследований и экспериментов.

Возобновляемая энергетика и эмиссия парниковых газов

Если говорить об эмиссии парниковых газов, то разные виды возобновляемой энергетики, по выражению Андерсена, вовсе не являются «равнозелёными» (equally green), если рассматривать их с позиций полного жизненного цикла. Основной показатель, с точки зрения эмиссии парниковых газов, связанной с производством энергии, используемый в том числе Андерсоном, — это количество грамм-эквивалента CO₂ на единицу произведённой энергии, в частности, для электроэнергетики принимается 1 кВт·ч, то есть гCO₂экв/кВт·ч.

В данном случае важна методика расчёта и исходные допущения — прежде всего, для какого интервала времени идёт расчёт, а также загрузка производственных мощностей (коэффициент использования установленной мощности, то есть КИУМ) и, соответственно, ожидаемая выработка энергии за определённый промежуток времени. Картина здесь та же, что и с расчётом выровненных затрат (Levelized Costs, LC) на производство единицы энергии, о котором мы говорили в статье [2]. Чаще всего используется 20-летний интервал.

Анализ жизненного цикла даёт следующие показатели эмиссии для разных типов производства электрической энергии [гCO₂экв/кВт·ч]: ветряная — 12; приливная — 15; гидравлическая — 20; океаническая волновая — 22; геотермальная — 35; солнечные (фотовольтаические) батареи — 40; солнечные концентраторы — 10; биоэнергетика — 230.

Это, однако, в любом случае на порядок меньше величин, приводимых для энергетики, работающей на ископаемом сырье [3]: угольная — 820; газовая — 490. В то же время, самой «экологически безопасной», в данном смысле, является атомная энергетика, где показатель эмиссии гCO₂экв/кВт·ч составляет всего 12, то есть этот параметр равен самым низким показателям энергетики на возобновляемых источниках. Очевидно, что распределение эмиссии парниковых газов по стадиям жизненного цикла производства для разных типов энергетики кардинально различается (рис. 1, табл. 1).

В случае с ветряной, солнечной, геотермальной и гидроэнергетикой основная экологическая нагрузка приходится на стадию производства материалов, оборудования и строительства станций. Сходная структура и у атомной энерге-

тики. У энергетики, работающей на ископаемом топливе, основная часть эмиссии приходится на период работы станции, для которой необходимо сжигание топлива. То же верно и для биоэнергетики. Таким образом, здесь мы тоже можем провести аналогию со структурой затрат — в первом случае «экологические затраты» относятся, скорее, к категории постоянных, во втором — к категории переменных. В первом случае преимущества сильнее проявляются на более длительных интервалах времени. Во втором случае сократить разрыв в «углеродно-эмиссионной ёмкости производства» можно за счёт технологий, по-

Основное внимание с позиций анализа жизненного цикла и встречных эффектов уделено биоэнергетике (выращиванию энергокультур для производства биотоплива), солнечной фотовольтаической энергетике, некоторым аспектам водородной энергетики и использованию электромобилей

звляющих сокращать расход топлива и систем улавливания парниковых газов. В данном случае, при сравнении «эмиссионной ёмкости» ветряных и угольных электростанций допускается временной интервал 20 лет и КИУМ ветростанций составляет 30–40%.

Следует учитывать, что выше приведены грубые усреднённые (медианные) значения, здесь не может быть большой точности. Очень много зависит от технологии и конкретных условий производства. Данные различных исследований и разных источников могут кардинально расходиться. В частности, для ветроэнергетики разброс может составлять от 2 до 80 гCO₂экв/кВт·ч (onlinelibrary.wiley.com).

Рис. 2. Распределение эмиссии парниковых газов*

табл. 1

Энергоноситель	Стадии жизненного цикла:		
	первичная	основная	завершающая
Ветер	Извлечение сырья, производство модулей, производство оборудования, строительство электростанции	Производство энергии, обслуживание станции	Вывод станции из эксплуатации
Эмиссия, гCO₂экв/кВт·ч	8,6	0,9	0,5
Эмиссия, % от общей	86	9	5
Уголь	Извлечение сырья, производство строительных конструкций и оборудования	Добыча, подготовка, транспортировка и сжигание угля, обслуживание станции	Вывод станции из эксплуатации, утилизация отходов, восстановление территории под угледобычей
Эмиссия, гCO₂экв/кВт·ч	< 10	> 980	10
Эмиссия, % от общей	< 1	> 98	< 1

* По стадиям жизненного цикла для ветряной и угольной энергетики.

Для ГЭС показатель $\text{гСО}_2\text{экв/кВт}\cdot\text{ч}$ может достигать 180. А «нижние» значения для электростанций на ископаемом топливе — 200–300 $\text{гСО}_2\text{экв/кВт}\cdot\text{ч}$.

Причины, по которым эмиссия парниковых газов может достигать высоких значений для жизненных циклов гидроэлектростанций, солнечных, биоэнергетических и геотермальных станций, различны. В случае с ГЭС это, прежде всего, формирование водохранилища при плотине, в котором может формироваться застойный режим с микробиологическим разложением органического материала в приплотинной зоне, что вызывает рост эмиссии CO_2 и CH_4 (метана). Сходные процессы возможны и в зонах приливных электростанций. В солнечной фотовольтаической энергетике основные проблемы связаны с процессом производства солнечных батарей, ведь среди прочих рисков для среды и здоровья он приводит к эмиссии ряда соединений фтора — гексафторэтана C_2F_6 , трёхфтористого азота NF_3 , гексафторида серы SF_6 , являющихся мощными парниковыми газами. В случае с геотермальной энергетикой многое зависит от состава энергоносителя — термальной воды, отличающейся высокой температурой и минерализацией со сложным химическим составом. В процессе её использования и утилизации возможно как непосредственное тепловое загрязнение среды, так и выделение в почву, воду и атмосферу ряда химических соединений, включая парниковые газы.

Эмиссия парниковых газов при использовании биоэнергии происходит на всех стадиях. Прежде всего, она происходит на стадии выращивания энергетических культур, в частности, рапса и мас-

В среднем, как видно, несмотря на ребаунд-эффект, эмиссия парниковых газов в жизненном цикле возобновляемых источников энергии остаётся существенно ниже по сравнению с невозобновляемыми энергетическими ресурсами (за исключением атомной энергетики)

личной пальмы. Интенсивная культивация рапса требует большого количества азотных удобрений, что ведёт к росту эмиссии мощного парникового газа — двуоксида азота N_2O , являющейся, кроме того, разрушителем озонового слоя.

Большие плантации масличной пальмы были созданы в Юго-Восточной Азии (Индонезии, Малайзии, Таиланде) на торфяно-болотных землях, являющихся естественными «ловушками» и «кладовыми» углерода, и на месте тропических и экваториальных дождевых лесов, выполняющих роль «лёгких планеты». Это вызвало быстрое разрушение почвенного покрова, нарушение естественного режима поглощения углерода и, соответственно, рост поступления парниковых газов (CO_2 и CH_4) в атмосферу. При худших сценариях масштабный переход от ископаемого к биотопливу может не уменьшить, а даже увеличить эмиссию парниковых газов на величину до 15%.

Другой, пока практически неизученный аспект — возможное снижение общего альбедо (отражающей способности) Земли при масштабном распространении энергетических культур, что теоретически может стать фактором потепления климата.

На стадии эксплуатации — сжигания биотоплива (на транспорте и энергетических станциях), обычно производимого в смеси с ископаемым топливом, также образуются, как выясняется, новые химические соединения, несущие как токсическую, так и парниковую опасность. Рост эмиссии парниковых газов как следствие действий по её сокращению — один из примеров ребаунд-эффекта.

В среднем, как видно, несмотря на этот эффект, эмиссия парниковых газов в жизненном цикле возобновляемых источников энергии остаётся существенно ниже по сравнению с невозобновляемыми энергетическими ресурсами (за исключением атомной энергетики).

В то же время, это далеко не во всех случаях так, и каждый конкретный проект или программа развития энергетики на возобновляемых источниках требует тщательного анализа, в том числе с экологических позиций — всегда заведомо «более зелёными» по сравнению с другими вариантами их считать нельзя.

Другие побочные эффекты

Помимо эмиссии парниковых газов в качестве встречного эффекта, энергетика на ВИЭ имеет и другие побочные экологические последствия. ГЭС и приливные электростанции меняют режимы течений и температур рек и морских заливов, становятся барьерами на путях миграции рыб и других потоков вещества и энергии. Кроме того, один из существенных побочных эффектов ГЭС — затопление территорий, пригодных для расселения, сельскохозяйственной и другой деятельности.

При этом на берегах водохранилищ при ГЭС могут развиваться оползневые процессы, возможны изменения местных климатических условий и развитие сейсмических явлений. Застойный водный режим в водохранилищах способен провоцировать не только рост эмиссии парниковых газов, но и накопление вредных веществ, представляющих угрозу в том числе для здоровья человека.

Отдельную опасность могут представлять прорывы и обрушения плотин ГЭС — особенно в горных и сейсмоопасных районах. Одна из крупнейших катастроф такого рода произошла в 1963-м году на реке Вайонт (Vajont) в итальянских Альпах, где в водохранилище при плотине ГЭС сошёл гигантский оползень, вызвавший перелив волны через плотину и образование «цунами» высотой до 90 м. Огромной волной было снесено несколько населённых пунктов, погибло более 2000 человек.



Геотермальная энергетика несёт риски химического загрязнения воды и почвы — термальные флюиды, помимо углекислого газа, содержат сульфид серы H_2S , аммиак NH_3 , метан CH_4 , поваренную соль $NaCl$, бор B , мышьяк As , ртуть Hg . Возникает проблема утилизации опасных отходов. Кроме того, возможны коррозионные разрушения конструкций самих термальных станций, а выкачивание термальной воды может вызывать деформации слоёв горных пород и локальные сейсмические явления, сходные с теми, что возникают при любом горнодобывающем производстве или заборе межпластовых грунтовых вод.

Биоэнергетика связана с отчуждением сельскохозяйственных земель (и других ресурсов) для выращивания энергетических культур, что при масштабном переходе к использованию биоэнергии может обострить продовольственную проблему в мире.

Самый грубый расчёт показывает, что выращивание рапса или подсолнечника в качестве сырья для биотоплива может дать в итоге около тонны биотоплива с 1 га обрабатываемой земли. Общий объём потребления энергии в мире достигает 20 млрд тонн в год в нефтяном эквиваленте. Замещение этого объёма биотопливом всего на 10%, или на 2 млрд тонн, потребовал бы отчуждения порядка 2 млрд га земли, то есть около 40% всех сельскохозяйственных угодий мира или 15% всей площади земной суши, исключая Антарктиду. Масштабное распространение энергетических монокультур снижает биоразнообразие, как прямо, так и косвенно, через ухудшение условий обитания многих видов флоры и фауны.

На стадии сжигания биологического топлива, в частности, на транспорте, при его смешивании с ископаемым топливом (обычным дизелем или бензином) и использовании добавок, позволяющих лучше работать в зимних условиях, идёт образование новых химических соединений, токсичных и канцерогенных по своим свойствам. Это показали, в частности, наблюдения и эксперименты в рамках исследования «Влияние биокомпонентного состава топлива на эмиссию дизельных двигателей и ухудшение дизельного масла» (Influence of biocomponents content in fuel on emissions from diesel engines and engine oil deterioration).

В этой связи сравнительно предпочтительной выглядит водорослевая энергетика — получение энергетического сырья из водорослей. Среди известных культур — такие как *Botryococcus braunii* и *Arthrospira (Spirulina) platensis*. Водорос-



ли, по сравнению с «сухопутными» энергокультурами, отличаются более высокой (в определённых условиях — на порядок выше) продуктивностью на единицу площади в единицу времени и более высоким содержанием жиров (липидов) — исходного сырья для производства биотоплива. Кроме того, выращивание водорослей не связано с отчуждением продуктивных сельскохозяйственных земель, созданием сложных конструкций и оборудования, использованием большого объёма удобрений. При этом водоросли — один из мощных поглотителей углекислого газа и продуцентов кислорода. В связи с этим, это направление возобновляемой энергетики, пока недостаточно разработанное, можно считать весьма перспективным и с производственных, и с экологических позиций.

Ветроэнергетика — наименее опасная с точки зрения эмиссии парниковых газов и загрязняющих веществ, вызывает в то же время ряд претензий экологов по другим позициям. Они включают шумовое загрязнение местности, «эстетическое загрязнение», риск воздействия вращающихся лопастей на психику. Другая группа претензий связана с воздействием на фауну — в частности, ветряки могут отпугивать птиц и вызывать их гибель при столкновении с лопастями.

Проблема, также нарастающая со временем, особенно по мере строительства офшорных (морских) ветростанций — проблемы с доступностью для сервисных и аварийных служб, затруднения в обслуживании, устранении поломок и аварийных ситуаций, в частности, при возгорании ветрогенераторов

Накопленный опыт эксплуатации ветрогенераторов, насчитывающий в Западной Европе уже около 20 лет, показывает, что эти претензии носят скорее умозрительный характер — во всяком случае, при данной плотности ветрогенераторов и соблюдении определённых мер безопасности, в частности, размещение ветрогенераторов на расстоянии не менее нескольких сотен метров от жилых кварталов. Более реальными выглядят другие проблемы. Одна из них очевидна — ветроэлектростанции требуют больших площадей, и существуют некие пределы их установки на территориях с высокой плотностью населения и инфраструктуры. Другая проблема, становящаяся со временем всё более насущной — утилизация отработавших свой ресурс лопастей ветротурбин, построенных из композитных материалов и несущих высокий потенциал загрязнения среды.

Следующая проблема, также нарастающая со временем, особенно по мере строительства офшорных (морских) ветростанций — проблемы с доступностью для сервисных и аварийных служб, затруднения в обслуживании, устранении поломок и аварийных ситуаций, в частности, при возгорании ветрогенераторов.

Все перечисленные выше проблемы могут усилиться, создавая мультипликативный эффект, при более широком распространении ветроэнергетики. В настоящее время на неё приходится около 9% общего объёма производства электроэнергии в Германии, около 5% в Италии, 18% — в Испании. В других крупных странах-производителях электроэнергии это существенно меньшая доля, в среднем же в мире она составляет около 2,5%. К каким эффектам может привести наращивание ветроэнергетических мощностей в два-три раза и более — отдельный вопрос для изучения.



В солнечной энергетике основные экологические риски связаны с использованием большого количества токсичных и взрывных компонентов при изготовлении солнечных батарей. В частности, солнечные батареи содержат теллурид кадмия CdTe, сульфид кадмия CdS, арсенид галлия GaAs, а в процессе производства используется фтор, создающий ряд токсичных соединений. Это создаёт проблемы сначала на стадии производства, а затем на стадии утилизации батарей, отработавших свой ресурс. Эта проблема также неизбежно будет нарастать со временем. Другая проблема производства солнечных батарей — большие объёмы потребления воды. По американским данным, потребление воды высокой степени очистки для производства 1 МВт мощностей — около 10 л/мин.

Интегральный показатель, применяемый для оценки вреда того или иного вида деятельности для общества и среды, — это внешние, или экстерналии издержки (external costs), не включённые в цену продукта издержки, которые несёт общество в целом, то есть причинённый социально-экономический и социально-природный ущерб. Внешние издержки включают в себя вред для здоровья людей, коррозию и другие повреждения, наносимые материалам и конструкциям, снижение урожаев и др.

В оценке внешних издержек многое зависит от исходных допущений, они могут резко различаться по странам. В частности, для стран ЕС диапазон внешних издержек производства электроэнергии (евроцентов за кВт·ч) для различных источников энергии составляют (по данным ec.europa.eu): уголь — 2–15;

нефть — 3–11; газ — 1–4; атомная энергия — 0,2–0,7; биомасса — 0–5; гидроэнергия — 0–1; солнечная (фотовольтаическая) энергия — 0,6; ветер — 0–0,25.

Для Германии (крупнейшего производителя электроэнергии в Европе с широким развитием энергетики на основе возобновляемых источников энергии) внешние маргинальные (переменные) издержки производства электроэнергии различными источниками оцениваются в следующие величины (евроцентов за кВт·ч): уголь — 0,75; газ — 0,35; атомная энергия — 0,17; солнечная — 0,46; ветряная — 0,08; гидроэнергия — 0,05.

Здесь мы также видим, что энергетика на ВИЭ несёт в среднем заметно меньшие издержки для общества, чем получение энергии из ископаемого сырья.

В то же время, атомная энергетика обнаруживает не менее высокую экологическую конкурентоспособность, несмотря на то, что в связи с известными катастрофами на АЭС в Чернобыле и Фукусиме её репутация в глазах общества заметно подорвана.

Развитие энергетики на ВИЭ требует дополнительного использования невозобновляемых ресурсов: сырья для удобрений в случае с биоэнергетикой, металла для оборудования и строительных конструкций, ископаемого природного газа для производства водородного топлива, энергии из ископаемых источников для работы данных производств

Дополнительные сложности и проблемы связаны с тем, что стадии жизненного цикла могут быть распределены по разным странам. В частности, начальные стадии, на которые приходится основная часть внешних издержек, такие, как выращивание энергетических культур или производство солнечных батарей, чаще проходят за пределами Европы и Северной Америки. Так, на данный момент почти 60% всех солнечных батарей в мире производится в Китае.

Операционная стадия, на которую в случае с ВИЭ приходится минимальная доля издержек, связана с западными странами — потребителями «зелёной» энергии, а издержки завершающей стадии — утилизации, также могут выноситься в другие регионы.

Иными словами, в случае с энергетикой на основе ВИЭ также возможны ситуации, когда основные выгоды получают одни группы, а издержки ложатся на других. Распределение выгод и издержек — также важный вопрос, имеющий уже социальное измерение.

Фундаментальная же проблема состоит в том, что развитие энергетики на ВИЭ требует дополнительного использования невозобновляемых ресурсов: сырья для удобрений в случае с биоэнергетикой, металла для оборудования и строительных конструкций, ископаемого природного газа для производства водородного топлива, энергии из ископаемых источников для работы данных производств. Соответственно, наращивание производства энергии за счёт ВИЭ будет требовать и роста потребления невозобновляемых ресурсов. Положение вещей, при котором можно будет говорить о безусловном успехе и состоятельности возобновляемой энергетики — создание полных производственных циклов, где производится возобновляемой энергии обеспечивается из возобновляемых же источников. ●

1. Andersen O., Unintended Consequences of Renewable Energy. Problems to be solved. Springer-Verlag. London. 2013.
2. Дегтярев К.С. Возобновляемые источники энергии — от энтузиазма к прагматизму // Журнал С.О.К., №4/2015.
3. Schlomer S., Bruckner T., Fulton L., Hertwich E., McKinnon A., Perczyk D., Roy J., Schaeffer R., Sims R., Smith P. and Wiser R. Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Farahani E., Kadner S., Seyboth K., Adler A., Baum I., Brunner S., Eickemeier P., Kriemann B., Savolainen J., Schlomer S., von Stechow C., Zwickel T. and Minx J.C. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.